



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Korozní odolnost trub z tvárné litiny proti bludným proudům

leden 2015

Vypracoval: Jiří Zedník  
Vedoucí práce: Ing. Ivan Cimbolínek

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 5. 1. 2015

.....  
podpis

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jiří Zedník**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Vliv stejnosměrných bludných proudů na korozní odolnost trub z tvárné litiny**

### Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rozbor problematiky bludných proudů. Rozbor bludných proudů z obecného hlediska, jejich význam, jak vznikají, od čeho vznikají, jak působí a stanovte negativní vlivy na materiál inženýrských sítí v zemi (např. vodovody z tvárné litiny či oceli).
2. Navrhněte metodiku a postup měření bludných proudů v lokalitě Strančice.
3. Popište, funkci a způsob ochrany obalu z cementové malty před účinky bludných proudů.
4. Vyhodnoťte působení intenzit bludných proudů a posuďte, zda-li OCM z hlediska ochrany vyhovuje.

### Seznam odborné literatury:

- [1] KOSTADINOV, Dečo. Ochrana sdělovacích kabelů před korozi. 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1983.
- [2] KUDLÁČEK, Ivan. Degradací procesy I. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. Skriptum ČVUT. ISBN 80-01-01098-8.
- [3] POLÁK, Josef a Pavel VELETA. Rukověť katodické protikorozi ochrany. 1. vyd. Praha: Český plynárenský svaz, 2002. ISBN 3-527-29586-0.
- [4] ČSN EN 50122-2/A1. Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Část 2: Ochranná opatření proti účinkům bludných proudů, způsobených DC trakčními proudovými soustavami. Praha: Český normalizační institut, 2003.

Vedoucí: Ing. Ivan Cimbolínek

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2014/2015

Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripká, CSc.  
děkan

V Praze dne 8. 12. 2014

## Anotace

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem odolnosti trub z tvárné litiny s ochranným obalem z plasticky modifikované cementové malty (OCM) proti negativním účinkům stejnosměrných bludných proudů. V teoretické části pojednává o problematice bludných proudů z obecného hlediska, popisuje zdroje bludných proudů, způsob jejich šíření s dopadem na úložná zařízení a způsoby ochrany úložných zařízení proti jejich negativním účinkům.

Praktická část se věnuje zkoumání již konkrétního typu těžké protikorozní ochrany trub z tvárné litiny - OCM - proti negativním účinkům stejnosměrného proudu v podobě korozního namáhání v průběhu jednoho roku.

## Klíčová slova

Bludný proud, potrubí z tvárné litiny, elektrochemická koroze, ochrana proti korozi, katodická ochrana, liniové stavby

## Abstract

The first part of these thesis is focused on stray currents in general aspects. There are described stray current sources, stray current spreading with negative influence on buried lines. There are also described the ways of protection against stray currents in use.

The second part of this thesis is focused on investigating influences of DC current to buried pipelines with ZMU protection during one year.

## Keywords

Stray current, ductile pipe, electrochemical corrosion, cathodic protection, buried lines

## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Ivanu Cimbolincovi, za cenné rady a připomínky při plnění cílů této práce a také za jeho ochotu a vstřícný přístup.

Rád bych zde poděkoval i panu Ing. Josefu Polákovi, CSc., panu prof. Pavlovi Novákovi a panu Ing. Petru Krejčímu za cenné odborné konzultace v průběhu vytváření této práce. Mé poděkování patří také všem, kteří mě během studia všestranně podporovali.

# Obsah

Úvod	1
0.1 Potrubní systémy z tvárné litiny	2
<b>1 Problematika stejnosměrných bludných proudů a elektrochemické koroze</b>	<b>3</b>
1.1 Přírozená zemní proudová pole	4
1.2 Umělá zemní proudová pole	6
1.2.1 Původ bludných proudů	7
1.2.2 Principy vzniku bludných proudů od elektrických drah	11
1.2.3 Vznik a šíření bludných proudů ze železničních drah elektrizovaných stejnosměrným proudem	14
1.2.4 Elektrochemická koroze kovů	20
<b>2 Vliv střídavých linek VVN a střídavé trakční soustavy na úložná zařízení</b>	<b>24</b>
2.1 Elektrostatický - kapacitní vliv	26
2.2 Galvanický vliv	28
2.3 Elektromagnetický - induktivní vliv	28
2.4 Koroze střídavými proudy na katodicky chráněných zařízeních	30
2.4.1 Faktory ovlivňující korozi střídavým proudem	33
2.5 Princip katodické protikorozní ochrany	34
2.6 Princip koroze střídavými proudy	35
2.6.1 Soli vznikající z půdních alkalických kationtů	41
2.6.2 Soli vznikající z dalších alkalických kationtů	41
<b>3 Základní způsoby ochrany úložných zařízení proti negativnímu vlivu bludných proudů</b>	<b>43</b>
3.1 Pasivní ochrana úložných zařízení	43

---

3.1.1	Ochranné povlaky a technické požadavky na izolace potrubí . . . . .	43
3.2	Vlastnosti OCM na litinových troubách . . . . .	46
3.2.1	Technické požadavky na OCM dle ČSN EN 15542:2008 . . . . .	46
3.3	Aktivní ochrana úložných zařízení . . . . .	48
3.3.1	Polarizovaná elektrická drenáž . . . . .	49
3.3.2	Aktivní drenáž . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Metodika a vyhodnocení korozní odolnosti potrubí z tvárné litiny s ochranou z cementové malty</b>	<b>50</b>
4.1	Půda jako korozní prostředí v místě pokusného pole . . . . .	51
4.1.1	Stanovení zdánlivého odporu půdy Wennerovou metodou . . . . .	52
4.2	Předpoklady chování zkoušeného zařízení, stanovení ochranných vlastností cementové malty . . . . .	56
4.2.1	Stanovení izolačního odporu trub s obalem z cementové malty . . . . .	58
4.2.2	Výsledky měření přechodového odporu obalu z cementové malty . . . . .	61
4.3	Zvolené zapojení pokusného proudového pole . . . . .	69
4.3.1	Použité měřicí přístroje a pomůcky . . . . .	69
4.3.2	Pokládka trub, měření počátečních parametrů . . . . .	70
4.4	Anodická polarizace zkoušeného zařízení . . . . .	72
4.5	Analýza úložného zařízení po roce anodického namáhání . . . . .	74
4.5.1	Prozkoumání stavu úložného zařízení . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>80</b>
	<b>Literatura</b>	<b>82</b>



# Termíny a definice

Pro použití tohoto dokumentu platí následující termíny a definice:

**berstlining** berstlining

bezvýkopová metoda obnovy starého potrubí v jeho původní trase spočívající v roztrhání starého potrubí a zatáhnutí nového potrubí

**bludný proud** ( $I_s$ ) (stray current ( $I_s$ ))

část zpětného proudu DC trakční soustavy, který alespoň v části své dráhy protéká jinými cestami než zpětným obvodem

**drenáž (elektrická drenáž)** (drainage (electrical drainage))

odvádění bludných proudů z ohrožené konstrukce ke zdroji proudu pomocí spoje

**galvanická vazba** (conductive coupling)

jev, který nastane, když se část proudu vycházející z rušící soustavy vrátí do uzemňovací soustavy přes rušenou soustavu nebo když vzroste napětí vůči referenční zemi v blízkosti ovlivňovaných objektů z důvodu poruchy rušící soustavy, výsledkem je vedení proudu

**induktivní vazba** (inductive coupling)

jev, kdy magnetické pole, které je generováno proudem procházejícím obvodem, ovlivňuje další obvod; vazba je kvantifikována vzájemnou impedancí dvou obvodů a výsledkem jsou indukovaná napětí a tím i proudy, které závisí například na vzdálenosti, délce, indukujícím proudem, uspořádání obvodu a kmitočtu

**IR spád** ( $U_{IR}$ ) (IR drop ( $U_{IR}$ ))

úbytek napětí obsažený v měřené hodnotě potenciálu, vyvolaný průtokem proudu vnějšího

zdroje (katodická ochrana, bludné proudy), ohmickým odporem mezi referentní elektrodou vloženou do korozního prostředí a kovem úložného zařízení ( $U = R \cdot I$ )

**katodická protikorozní ochrana (KPO)** (cathodic protection)

elektrochemická imunita vyvolaná vhodnou katodickou polarizací [IEC 60050-111-15-40]

**kapacitní vazba** (capacitive coupling)

jev, kdy elektrické pole, které je generováno vodičem pod napětím, ovlivňuje další vodič; vazba je kvantifikována kapacitou mezi vodiči a kapacitami mezi jednotlivými vodiči a zemí, výsledkem jsou rušivá napětí do vodivých částí nebo vodičů izolovaných od země, tato napětí závisí například na napětí ovlivňující soustavy, vzdálenosti a uspořádání obvodu

**korozí** (corrosion)

elektrochemická reakce kovu s jeho prostředím, mající za následek jeho progresivní degradaci nebo zničení

**měrná svodová vodivost**  $G'_{RE}$  (conductance per length  $G'_{RE}$ )

reciproká hodnota odporu kolejnice proti zemi na jednotku délky (S/km)

**napájecí úsek** (feeding section)

část oblasti napájené trakční napájecí stanicí, od ostatních částí elektricky oddělena a připojená přes samostatný vypínač [EN 50119:2009, 3.3.2]

**OCM**

ochranný obal z plasticky modifikované cementové malty

**otevřené kolejové lože** (open formation)

oblast ve které je temeno kolejnice nad úrovní okolního povrchu

**potenciál vypínací** ( $E_{off}$ ) (off potential ( $E_{off}$ ))

potenciál konstrukce-půda, měřený bezprostředně po vypnutí zdrojů ss. proudu způsobující polarizaci měřeného povrchu konstrukce. Pro technickou potřebu je možno hodnoty vypínacího potenciálu použít ke kontrole katodické ochrany místo přesnější hodnoty polarizačního potenciálu

**potenciál zapínací ( $E_{on}$ )** (on potential ( $E_{on}$ ))

potenciál konstrukce-půda, měřený při průtoku ochranného proudu (včetně IR spádu)

# Úvod

Dnešní život si již nedovedeme představit bez zajištění spolehlivé dodávky kvalitní pitné vody. Zvyšování životní úrovně naší společnosti je spojeno s rozvojem všech odvětví vědy a techniky. Bouřlivý rozvoj ve stavebnictví, dopravě, elektrotechnice a dalších vědních oborech v uplynulých 120 letech ke zvýšení životní úrovně významně napomohl. Bludné proudy, pocházející ze stejnosměrných a střídavých proudových soustav, mohou na kovových konstrukcích uložených v půdě nebo ve vodě, způsobit vážné poškození materiálu korozí, korozí bludným proudem. Touto korozí mohou být ohroženy zejména liniové konstrukce dlouhodobě uložené v zemi, například potrubí a kabely s kovovým pláštěm. Jelikož se poškození korozí může projevit již po krátké době působení bludného proudu, je důležité přijmout opatření k ochraně v raném stadiu a také účinek těchto opatření pravidelně kontrolovat.

Ochrana proti korozi je předmětem neustálého vývoje více jak tisíc let. Teprve až v 19. století byly známé *aktivní* a *pasivní* metody, ze kterých vychází dnešní moderní protikorozi ochrana. Ztráty způsobené přímo na oceli jejím zkorodováním jsou poměrně nízké. Různé zahraniční studie vedly k výsledkům, že se ročně ztrácí korozí 1 až 2 % vyrobené oceli. Blíže skutečnosti považujeme spodní hranici. Pro nás to znamená, že korozí ztrácíme ročně 70 *kt* oceli, jejíž cena je cca 0,8 mld Kč. Skutečné ztráty způsobené korozí jsou o 2 řády vyšší. Je-li nutno vyměnit zkorodovanou součást za novou, činí nejčastěji ztráta korozí kolem 1 až 5 % z její hodnoty, často i méně. Není proto rozhodující množství kovu přeměněného v rez, nýbrž ztráta schopnosti výrobku nebo zařízení plnit funkci, pro níž je určen. Z pohledu ochrany liniových staveb (potrubních systémů) proti korozi se v této práci zaměřuji na mechanismus elektrochemické koroze stejnosměrnými bludnými proudy. Cílem této práce je stanovit, do jaké míry je ochranný obal z cementové malty (OCM) schopný ochránit potrubí z tvárné litiny proti účinkům stejnosměrného proudu a to při extrémní anodické polarizaci v délce trvání jednoho roku.

## 0.1 Potrubní systémy z tvárné litiny

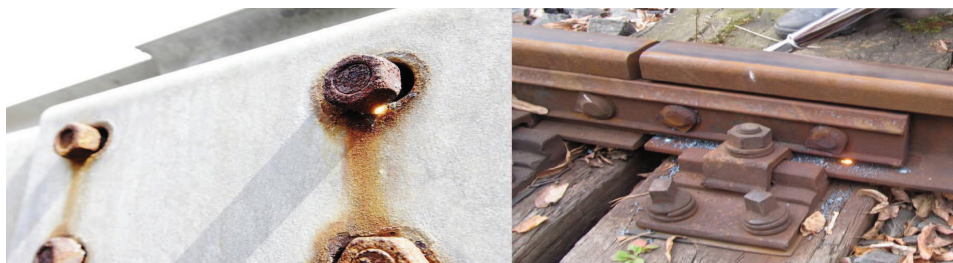
V dnešní době je trendem nahrazovat některé kovové části náchylné ke korozi částmi plastovými. Příkladem může být výstavba středotlakých místních plynovodů z polyethylenových trub. Pro výstavbu nových nebo rekonstrukci stávajících vodovodních potrubních sítí se pro svoje dobré vlastnosti, dlouhou životnost, rychlou a jednoduchou montáž, provozní tlaky do 100 barů, osvědčilo potrubí z tvárné litiny. V hustě obydlených aglomeracích a městských částech se s úspěchem aplikuje metoda bezvýkopové pokládky trub (tzv. protahováním) technologiemi *berstlining* a *relining*, jejichž rychlý vývoj nastal v 70. letech minulého století.

# 1 Problematika stejnosměrných bludných proudů a elektrochemické koroze

Pod pojmem bludné proudy se označují nepravidelné elektrické proudy, které protékají od jednoho pólu (místa) k druhému po neurčitých proudových drahách. Jedná se o relativně velké proudy při malých napětích. Tyto proudy využívají jako vodiče nejčastěji půdní elektrolyt, ve kterém mění svoji amplitudu i směr. Výskyt těchto změn je odvislý od okolností, které probíhají neřízeně, těžko se předvídájí a zpravidla závisejí na lokálních podmínkách. Bludný proud protéká vodivými cestami v zemi, do kterých se rozdělí dle poměru jejich impedancí. Tok bludných proudů se řídí Kirchhoffovými a Ohmovým zákonem.

Bludné proudy můžeme klasifikovat z několika hledisek. Dle časového průběhu proudu na **stejnosměrné** a **střídavé**. Dle původu jejich vzniku na **přirozená zemní proudová pole** vznikající zemskou činností a na **umělá proudová pole** vytvořená činností člověka. Přirozeným proudovým polím se obecně nepřisuzuje velký vliv z hlediska korozního ohrožení úložných zařízení, protože nedosahují takových proudových hustot jako je tomu u polí umělých, přesto jsem se rozhodl je v této práci uvést.

V této kapitole jsou popsány zdroje stejnosměrných a střídavých bludných proudů a rozebrán princip šíření v půdním elektrolytu s dopadem na kovové konstrukce a úložná zařízení.



Obrázek 1.1: Ukázka žhnutí svodidel a vodivého styku dvou kolejnic v důsledku protékání bludných resp. zpětně trakčních proudů

## 1.1 Přirozená zemní proudová pole

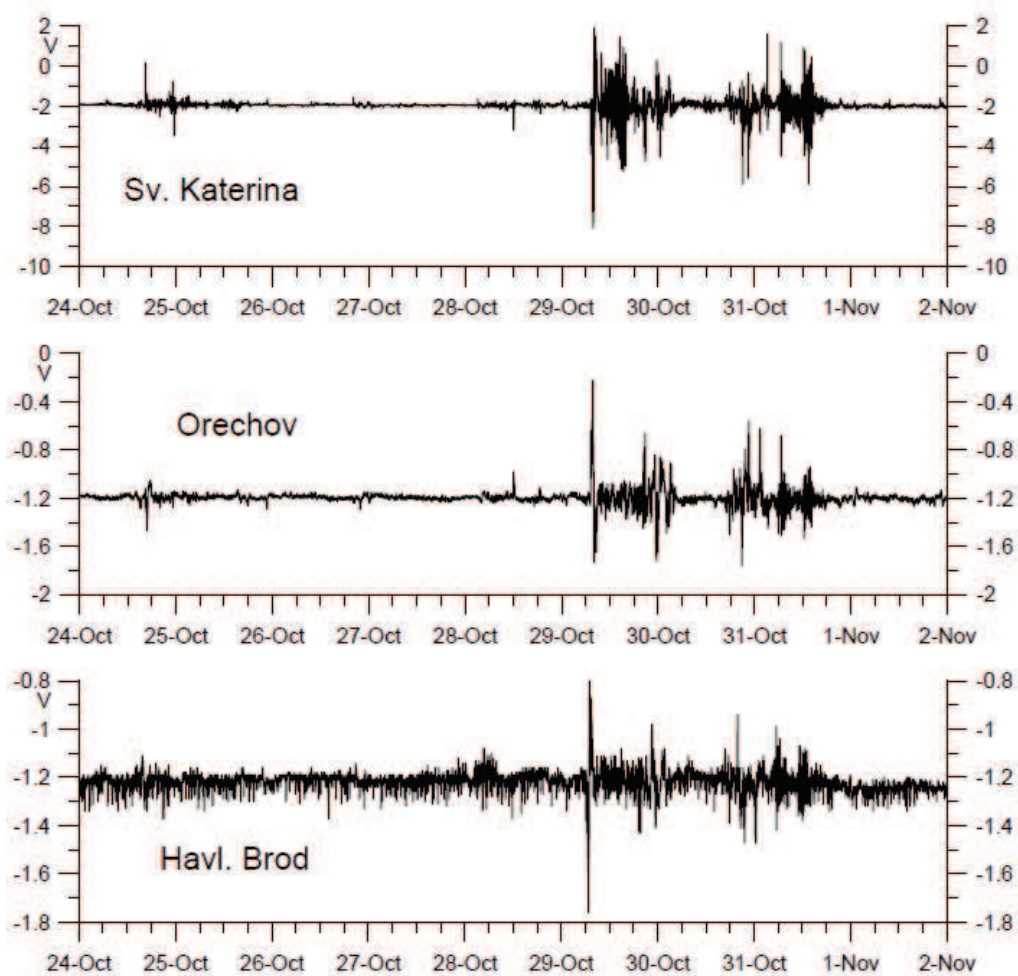
Potrubí uložená v půdě jsou vystavena aktivitě telurických proudů. Tyto proudy vznikají důsledkem skládání regionálních elektrických polí ale i vzájemným spolupůsobením magnetosféry Země a toku částic slunečního větru. Magnetosférické dynamo je schopno dissipovat dodaný výkon o hodnotě přibližně  $10^{12}$  W, přesáhne-li magnetosférou odčerpávaný výkon tuto hodnotu, dochází k extrémnímu nárůstu intenzity magnetosférických proudů, který je v oblastech výskytu polární záře doprovázen intenzivním vpádem vysokoenergetických částic do atmosféry. Poruchy geomagnetického pole nabývají globálního charakteru (mluvíme o magnetické bouři) a dosahují amplitud řádu stovek nT. Takovéto poruchy indukují (podle Faradayova zákona) v zemi napěťové rozdíly, které ve vysokých geomagnetických šířkách mohou dosahovat i desítek voltů na kilometr. Vzniklé stejnosměrné proudy ohrožují rozvody elektrické energie, potrubí dopravující ropu a plyn, telekomunikační kabely a zabezpečovací zařízení železnic [1].

V transformátorech přenosových soustav jsou příčinou nasycení jejich jader, a tím i růstu jalové složky přenášeného výkonu snižující nejen přenosovou kapacitu soustavy, ale i její napětí. Je-li od soustavy vyžadován zvýšený výkon, dochází pak v jejich jednotlivých uzlech k selháním, v limitním případě k celkovému kolapsu [1].

V ropovodech a plynovodech jsou indukované stejnosměrné proudy příčinou zrychlené koroze a tím i růstu nákladů na jejich monitorování. V České republice jsou dva významné ropovody - Družba (postaven v 60. letech, asfaltová izolace) a IKL (postaven v 90. letech, polyethylenová izolace). Oba mají systém katodické protikorozní ochrany s asi 80. monitorovacími stanicemi. Ochranné napětí je nastaveno pro Družbu na -1,2 V a pro IKL na -2 V. Na konci října v roce 2003 zasáhla Zemi geomagnetická bouře velké intenzity. Na Obrázku 1.2 můžeme vidět rozkmit napětí katodické ochrany ropovodů Družba a IKL způsobený geomagnetickou bouří [1].

V telekomunikačních kabelech jsou zdrojem napěťových rázů a výpadků činnosti. Vzhledem k délce podmořských kabelů může napětí indukované během geomagnetických bouří dosáhnout stovek až tisíců voltů. Napěťové fluktuace takovýchto amplitud byly pozorovány nejen na transatlantických/ transpacifických kabelech, ale i na kratších kabelech, jako například mezi Ruskem a Japonskem [1].

Na železnici komplikují indukované zemní proudy provoz tím, že narušují činnost signalizačních zařízení. Ve Švédsku v roce 1982 a v Norsku v roce 2000 byly zaznamenány případy, kdy se signalizační zařízení samovolně sepnula, což v Norsku bylo příčinou vážné železniční nehody, která měla za následek 19 smrtelně zraněných osob [1].



Obrázek 1.2: Napětí potrubí-zem zaznamenané na stanicích Ořechov, Sv. Kateřina a Havlíčkův Brod mezi 24. říjnem a 1. listopadem 2003, shora: IKL, Družba, Družba, převzato z [1]



## 1.2 Umělá zemní proudová pole

Umělá zemní proudová pole jsou nechtěným doprovodným jevem fungujících technických zařízení, průmyslových celků a energetických soustav. Bludné proudy, stejnosměrné (DC) i střídavé (AC), jsou způsobeny vnějšími zdroji a šíří se po nedefinovaných proudových drahách mezi elektrickými póly těchto zdrojů. Dají se popsat gradientem potenciálu, hodnotami intenzit elektrického pole  $E$  ( $mV/m$ ), proudovou hustotou  $J$  ( $A/m^2$ ) a směrem toku, jehož orientaci vztahujeme ke světovým stranám. Bludné proudy ze stejnosměrných zdrojů respektují výskyt a směr toku proudu dle polaritý zdroje, dohodnutý směr proudu (technický směr) je od + pólu k - pólu (tok elektronů je obrácený), u střídavých je směr závislý na frekvenci proudu. V praxi nebývá zdroj bludných proudů pouze jeden, obvykle spolupůsobí více různých zdrojů (myšleno nejenom polohou, ale i elektrickým typem) a způsobují tím vzájemné ovlivňování od nich vzniklých proudů, čili proudovou interferenci. Specifickým případem bludných proudů jsou tzv. *zpětné trakční* proudy vyvolané provozem elektrických drah. Průchodu bludných proudů zemí nelze zcela zabránit. Na území ČR neexistuje prakticky místo, s výjimkou odlehlých horských oblastí, na kterém by bludné proudy nebyly změřitelné. Odhaduje se, že na území Prahy o celkové rozloze  $496 km^2$  protéká měsíčně zemí bludný proud o velikosti  $1040 A$ , tedy o proudové hustotě  $2,09 \mu A/m^2$  z toho pochází 29,3 % od železniční dopravy, 69,6 % od tramvajové dopravy a 1,1 % je vliv metra. Dle desítek provedených korozních průzkumů během čtyřiceti let (rezistivita horninového prostředí, přítomnost bludných proudů), byla v Praze zjištěna intenzita elektrického pole v zemi v rozmezí  $E = 0,1$  až  $50 mV/m$ . Např. na staveništi bytových domů v Praze-Radlicích nad tunelem metra B na povrchu terénu ve vzdálenosti  $10 m$  od tunelu, byly zjištěny průměrné hodnoty  $E = 34 mV/m$  a rezistivity půdy  $\rho = 32 \Omega m$  do hl.  $5 m$ . Vydělením obou čísel dostaneme proudovou hustotu bludného proudu  $J = E/\rho = 39/32 = 1,06 mA/m^2$ . Podrobný výpočtový odhad bludných proudů v Praze je uveden v [3]. Bludné proudy dlouhodobě ohrožují nejenom kovové liniové stavby, ale také nejrůznější stavební objekty a konstrukce. Ohroženy jsou železobetonové mosty, paty stožárů VVN a veřejného osvětlení, uzemňovací soustavy (strojené zemniče), kabely s kovovými plášti, železobetonové stavby, ocelové pilíře, nádrže a lodě v přístavech. Napadené konstrukce jimiž prochází bludné proudy, např.: potrubí nebo pláště kabelů, mohou samy ovlivnit jiné blízké konstrukce tím, že se stanou „rozvaděči“ bludných proudů. Hlavním hlediskem, kterým posuzujeme míru rizika ohrožení výrobku bludnými proudy je rychlost koroze. Od výrobku požadujeme určitou dobu životnosti, po kterou má bezpečně plnit svoji funkci, pro kterou byl navržen a také, aby okolní prostředí nebylo znečištěno korozními produkty. V korozních sbornících je často udávána

horní hranice dostačující korozní odolnosti 0,1 mm za rok, což ale platí většinou jen pro plošnou korozi a použití kovů v průmyslovém zařízení se životností asi 10 až 20 let, ne už například pro podmínky dlouhodobé atmosférické expozice kovů, pro liniové stavby a pro kovové výztuže v betonu. Hranice maximální přijatelné korozní rychlosti je prakticky v intervalu tří řádů (0,1 mm za rok až 0,1  $\mu\text{m}$  za rok) [4].

### 1.2.1 Původ bludných proudů

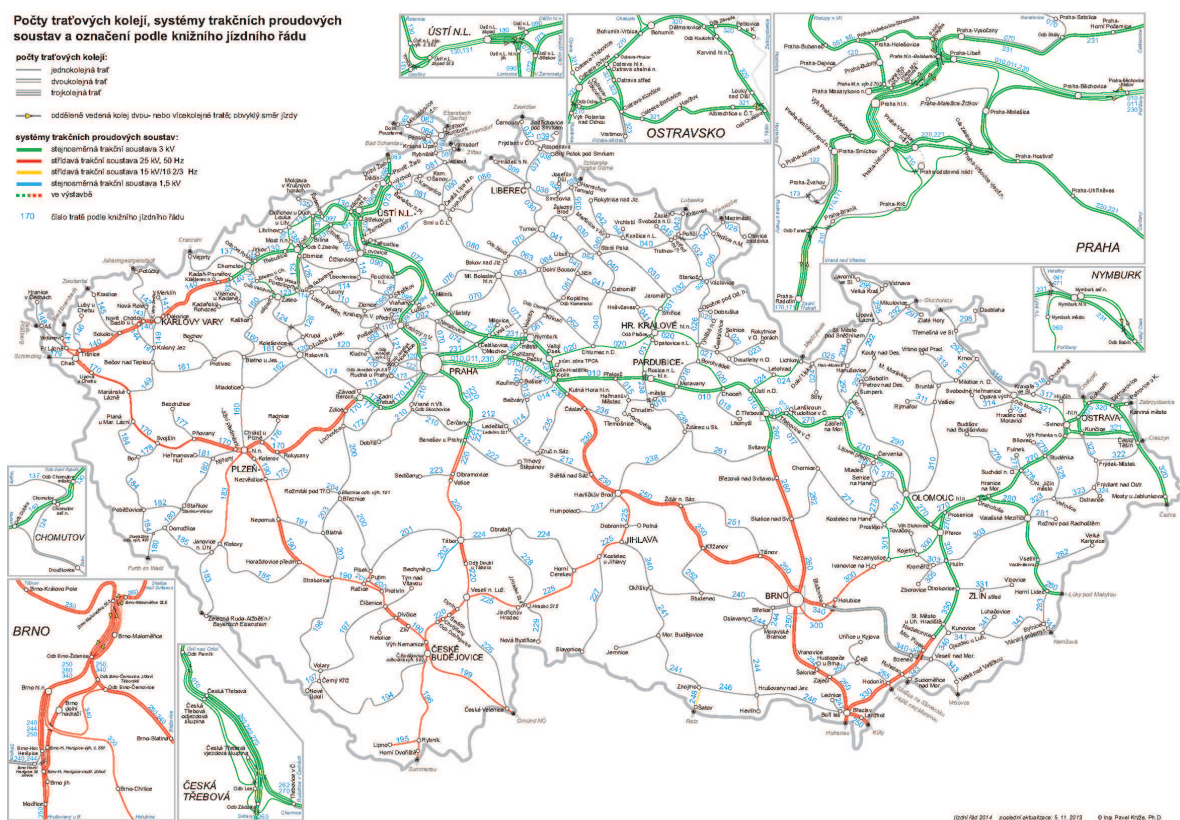
Bludné proudy jsou nepravidelné elektrické proudy procházející nejčastěji půdním elektrolytem, kterým se vracejí zčásti zpět k druhému pólu proudové soustavy. Střídavé proudové soustavy elektrických drah a přenosové soustavy vysokého napětí (VN) jsou nejvýznamnějším zdrojem střídavých bludných proudů, někdy nazývaných jako interferenčních. Stejnosměrné proudové soustavy elektrických drah jsou pak nejvýznamnějším zdrojem stejnosměrných bludných proudů. Délka železniční sítě České republiky činila k 31.12.2006 celkem 9492 km, z toho podíl elektrifikovaných tratí činil celkem 3037 km. Podle druhu napájecí soustavy bylo 1731 km elektrifikováno stejnosměrným trakčním napětím na hladinách 3 kV a 1,5 kV a 1307 km střídavým trakčním napětím 25 kV 50 Hz. Používané trakční soustavy na území ČR znázorňuje Obrázek 1.3. Zelenou barvou jsou označeny úseky elektrizované DC systémem při napětí 3 kV, červeně AC systémem při napětí 25 kV 50 Hz [5].

#### 1.2.1.1 Zdroje střídavých bludných proudů

1. Střídavě elektrifikované tratě. Jednofázový systém 25 kV 50 Hz (používá se na převážném území ČR) nebo 15 kV 16,7 Hz (využívaný v Německu, Rakousku a Švýcarsku), který využívá kolejnice jako vodiče pro zpětný trakční proud, kde je přechodový odpor mezi kolejí a zemí nižší, než předepsaný.
2. Trojfázové systémy s uzemněným nulovým vodičem. Do těchto systémů řadíme přenosové linky VN a VVN. Charakter šíření střídavých bludných proudů se liší oproti stejnosměrným. Střídavé napětí z linek VN nebo střídavé trakce indukuje v souběžných paralelních feromagnetických linkách (např. potrubí, pláště kabelů apod.) také střídavé napětí, které vyvolá v daném kovovém dílci tok proudu. Mezi další střídavé bludné proudy patří tzv. vyrovnávací proud z nesymetrického zatížení fází silových vedení, který se uzavírá zemí, pokud nulový vodič není dostatečně odisolován od země. U rozvodů venkovního osvětlení (rtuťové a sodíkové výbojky) a u obvodů ob-

sahujících spínané zdroje provozně uzemněných, mohou téct zemí vyrovnávací proudy tzv. netočivé složky střídavého proudu, která má ale také frekvenci  $50\text{ Hz}$ .

### 3. Zkratové proudy uzemněných fází silových vedení.



Obrázek 1.3: Železniční mapa DC a AC trakční soustavy na území ČR, převzato z [5]

### 1.2.1.2 Zdroje stejnosměrných bludných proudů

#### 1. Stejnosměrné elektrifikované trakční systémy:

- železnice, na území ČR na hladině napětí 3 kV,
- průmyslové dráhy, na hladině napětí 1,5 kV,
- městské dráhy (metro), na hladině napětí 750 V,
- městské dráhy (tramvaje), na hladině napětí 600 V.

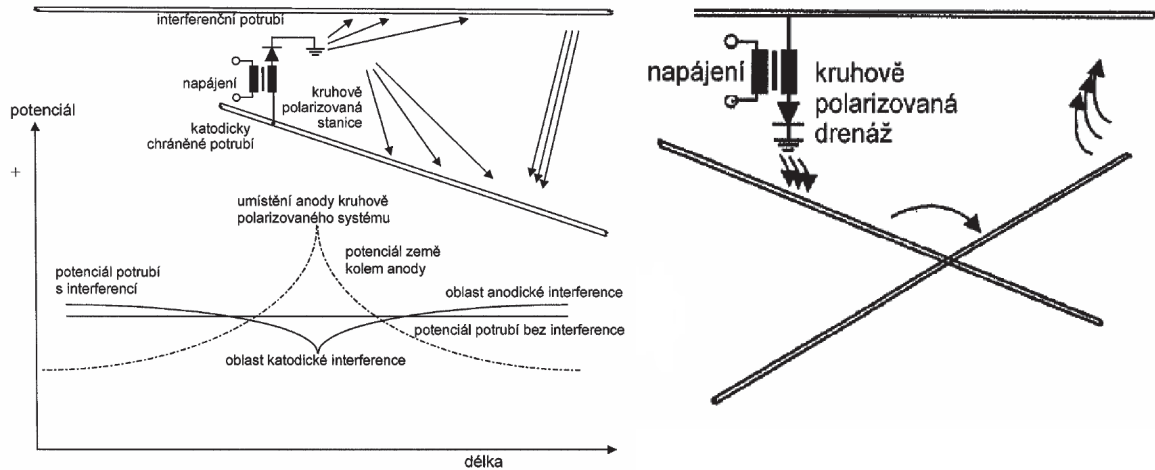
Trakční soustava musí být navrhována tak, aby minimalizovala úniky bludných proudů tekoucích do země s cílem snížit nebo vyloučit účinky na cizí konstrukce. Na nově budovaných koridorových tratích se díky šterkovému loži a používání železobetonových pražců s izolovaným upevňovacím systémem kolejnic výrazně snížil tok zpětného proudu zemí. Stejnosměrné proudové soustavy jsou převážně provozovány s kladným pólem připojeným na napájecí vedení a se záporným pólem připojeným na kolejnice. V ojedinělých případech je na napájecí vedení připojen záporný pól a na kolejnice připojen kladný pól. V České republice jsou takto provozovány tramvajové tratě v Brně či Ostravě, na Slovensku v Košicích, v Berlíně S-Bahn.

#### 2. Průmyslové podniky využívající stejnosměrné rozvody:

- loděnice,
- galvanovny,
- svařovny, avšak omezeně.

#### 3. Ze systémů katodických ochran:

Katodická ochrana je běžným způsobem protikorozní ochrany kovových konstrukcí v dostatečně vodivém a poměrně málo agresivním vodném prostředí, včetně půdního. Nejčastěji chráněnými objekty jsou potrubí (plynovody, ropovody), která jsou nejčastěji polarizována pomocí vnějších zdrojů stejnosměrného proudu prostřednictvím tzv. uzemňovacích anod. Průchod ochranného stejnosměrného proudu půdním prostředím ve směru ke chráněnému zařízení vytváří potenciálové pole a to může mít vedlejší negativní účinky ve formě zdroje bludných proudů. Obrázek 1.4 ukazuje princip interference anodických potenciálových spádů na potrubí, které není připojeno na společnou katodickou ochranu s chráněným potrubím. Potlačení interference se provádí pomocí drenáže, tedy připojením všech úložných zařízení v dané oblasti společně na aktivní ochranu. [6].



Obrázek 1.4: Příklad primární a sekundární interference ze systému katodické ochrany na potrubí nepřipojené ke společné katodické ochraně, převzato z [7]

Mezi DC soustavy s malým vlivem na úložná zařízení pak patří:

- trolejbusové soustavy,
- DC silnoproudé rozvodné soustavy,
- DC komunikační soustavy,
- DC vysokonapěťové (HVDC) přenosové soustavy,
- DC traťové zabezpečovací systémy.

Požadavky na minimalizaci vzniku bludných proudů a jejich účinků na železniční tratě stanovuje EN 50122-2:2011 ed. 2. Tato norma předepisuje elektrické parametry zpětné trakční cesty tak, aby bylo minimalizováno anodické rozpouštění kolejí a byla zajištěna bezpečnost lidí proti úrazu elektrickým proudem. V důsledku vnějších zásahů nebo vlivů může dojít k odklonění toku bludného proudu z původní trasy a to v důsledku:

- změny počtu zdrojů,
- změny polohové souřadnice spotřebičů elektrického výkonu (např. pohyb kolejových vozidel: tramvají, el. vlaků),
- práce třetích stran (oprava koridorů, zemní práce),
- nesprávně nastavené systémy katodické ochrany.

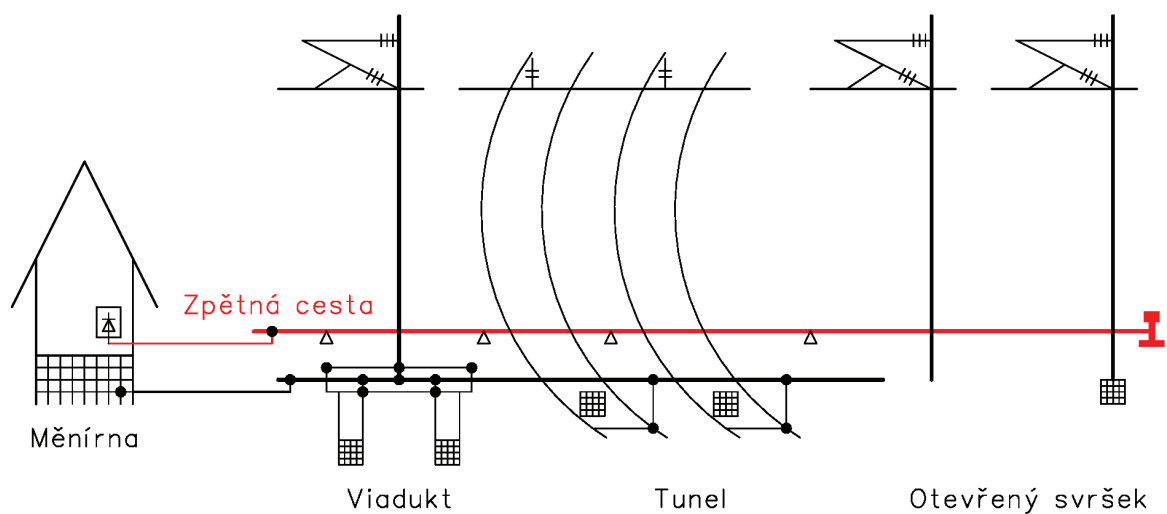
### 1.2.2 Principy vzniku bludných proudů od elektrických drah

Stejnoseměrné (DC) i střídavé (AC) proudové drážní napájecí soustavy využívají vrchní vedení pro přívod trolejového proudu ke spotřebiči na trati a zpětnou trakční cestu pro odvod zpětného trakčního proudu zpět k měničnické resp. napájecí stanici a proudu traťových zabezpečovacích zařízení. Tu tvoří nejčastěji kolejnice, zpětné vodiče nebo kabely položené paralelně ke kolejnicím a nebo v případě AC drah i zemnicí lana. Z elektrotechnického pohledu tvoří trolejové vedení a zpětná trakční cesta nedělitelnou dvojici. Použití kolejnic jako zpětné trakční cesty je společná vlastnost pro DC i AC dráhy. Způsoby uzemňování a topologie sítě se však fundamentálně liší. Stejnoseměrné tratě jsou stavěny s důrazem na vysoký odpor mezi kolejnicemi a zemí, tím se brání, aby zpětné proudy opustily kolejnice, protékaly jako bludné proudy zemí a způsobovaly elektrochemickou korozi úložných zařízení, které jsou v kontaktu se zemí. Oproti tomu u AC drah tvoří země část zpětné trakční cesty. Striktní oddělení kolejnic od země pro tratě elektrizované stejnosměrným proudem je naznačeno na Obrázku 1.5. Zpětné kolejnicové vedení vykazuje vlastní *podélnou impedanci* a *příčnou impedanci* proti zemi. Podélná impedance se skládá z podélného činného odporu, podélné reaktance a ovlivňuje ji i skinefekt. U DC tratí se reaktance a skinefekt neuplatní. Podélný odpor běžné kolejnice vzoru S49 je přibližně  $35,7 \text{ m}\Omega/\text{km}$ . Velikost podélné impedance požadujeme, aby byla co nejmenší, proto se používají kolejnice většího průřezu doplněné o podélné kolejnicové spojky na stykované kolejnici. Velikost příčného odporu je požadována na co nejvyšší hodnotě. Proto jsou kolejnice kladeny na pražce, které jsou izolovány od země. Podélný odpor způsobuje vlivem protékajícího provozního, případně poruchového zkratového proudu podélný ohmický úbytek napětí v kolejiích, který lze naměřit mezi kolejnicemi a zemí. Pokud by kolejnice byly dokonale odizolované od země, tak na dlouhých napájecích úsecích s vysokými proudy mohou být překročeny mezní hodnoty pro dotyková napětí, která jsou normou EN 50122-2 ed.2:2011 stanovena pro člověka jako bezpečná. Toto nebezpečí hrozí převážně na otevřených kolejových svrších proti zemi, v tunelech, na viaduktech a nádražích. Příslušná opatření pro uspořádání zpětné trakční cesty pro elektrické dráhy popisuje norma EN 50122-2 ed.2:2011 v odstavci 6.5. Dodatečně k ohmickému úbytku napětí u DC drah způsobují AC dráhy ještě induktivní úbytek, který může dosahovat téměř stejně vysokých hodnot jako ohmický při frekvenci  $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$  a okolo dvojnásobku této hodnoty při  $50/60 \text{ Hz}$ . Toto vede společně s dlouhými napájecími úseky k vyšším potenciálům kolejí proti zemi, než u DC drah a to i přesto, že trakční proud u AC drah odebíraný při stejném výkonu vlaku je pětikrát resp. osmkrát menší než u DC proudové soustavy. Normy ČSN EN 50122-1 ed.2:2011 a EN 50122-3:2011 uvádí hodnoty



pro dovolená dotyková napětí (vyjma dílen a obdobných lokalit) pro krátkodobé ( $t \leq 0,7s$ ) a dlouhodobé ( $t \geq 0,7s$ ) podmínky. Maximální dovolené dotykové napětí pro čas  $1,0 s$  stanovuje ČSN EN 50122-3:2011 hodnotu napětí kolejnice proti zemi pro střídavé tratě  $75 V$  a pro stejnosměrné tratě  $160 V$ . Proto se tratě opatřují elektronickými zařízeními (RPCD - Rail Potential Control Devices), která snižují vysoký potenciál kolejí proti zemi tím, že na určitý čas, úsek kolejí účinně uzemní a tím svedou část zpětného proudu do země. U nás je nejpoužívanější varianta ochrany, ukolejněním skrze průrazky s opakovatelnou funkcí, které jsou nastaveny na zápalné napětí  $250 V$  v místech přístupných veřejnosti nebo u podpěr nesoucí trakční odpojovač na  $500 V$  na všech ostatních místech. Je zřejmé, že tímto řešením není zajištěno maximální dotykové napětí  $75 V$ , které předepisuje norma ČSN EN 50122-1 ed.2:2011.

Trakční obvod tedy sestává ze zdroje trolejového proudu, ze spotřebičů a ze dvou částí trakčního obvodu pro tok proudu. První částí je trolejové vedení, které je připojeno zpravidla na kladný pól nebo zřídka na záporný pól zdroje proudu. Druhou částí trakčního obvodu je tzv. zpětný obvod, který tvoří cestu pro zpětný trakční proud skládající se převážně z kolejnicových pásů jednotlivých kolejí. U tratí malého rozsahu (např. tramvajových) mohou být pro zlepšení vedení zpětného proudu a pro omezení úniku proudů položeny paralelní vodiče, zpětné kabely a koleje tratě jsou vzájemně příčně propojeny. U takto správně navržených tramvajových tratí, např. v Praze, je proud odváděn do měrnírný zpětnými kabely, které jsou připojeny ve stejných místech, kde je připojeno napájení

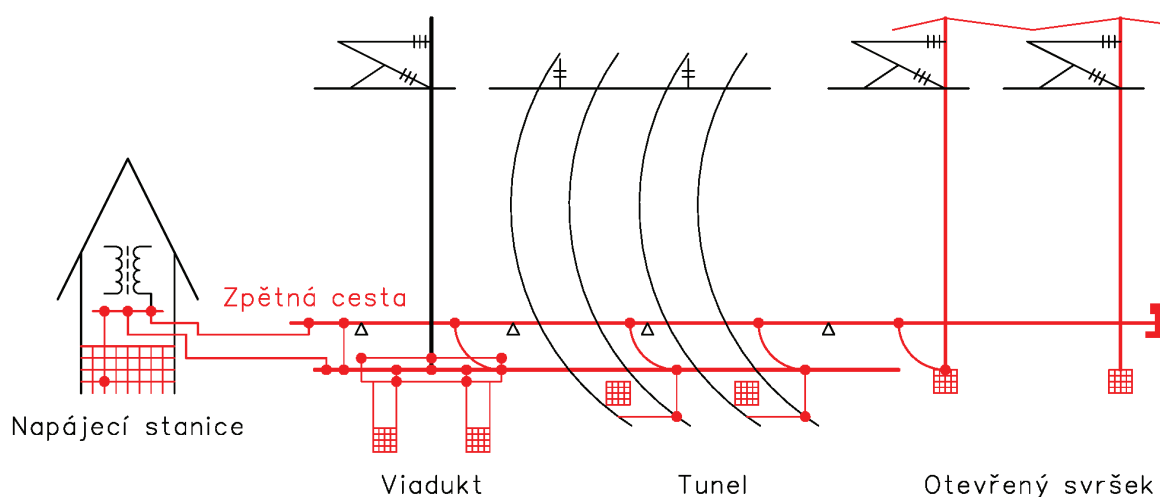


Obrázek 1.5: Zjednodušené schéma zpětné trakční cesty a uzemnění DC tratí

troleje. Zpětné kabely mají různé délky, proto jsou na ně případně zapojovány do obvodu odporníky, které zajišťují, aby odpor na všech zpětných kabelech byl zhruba stejný, což přispívá k homogenizaci soustavy a minimalizaci vzniku bludných proudů.

Za normálního provozu protéká trakční proud od spotřebiče kolejnicemi zpět do napájecí stanice (měnárny). V případě svodu mezi kolejnicemi a zemí nebo při úplném elektrickém přerušení kolejnic dojde k prostupu proudu do půdy, kterou se dále vrací k zápornějšímu potenciálu tohoto elektrického uspořádání. Cestou využívají všech vodivějších částí v půdě, než je půdní elektrolyt sám o sobě. Vzhledem ke značným délkám napájecích úseků stejnosměrné železnice (např. 20 km), nemusí tyto proudy protékat bezprostředně v její blízkosti, ale mohou proniknout i do odlehlých míst prostřednictvím liniových staveb, kovovými plášti kabelů, zemnicími lany stožárů VVN nebo uzemňovacími soustavami.

Nejběžnějším vodičem bludných proudů je vodivý půdní elektrolyt, což je vodič druhého řádu, ve kterém je elektrická vodivost způsobena pohybem iontů v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami - katodou a anodou. Vodivost půdy nejvíce určuje půdní vlhkost a množství rozpuštěných iontů. Nejenom v městských aglomeracích doplňují půdní elektrolyt ve vedení proudu liniové ocelové a železobetonové konstrukce, vzájemně propojené uzemňovací soustavy (trafostanic, bytových a dalších objektů, výměňkových stanic, uzemnění stožárů VO) vodní toky a podzemní vodní žíly. To, jestli bludný proud vstoupí nebo nevstoupí do vodivé konstrukce se řídí Ohmovým zákonem. Tunely vyložené z litinových tybinků, vzájemně vodivě propojených, nad které byl napumpován beton (systém



Obrázek 1.6: Zjednodušené schéma zpětné trakční cesty a uzemnění AC tratí



tunelů pražského metra), tvoří nejkvalitnější a nejrozsáhlejší zemnicí soustavu se zemním odporem v řádech setin až tisícín ohmu. Betonový základ se v praxi používá jako dobrý přechod mezi uzemňovací soustavou staveb (např. stožárů VVN) a zemí. Od takového betonu očekáváme, aby splňoval požadavky na dobrou protikorozní ochranu ocelové výztuže a zároveň, aby hodnota rezistivity takové konstrukce byla přibližně rovna rezistivitě běžné zeminy -  $100 \Omega\text{m}$ . Tyto dva požadavky jsou v rozporu. U betonu z portlandského cementu (při pevnosti v tlaku v rozsahu 14 až 42 MPa) je u suchého betonu pórovitost v rozmezí 10 až 25 %. Suchý beton je prakticky izolant ( $\rho = 2000 \Omega\text{m}$ ). Naproti tomu u podkladního betonu B15, který je v kontaktu s vlhkým horninovým prostředím je  $\rho = 50 \Omega\text{m}$ . Kvalitativní požadavek, který předurčuje takovýto beton jako prostředek pro vhodné elektrické propojení zemnice s okolní zemí je vhodná volba jeho pevnosti v tlaku. Pro ocelové zemnice v betonovém obložení lze za použitelný pro účel protikorozní ochrany oceli (výztuže) považovat beton o pevnosti v tlaku min. 20 MPa, tj. B20 [2].

### 1.2.3 Vznik a šíření bludných proudů ze železničních drah elektrizovaných stejnosměrným proudem

Zpětnou trakční cestu lze popsat měřitelnými elektrickými parametry: podélnou vodivostí kolejnicových pásů, elektrickými parametry stykových transformátorů a přípojných lan, vzdáleností napájecích stanic, svodovou vodivostí kolej - zem.

#### 1.2.3.1 Způsoby napájení DC trakční soustavy

Trakční soustava je z důvodu snížení trolejových proudů a případnou lokalizaci poruch rozdělena na jednotlivé sekce, které jsou napájeny odděleně, úsekovými děliči s překlenu-telnými odpínači a jištěna proti přepětí bleskojistkami. Podle způsobu napájení trakčního vedení (dále jen TV) dílčích sekcí se napájení dělí na:

##### Jednostranné napájení

Společná napájecí stanice napájí jednotlivé oddělené úseky vždy z jedné strany. U dvojkolejných tratí se trakční vedení příčně propojují. Jednostranné napájení se používá pro rozlehlá kolejiště uzlových stanic a pro tratě městské hromadné dopravy. Výhodou je přehlednost sítě, jednoduchost lokalizace poruch a dobré využití průřezu trakčního vedení. Nevýhodou jsou krátké délky napájecích úseků.

##### Dvoustranné napájení

Přilehlé napájecí stanice napájejí sousední úseky z obou konců, což umožňuje prodloužit jejich délku vzhledem k dovolenému úbytku napětí vlivem podélného odporu trakčního vedení. U dvoukolejných tratí jsou trakční vedení sudé a liché koleje napájena odděleně. Tím je umožněna snazší lokalizace poruch a výluková činnost.

### Čtyřstranné napájení s příčnými spojkami nebo spínací stanicí

Napájecí úseky jsou napájeny z obou konců a trakční vedení každé koleje zvlášť. V nejvíce zatížených úsecích jsou trakční vedení obou kolejí propojena pomocí příčných spínačů. Dojde-li k poruše na tratovém vedení (např. ke zkratu), pak se příčné spínače automaticky rozpojují. Spínací stanice umožňuje napájecí úsek v případě poruchy podélně a příčně rozdělit.

Zpětné proudy se v případě jednostranného napájení vracejí ke zdroji jen jednou cestou, proto je u tohoto způsobu napájení riziko úniku proudů z kolejnic do země největší. U zbylých způsobů napájení DC trakce, ve kterých se zpětný proud vrací zpět k měničce dvěma cestami se vodivý průřez kolejí zdvojnásobuje. Nejvýhodnější je čtyřstranné napájení, ve kterém mohou být propojeny sousední koleje. Pro příklad dle Obrázku 1.7 lze úbytek napětí, který vzniká v kolejnici určité délky, vyjádřit následujícím výrazem:

$$dU_k(x) = -I_k(x) \cdot R_k \cdot dx \quad (1.1)$$

$dU_k(x)$  úbytek napětí, který vzniká v kolejnici o délkovém elementu  $dx$ ,  
 $I_k(x)$  proud procházející kolejnicemi v místě vzdáleném od měničny o délce  $(x)$ ,  
 $R_k$  [ $\Omega/km$ ] činný odpor na jednotku délky.

Proud  $I_k(x)$ , který protéká kolejemi zpět k měničce je roven rozdílu trakčnímu proudu na výstupu z měničny vztaženého na délku napájecího úseku a proudu, který teče zemí dle vztahu:

$$dI_k(x) = \frac{I_{trc}}{l}(dx) - U_k(x) \cdot G'_{RE}(dx) \quad (1.2)$$

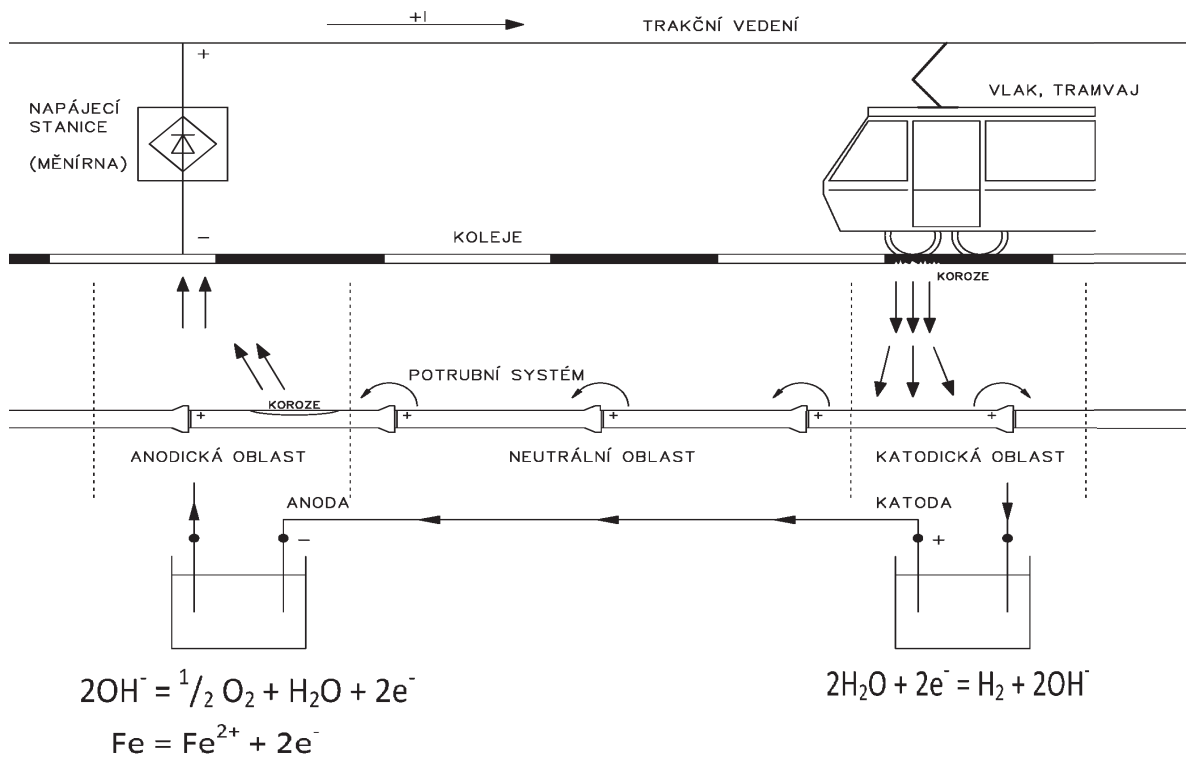
$dU_k(x)$  úbytek napětí podél kolejnic,  
 $l$  [ $m$ ] délka uvažovaného úseku  
 $I_{trc}$  [ $A$ ] trakční proud,



$$I_z(x) = I_{trc} \left( 1 - \frac{\cosh[\alpha(L/2 - x)]}{\cosh(\alpha L/2)} \right) \quad (1.5)$$

a potenciál koleje - země:

$$U_{RE}(x) = \frac{I_{trc} \cdot \alpha}{G'_{RE}} \cdot \frac{\sinh[\alpha(L/2 - x)]}{\cosh(\alpha L/2)} \quad (1.6)$$



Obrázek 1.8: Schematické znázornění šíření bludných proudů a vznik anodových a katodových míst pomocí galvanických článků

Norma ČSN EN 50122-2 ed. 2 doporučuje kritéria pro ochranu tratí odvozená z měrné svodové vodivosti  $G'_{RE}$  a potenciálu koleje  $U_{RE}$ . Ze zkušenosti je prokázáno, že tam, kde nedošlo k žádnému poškození tratě po dobu 25 let, potom průměrný bludný proud na jednotku délky jednokolejné tratě nepřesahuje  $I'_{max} = 2,5 \text{ mA/m}$ . Uvedená hodnota platí pro 2 kolej-

nice jedné koleje. Pro dvoukolejnou trať má být hodnota pro maximální průměrný bludný proud dvojnásobná. Pro více jak dvě koleje se podle toho tato hodnota odpovídajícím způsobem zvyšuje. Pro zprůměrování průběhu se použijí jen kladné hodnoty bludného proudu za dobu 24 h nebo násobky této doby. Během životnosti trakční soustavy by neměly být v ideálním případě překročeny následující hodnoty pro měrnou svodovou vodivost  $G'_{RE}$  a průměrný potenciál koleje  $U_{RE}$ :

- $G'_{RE} \leq 0,5 \text{ S/km}$  tratě a  $U_{RE} \leq +5V$  – pro otevřené kolejové lože,
- $G'_{RE} \leq 2,5 \text{ S/km}$  tratě a  $U_{RE} \leq +1V$  – pro zapuštěné kolejové lože.

Měrná svodová vodivost je reálná složka z komplexní veličiny svodové admitance, proto se její měření provádí v souladu s ČSN EN 50122-2 ed. 2, stejnosměrnými zdroji proudu, postačí olověný akumulátor, při ustáleném stavu bez cizích rušivých vlivů. K vyloučení polarizačních efektů má být měřicí proud cyklicky zapínán, vypínán a přepólován. Měřený úsek by měl být odpojen (isolován) od zbytku trati a neměl by být delší než 2 km. Hodnoty měrné svodové vodivosti získané měřením za použití jiných zdrojů, než stejnosměrných, jsou proto ke zjišťování možnosti úniků stejnosměrných bludných proudů nepoužitelné [6]. Konkrétní hodnoty převzaté od DPP na nedávno rekonstruovaných tramvajových tratích v Praze (RTT) uvedené v Tabulce 1.1 splňují kritéria ČSN EN 50122-2 ed. 2 na měrnou svodovou admitanci (měření bylo provedeno nesprávnou metodou), nikoliv na měrnou svodovou vodivost. Extrémně nízká hodnota v případě Trojského mostu je dosažena systémem uchycení kolejnic na betonové desce. Požadovaných hodnot měrné svodové vodivosti  $G'_{RE}$

Název RTT	Délka úseku $m$	Hodnota $G'_{RE} \text{ S/km}$
Švehlova - Průběžná, otevřené kolejové lože	2 660	0,317
Švehlova - Průběžná, uzavřený svršek	634	1,85
Partyzánská - Trojská, uzavřený svršek	500	0,74
Trojský most, otevřené kolejové lože	163	0,03

Tabulka 1.1: Konkrétní hodnoty měrné svodové vodivosti na vybraných RTT v Praze, převzato s revizní zprávou fa. Elektroline a.s.

pro koleje lze dosáhnout opatřeními, mezi které patří: čisté šterkové lože, dřevěné nebo železobetonové pražce s izolovaným upevňovacím systémem kolejnic, vzdálenost mezi jízdnicí a kolejnicí a šterkovým ložem, zajištění izolačních mezivrstev mezi kolejnicí a nosnými systémy a účinné odvodnění [7, 8].

### 1.2.3.2 Vliv polarity trakčního vedení na rozmístění anodové a katodové oblasti

Trakční vedení lze připojit ke kladnému nebo zápornému pólu napájecí stanice stejnosměrného proudu. Následně se změní směr protékajícího proudu a rozmístění anodických a katodických oblastí.

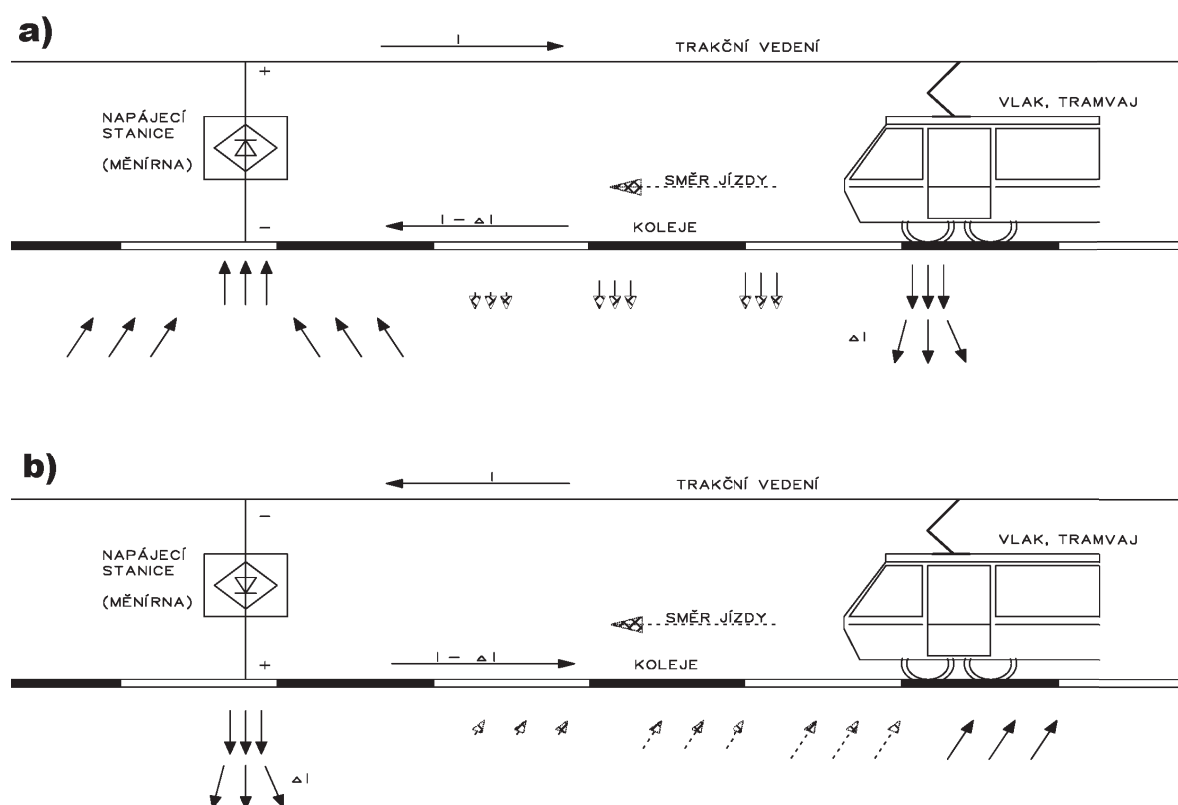
V současné době se, rekonstrukcemi tratí a dodržováním standardů ve smyslu normativy ČSN EN 50122-1 ed.2:2011 s postupným snižováním svodové vodivosti  $G'_{RE}$ , úspěšně daří omezovat úniky proudů do země.

V zapojení s připojeným kladným pólem na troleji se pohybuje (z pohledu úložného zařízení) katodická oblast souhlasně s aktuální polohou trakčního vozidla a bludný proud protéká zpět k měničnici, v jejíž blízkosti se soustřeďuje na konkrétních místech, ve kterých tvoří anodické oblasti. Krom tohoto se anodické a katodické oblasti tvoří i v závislosti na lokálních půdních podmínkách a současně v místech se zvýšenou svodovou vodivostí  $G'_{RE}$ .

V zapojení s připojeným záporným pólem na troleji je situace, z hlediska výskytu korozních oblastí, opačná, byť s několika rozdíly. Bludné proudy se pohybují současně s polohou trakčního odběru, anodické oblasti se rozloží, z „malé“ oblasti kolem měničnice, na větší plochu a tím bludný proud napadá podzemní konstrukce v rámci celého města rovnoměrně s mnohem menšími intenzitami, avšak z pohledu množství prošlého náboje zcela rovnocenně se zapojením popsaným výše. Nelze proto tento systém pokládat za opatření nebo jako ochranu proti působení bludných proudů.

Tento systém naopak skýtá možné skryté problémy. V zapojení se zápornou polaritou v kolejích se potenciál kolejí blíží potenciálu země, který považujeme za referenční nulu. Snižování svodové vodivosti  $G'_{RE}$  vede k tomu, že narůstá potenciál kolejí proti zemi přímo v závislosti na úbytku napětí ve zpětné trakční cestě. Hodnoty tohoto úbytku napětí se pohybují v jednotkách až desítkách voltů a způsobí tak určitý tok bludného proudu, který následně protéká zemí. Ačkoliv je napětí + 600 V, v zapojení s kladnou polaritou v kolejích, mezi kolejemi a trolejí, musí být zajištěno velmi dobré odisolování napájecích kabelů od země. Dojde-li (např. v důsledku prací třetích stran) k porušení izolace napájecích přívodních kabelů, vyvolá napětí + 600 V tok proudu zemí mezi defektem v napájecím kabelu a kolejnicí dle Ohmova zákona a odběrů trakčních vozidel na traťovém úseku. Takový proud není zanedbatelný a může dosahovat hodnot i desítek ampér. Tato porucha připomíná sériový oblouk (při zapojení plus v troleji nemůže vzniknout). Elektrické ochrany v napájecí stanici toto nemohou vyhodnotit jako poruchu, protože reagují pouze na zkrat kovového charakteru. Nebezpečí spočívá v možném poškození liniových zařízení (např. plynovodů)

vysokými proudovými hustotami a následné havárii se zraněním osob.



Obrázek 1.9: Schematické zapojení trakčního napájení a rozmístění katodických a anodických oblastí, a) s kladným pólem na troleji, b) se záporným pólem na troleji

#### 1.2.4 Elektrochemická koroze kovů

Elektrochemie se zabývá chováním iontů v roztoku a na fázovém rozhraní kovu s elektrolytem. Elektrochemický korozní proces je způsoben působením korozních galvanických článků. Tyto články se aktivují vlivem nesterodností kovu nebo nesterodností prostředí, ve kterém je kov uložen. Část kovu, na které nastává rozpouštění kovu do elektrolytu, se nazývá *anoda* a část, na které dochází k neutralizaci přebytečných elektronů, *katoda*. Korozní galvanické články se dají rozdělit dle velikosti na *mikročlánky*, u kterých nelze rozlišit anodu od katody, a *makročlánky*, u kterých se napadení kovu soustřeďuje do anodových míst, které bývají od katodové oblasti značně vzdálené. K tomu, aby mezi elektrodou a elektrolytem procházel vnější proud jsou nutné alespoň dvě elektrody, které tvoří elektro-

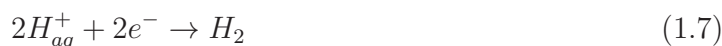
chemický článek. Pokud proud mezi elektrodami prochází v důsledku připojení elektrod na póly zdroje stejnosměrného proudu, jedná se o vynucený děj a ten probíhá v elektrolytickém článku, elektrolyzáru. Koroze bludnými proudy má charakter elektrochemické koroze. Elektrodou může být každá pevná nebo kapalná fáze, která je alespoň částečně elektronově vodivá. Elektrolytem může být každá kapalná nebo pevná fáze, která je iontově vodivá. Na přenosu náboje v elektrolytu se podílí jak anionty (-), tak kationty (+) a při průchodu proudu elektrolytem dochází ke změnám jeho složení jak u elektrod, tak v objemu [4, 9].

Ponořený kov do vodného elektrolytu se stává elektrodou, jejíž potenciál (elektroodový potenciál)  $E$  (V) je měřitelná veličina proti srovnávací (referenční) elektrodě. Standardní rovnovážné potenciály ( $E_r^0$ ) elektrochemických reakcí jsou tabelovány proti tzv. vodíkové elektrodě, pro kterou byla hodnota jejího rovnovážného potenciálu smluvně prohlášena za nulovou při všech teplotách [4, 9]. Rovnovážný potenciál  $E_r$  v soustavě elektroda - elektrolyt je takový, při kterém probíhají reakce na elektrodách oběma směry stejnou rychlostí.

Představme si soustavu *elektroda* (kovové zařízení) - *elektrolyt* (půda), tedy elektrolyzáru. Vlivem vnějších zdrojů stejnosměrných proudů dochází k průchodu proudu skrze tuto soustavu. Na úložných zařízeních ohrožených bludnými proudy se nacházejí dvě důležité oblasti:

#### 1.2.4.1 Katodická oblast

Katodická oblast je místo, ve kterém dochází ke vstupu elektrického proudu z půdního prostředí nebo elektrolytu do kovového zařízení. V souvislosti s touto oblastí můžeme mluvit o tzv. katodických bludných proudech. Z chemického hlediska dochází na fázovém rozhraní v blízkosti ocelového povrchu (v místě vady povlaku) ke dvěma reakcím. Ve vodných elektrolytech jsou nejběžnější reakce *redukce kyslíku* a *vyučování vodíku*. Vyučování vodíku lze popsat dvěma rovnicemi pro dvě různé reakce. První (1.1) se uplatňuje především v kyselém prostředí, kde je dostatek vodíkových iontů. Druhá (1.2) se uplatňuje hlavně v neutrálním a alkalickém prostředí, kde je již přítomno velmi málo vodíkových iontů. Rychlost jejich redukce snadno přechází v transportní řízení (malé limitní proudové hustoty) a hlavním zdrojem vodíku je přímý rozklad vody [4]:





Druhá reakce se uplatňuje při zápornějších potenciálech než první reakce. Rychlost vylučování vodíku také značně závisí na materiálu elektrody [9]. V místě vady povlaku ocelového úložného zařízení dochází k intenzivnímu vývoji vodíku na povrchu oceli, což z dlouhodobého hlediska není příznivé pro její mechanické vlastnosti a současně s tím dochází k poškozování izolace úložného zařízení, při kterém může dojít k tzv. *disbondingu*, tedy ke ztrátě přilnavosti izolace ke kovovému povrchu potrubí. Změny složení elektrolytu v místě vstupu bludných proudů jsou ještě výraznější než při působení samotné katodické ochrany.

#### 1.2.4.2 Anodická oblast

Anodická oblast je místo, ve kterém vystupuje elektrický proud z kovového zařízení do okolního půdního prostředí nebo elektrolytu. Nebezpečí koroze je v této oblasti tam, kde bludné proudy opouští neizolované nebo nedostatečně korozně chráněné vodivé úložné zařízení. Anodové a katodové procesy probíhají v místech (prostředích) od sebe obvykle značně vzdálených. Rychlost přecházení kovových iontů v anodické oblasti do elektrolytu (půdy), neboli rychlost průběhu elektrochemické koroze, je přímo závislá na protékaném proudu a době protékaného proudu, který prošel místem mezi kovovým zařízením a elektrolytem (je tedy přímo závislá na prošlém elektrickém náboji).

Na anodě je kov spotřebováván. Anodická reakce je oxidace, která tvoří rozpuštěné ionty a dochází při ní k uvolňování elektronů. Oxidace je obecně reakce, při které dochází k uvolnění elektronu. Rychlost elektrochemické reakce, to je reakce, která probíhá na elektrodě a při níž dochází ke změně oxidačního stupně složky reakce, je možno vyjádřit elektrickým proudem. Látková bilance elektrochemické přeměny je ve vztahu k prošlému náboji podle spojených Faradayových zákonů elektrolýzy: Hmotnost látky spotřebované nebo vzniklé v soustavě je úměrná prošlému náboji a hmotnosti těchto látek jsou při průchodu proudu stejného náboje v poměru chemických ekvivalentů [4].

$$m = A \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (1.9)$$

$$\frac{m}{\tau} = \frac{M \cdot I}{z_i \cdot F} \quad (1.10)$$

$m$  [kg] hmotnost,

$\tau$  [s] čas působení elektrického proudu, zlomek  $\frac{m}{\tau}$  je rychlost reakce,

$M$  [kg · mol<sup>-1</sup>] molární hmotnost prvku,

$I$  [A] procházející proud,

$z_i$  [-] počet elementárních nábojů iontu (kationtu K nebo aniontu A) elektrolyzované soli,

$F$  [C · mol<sup>-1</sup>] Faradayův náboj,

$A = \frac{M}{F \cdot z_i}$  [kg · C<sup>-1</sup>] elektrochemický ekvivalent,

Pro názornost uvádím výpočet úbytku oceli (platí také pro litinu) a zinku způsobené elektrochemickou korozí při protékání stejnosměrného proudu 1 A po dobu jednoho roku. Pro vylučování  $Fe^{2+}$  ( $z_k = 2$ ) platí:

$$m_{Fe} = \frac{M_{Fe} \cdot I \cdot \tau}{z_k \cdot F} = \frac{55,84 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365}{2 \cdot 96485,34} = 9126g \quad (1.11)$$

Pro vylučování  $Zn^{2+}$  ( $z_k = 2$ ) platí:

$$m_{Zn} = \frac{M_{Zn} \cdot I \cdot \tau}{z_k \cdot F} = \frac{65,38 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365}{2 \cdot 96485,34} = 10684g \quad (1.12)$$

## 2 Vliv střídavých linek VVN a střídavé trakční soustavy na úložná zařízení

Bez negativního vlivu na podzemní úložná zařízení nezůstávají však ani tratě elektrifikované střídavým trakčním systémem a ani linky vedení VN a VVN.

Problematika koroze stejnosměrnými bludnými proudy je známá déle než sto let. Za tu dobu se podařilo podrobně popsat příčiny vzniku bludných proudů, měřicí přístroje a způsoby měření a také doprovodné chemické reakce a druhy vzniklé koroze. Oproti tomu problematice střídavých bludných proudů a vlivům střídavých proudových soustav nebylo věnováno zdaleka tolik pozornosti. Bylo to dáno tím, že na korozi střídavými proudy je nutno pohlížet zcela jinak a používat jiné měřicí přístroje a metody. Ke změně došlo v osmdesátých letech, ve kterých došlo k více poruchám dálkových plynovodů, katodicky chráněných, v blízkosti linek vysokého napětí. Procesy působení střídavé koroze na úložná zařízení nejsou ještě zcela objasněny, proto se pokusím popsat současný stav technického poznání.

Střídavý proud vytváří kolem protékaného vodiče vektor elektrického a magnetického pole. Časová změna těchto polí způsobuje indukci napětí v kovových částech, podobně jako u transformátoru, zde bez magnetického obvodu. Takto vzniklá napětí mohou způsobit, za určitých podmínek, nebezpečí úrazu elektrickým proudem pro obsluhující personál liniové stavby nebo narušení bezvadné funkce katodické ochrany. V rámci výstavby energetické infrastruktury se budují tranzitní koridory, ve kterých vedou společně trasy linek VVN a ZVN nebo trasy střídavého trakčního napájení,  $15\text{ kV } 16\frac{2}{3}\text{ Hz}$  nebo  $25\text{ kV } 50\text{ Hz}$ , s trasami úložných zařízení - vodovodů a dálkových plynovodů. Často zde dochází ke křížení, přibližování a často i ke kilometry dlouhému souběhu. Z hlediska pohledu na protikorozní ochranu a bezpečnou obsluhu liniových staveb dochází v takových případech k mnoha nežádoucím vlivům.

Dle způsobu vzájemné vazby mezi vrchním vedením vysokého napětí a úložným zaříze-

ním (např. litinovým potrubím) se může objevit vliv *kapacitní*, *galvanický* nebo *induktivní*, ale téměř vždy jejich různé kombinace. Střídavé energetické soustavy, které se nacházejí ve vzdálenosti menší nebo rovné interferenční vzdálenosti od dané kovové potrubní soustavy, musí být zvažovány jako rušící soustavy pro danou potrubní soustavu [10]. Pro omezení vlivu venkovních vedení a elektrických stanic VVN a ZVN na ocelová izolovaná potrubí uložená v zemi je důležitá správná volba trasy. Norma ČSN 33 2165:2014 doporučuje volit vzájemnou vzdálenost trasy potrubí a trasy vedení co největší, pokud toto nelze dodržet, má být minimální ekvivalentní šířka souběhu 20 m.

Používaný termín potenciál je v této kapitole myšlen nejčastěji jako potenciál potrubí proti vzdálené zemi.

Dle způsobu vzájemné vazby můžeme definovat tři základní vlivy střídavého napětí na úložná zařízení:

- *Kapacitní vliv*: Vytváří elektrický potenciál v kovových částech v důsledku elektrického střídavého pole, např. potrubí na izolovaných podpěrách stojící pod linkami VVN a ZVN,
- *Galvanický vliv*: Vytváří elektrický potenciál v kovových částech v důsledku kovového kontaktu, např. přeskokem elektrického oblouku od přepětí úderu blesku do vedení nebo spadnutím fázového vodiče na zem,
- *Induktivní vliv*: Vytváří elektrický potenciál v kovových částech v důsledku indukce střídavého magnetického pole běžným provozem nebo zkratem.

Výše zmíněné interference lze rozdělit dle doby trvání na *krátkodobé* a *provozní*. Krátkodobé interakce jsou nejčastěji poruchové stavy (úder blesku do vedení nebo zkrat na vedení), které působí ojedinele a po velmi krátký čas  $\leq 0,5s$  (do vybavení jedné z elektrických ochranných). Při těchto poruchách protékají z vedení do země velké proudy, zpravidla v řádech kA. Provozní interakce ovlivňuje úložná zařízení svým běžným provozem, protékajícím proudem, který indukuje v potrubí napětí v rozsahu jednotek (od 10 V) až desítek voltů (do 100 V), v závislosti na velikosti izolačního odporu ochranného obalu, resp. na velikosti svodového proudu.

Pro všechny výše zmíněné vlivy platí maximální dovolené efektivní hodnoty napětí na izolovaných potrubích proti zemi dle Tabulky 2.1, které nesmí být překročeny. Tyto hodnoty platí obecně pro provozní i poruchové stavy soustav VVN.

Doba trvání $t$ (s)	Mez nebezpečných napětí $V$ (efektivní hodnota)
$t \leq 0,1$	2 000
$0,1 \leq t \leq 0,2$	1 500
$0,2 \leq t \leq 0,35$	1 000
$0,35 \leq t \leq 0,5$	650
$0,5 \leq t \leq 1,00$	430
$1,0 \leq t \leq 3,0$	150
$t \geq 3$	60

Tabulka 2.1: Meze nebezpečných vlivů, převzato z ČSN 332165:2014

## 2.1 Elektrostatický - kapacitní vliv

Vrchní vedení vysokého střídavého napětí tvoří v provozu se zemí kapacitní vazbu. Jedná se o kondenzátor se vzduchovým dielektrikem a s elektrodami: vedení - zem, vedení - vedení. Za normálního provozu protékají tímto kondenzátorem kapacitní proudy, které způsobují ztráty na vedení. Vložíme-li souběžně s vedením, do prostoru mezi fázový vodič VVN a zem, ocelové potrubí umístěné na izolovaných podpěrách, vznikne kapacitní dělič složený z kapacity  $C_{12}$  mezi el. systémem a potrubím v sérii s kapacitou  $C_{20}$  mezi potrubím a zemí. V případě, že je potrubí v souběhu s vedením VVN, lze na jeho kovovém povrchu naměřit napětí, jehož velikost je dána velikostí napětí distribuční soustavy, kapacitami  $C_{12}$  a  $C_{20}$  a vzdáleností  $a$  od vodičů vrchního vedení VVN.

### Meze dosahu kapacitních vlivů

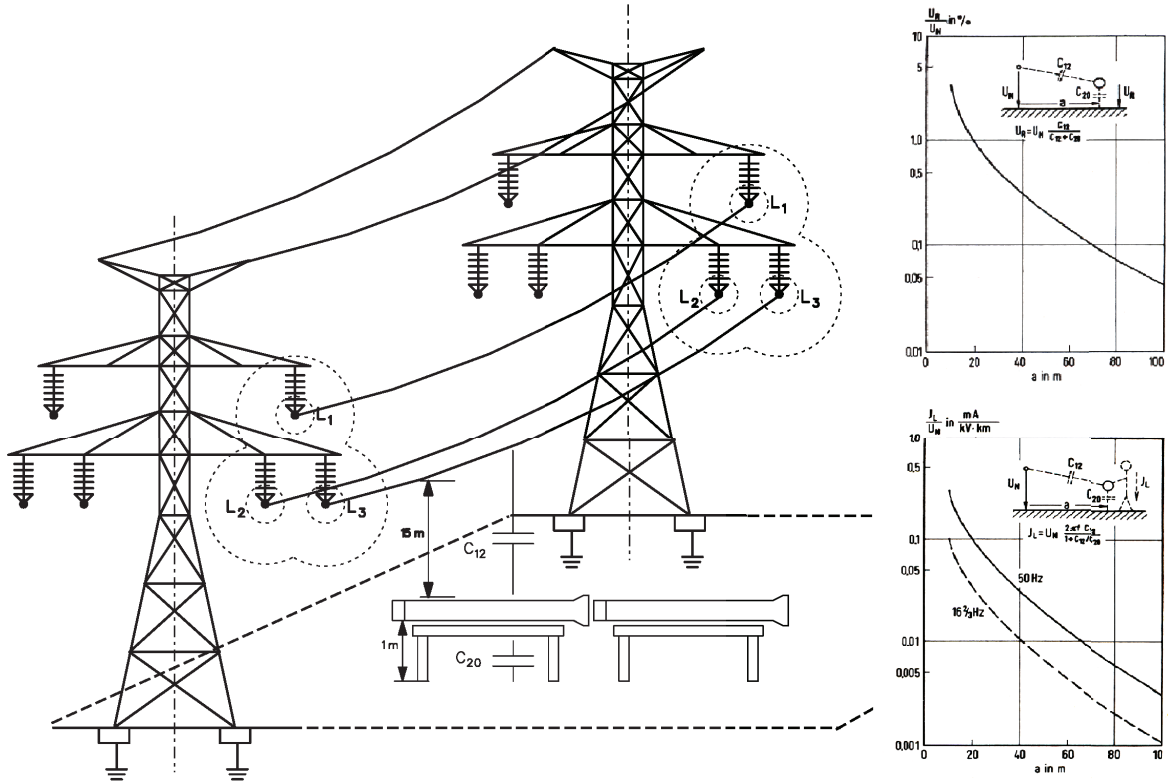
Kapacitní vazba z AC napájecí soustavy musí být uvažována v případě vzdálenosti menší než 100 m [10].

Kapacitní vazba pro kovová potrubí izolovaná od země z drážní soustavy musí být uvažována v případě vzdálenosti menší než:

- 10 m pro soustavu 15 kV; 16,7 Hz;
- 50 m pro soustavu 25 kV; 50 Hz.

Pro potrubí ve výstavbě lze velmi hrubě odhadnout indukované napětí na jeho povrchu dle vztahu pro kapacitní dělič:

$$U_R = U_N \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Kapacitní vazba, vedení VVN - potrubí ve výstavbě

$U_N$  [V] jmenovité napětí vedení VVN,

$U_R$  [V] napětí naměřené na potrubí,

$C_{12}$  [F] kapacita mezi fázovým vodičem VVN a potrubím,

$C_{20}$  [F] kapacita mezi potrubím a zemí.

Při stavbách liniových staveb vystavených kapacitnímu vlivu vedení VVN a ZVN je třeba dbát zvýšené opatrnosti proti úrazu elektrickým proudem. Efektivní hodnota proudu procházejícího lidským tělem, který odpovídá poměru naindukovaného napětí na povrchu izolovaného ocelového potrubí ku impedanci ve spojeném obvodu, nesmí překročit dle ČSN 33 2165:2014 hodnotu 10 mA. Neuzemněné části ocelového izolovaného potrubí, umístěné při montáži nad zemí a vystavené kapacitnímu vlivu souběžných venkovních trojfázových vedení VVN a ZVN při provozním stavu vedení se musí uzemnit, jestliže ekvivalentní šířka souběhu je menší než udává Tabulka 2.2 a délka galvanicky propojené části potrubí je větší než 200 m [10].

Jmenovité napětí VVN, ZVN (kV)	Dovolená ekvivalentní šířka souběhu (m)
110	150
220	200
400	250
750	300

Tabulka 2.2: Dovolené ekvivalentní šířky souběhu při kapacitním vlivu, převzato z ČSN 33 2165:2014

## 2.2 Galvanický vliv

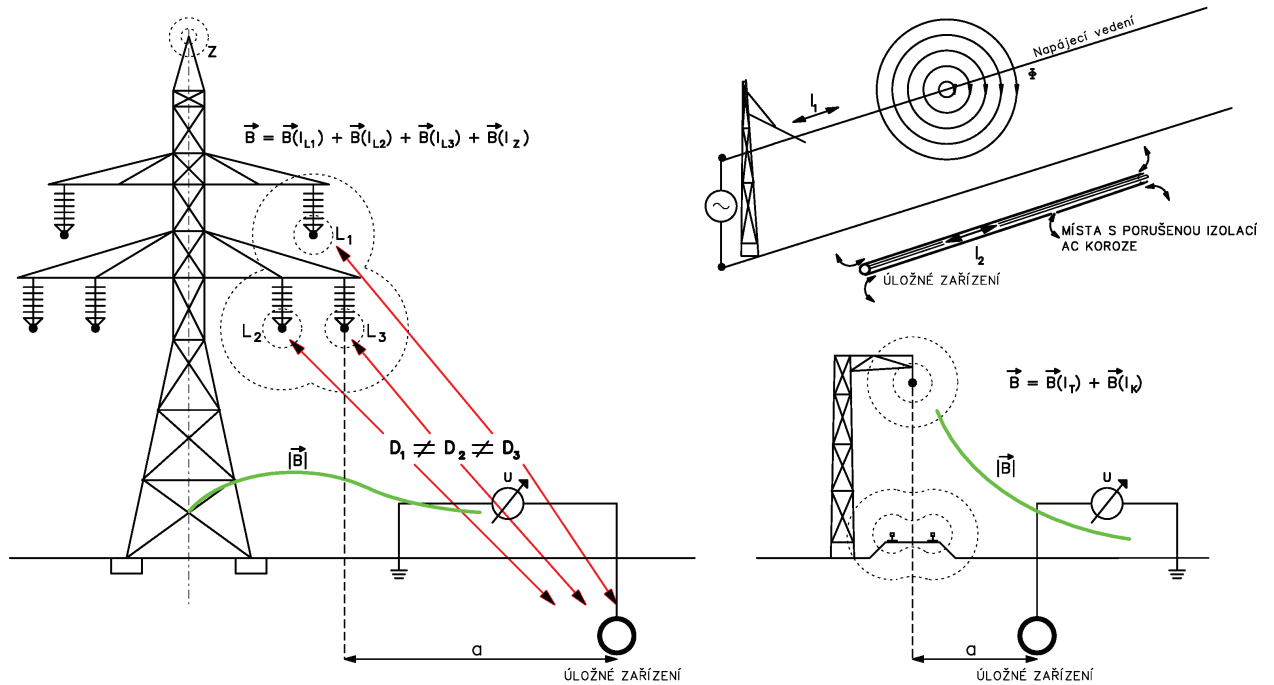
Tomuto jevu jsou vystavena izolovaná ocelová potrubí uložená v zemi, probíhající v blízkosti elektrických stanic nebo stožárů venkovních vedení VVN. Ke galvanickému jevu dochází při poruchovém stavu vedení VVN. Nejčastěji se jedná o jednofázové zkraty, při kterých se uzavírá proud zemí z postižené fáze, případně skrze zemní lano zpět do rozvodny. Pokud je vzdálenost od základů stožárů a jejich zemničů větší než 10 m, nejsou nutná žádná opatření (ČSN 33 2165:2014). Jedná se o vliv ojedinělý a krátkodobý, při kterém zpravidla nedochází ke koroznímu poškození.

## 2.3 Elektromagnetický - induktivní vliv

Elektrická energie je přenášena trojfázovým systémem pomocí venkovních vedení. Fáze harmonických napětí jsou vůči sobě natočeny o 120 ° elektrických. V soustavě, ve které jsou vodiče uspořádány geometricky souměrně a proudy ve všech fázích jsou shodné, je součet příspěvků magnetických polí od jednotlivých vodičů roven nule. Takový případ v praxi nenastává. U vedení VVN nejsou jednotlivé fáze na stožárech uspořádány geometricky souměrně. Vektory magnetické indukce od jednotlivých fází se sčítají a výsledné magnetické pole způsobuje indukci napětí v úložném zařízení. Jedná se o transformátor bez magnetického obvodu.

Velikost tohoto napětí závisí převážně na:

- vzdálenosti od vedení  $a$ , ( $\nearrow a \searrow$  induktivní vliv),
- velikosti protékaného proudu vedením, ( $\nearrow I \nearrow$  induktivní vliv),
- frekvenci proudu, ( $\nearrow f \searrow$  induktivní vliv),
- velikosti izolačního odporu povlaku potrubí, ( $\nearrow R \nearrow$  induktivní vliv),



Obrázek 2.2: Induktivní vliv nadzemního vedení VVN na úložná zařízení se zobrazením průběhů magnetické indukce v okolí stožáru vedení

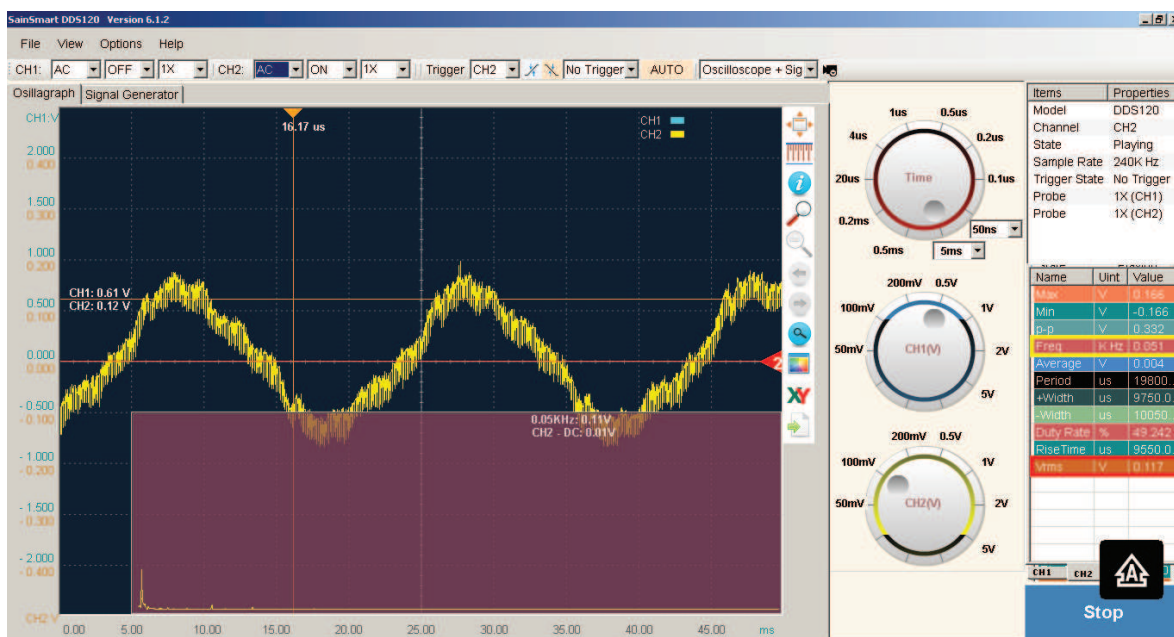
- a na lokální měrné rezistivitě půdy, ( $\nearrow \rho \searrow$  induktivní vliv).

Korozně nebezpečný induktivní vliv lze očekávat na dlouhých souběžných úsecích potrubí s vrchními linkami vysokého napětí nebo v místech jejich vzájemného křížení.

Náhled na druh izolace potrubí, ochranu proti interferenčním vlivům od vysokonapěťových soustav a ochranu proti AC korozi se liší. Indukované napětí v kovových potrubích vzniká proto, že potrubí je dobře elektricky izolováno od okolní země. Naindukované napětí v úložných zařízeních roste úměrně s velikostí izolačního odporu ochranné izolace, tzn. že napětí na potrubí s ochrannými izolacemi s vysokým izolačním odporem - zpravidla z PE bude vyšší, než na těch, které jsou opatřeny izolacemi s nízkým izolačním odporem. Čím vyšší je izolační odpor potrubí, tím pomaleji se snižuje napětí na koncích souběhu obou zařízení. Indukované napětí vybudí při elektricky spojeném potrubí, tok elektrického proudu mezi defektem v izolaci defekt izolace a pomocným zemničtem, který je vzdálen minimálně 20 m od potrubí. Ochranný povlak z cementové malty účinně brání vlivu AC indukovaných napětí tím, že potrubí je po celé délce nedefinovaně uzemněno. Ochranný obal OCM nevykazuje tak vysoký izolační odpor. Indukované napětí v trubce č.4 od vedení 22 kV, které vede nad pokusným potrubí ve výšce 12 m jsme osciloskopem naměřili



efektivní hodnotu  $0,11\text{ V}$ , viz Obrázek 2.3. Kovová potrubí s vysokým izolačním odporem, která nejsou katodicky chráněna, jsou zpravidla dodatečně uzemňována pomocí tzv. obětovaných anod (nejčastěji zinkových) nebo galvanizovaných železných tyčí rozmístěných v pravidelných intervalech.



Obrázek 2.3: Indukované napětí od vedení  $22\text{ kV}$  v pokusném potrubí DN 80 s OCM o délce  $24\text{ m}$ . Vedení VVN přímo kříží místo potrubí kolmo ve výšce  $12\text{ m}$ .

## 2.4 Koroze střídavými proudy na katodicky chráněných zařízeních

Fenomén koroze způsobené střídavým proudem byl popsán mnoha autory již do roku 1900. Nicméně, mechanismus(my) AC koroze nejsou dodnes plně pochopeny. Od roku 1986 bylo v Evropě pozorováno několik případů koroze na vysokotlakých plynových potrubích způsobených vlivem střídavého proudu ( $16^{2/3}$  a  $50\text{ Hz}$ ). Ve dvou případech v Německu, u ocelových potrubí s polyethylenovou izolací instalovaných v roce 1980, došlo k perforaci potrubí v místě křížení se železniční tratí. Ve všech těchto případech byly měřeny obvyklé veličiny katodické ochrany (ochranný potenciál  $-1000\text{ mV}$ ,  $pH\ 10$ ), které se pohybovaly v obvyklém rozsahu technických standardů. Je velmi pravděpodobné, že i před rokem 1986 docházelo ke korozním škodám na potrubích způsobených vlivem střídavého proudu.

Obsluhující personál katodické ochrany si nebyl vědom příčiny koroze potrubí jako vliv střídavé interference a nevyhodnotil tyto případy jako její důsledek [12]. Následné vyšetřování ukázalo vysokou míru důlkové koroze navzdory hodnotě ochranného proudu z KPO mezi 1,5 a 2  $A/m^2$  a hodnotám zapínacího potenciálu mezi -1,8 a -2,0 V proti referenční elektrodě. Následné výzkumy Gummowa ukazují, že zvýšením proudové hustoty KPO na 5  $A/m^2$  se redukuje korozní rychlost na polovinu při hustotě AC proudu 50  $A/m^2$ .

Mnoho autorů a publikací se zabývá souvislostí mezi hodnotou proudové hustoty střídavého proudu, který už způsobuje korozi úložných zařízení a hodnotou, kterou lze považovat za dlouhodobě bezpečnou. Nejvíce se shodují v tom, že při hustotách proudu  $> 100 A/m^2$  je koroze očekávaná, navíc někteří naznačují, že KPO není při těchto proudových hustotách v potlačení koroze účinná. Většina studií označuje korozi možnou při proudových hustotách od 20 do 30  $A/m^2$ . Draft European Standard („Evaluation of AC corrosion likelihood of buried pipelines. Application to cathodically protected pipelines“, CEN TC 219, No. 329, December 2004) navrhuje následující doporučení: Potrubí vystavené proudové hustotě střídavého proudu menší než 30  $A/m^2$  se považuje za hustotu, která na katodicky chráněných zařízeních nezpůsobí korozní poškození natolik závažné, že by ovlivnilo spolehlivost provozu úložného zařízení.

Výše uvedenou hustotou střídavého proudu je myšlena hodnota, která prochází v místě defektu izolace do půdního elektrolytu a lze ji vypočítat dle níže uvedeného vztahu, který je odvozen z odporu šíření (spread resistance) a odporu izolace (pore resistance) v místě defektu izolace. Tento vztah vychází z výzkumu Yunoviče, více v [12].

$$J_{AC} = \frac{U_{AC}}{R \cdot A} \quad (2.2)$$

$J_{AC}$  [ $A/m^2$ ] proudová hustota střídavého proudu v místě defektu izolace,

$U_{AC}$  [V] ef. hodnota naindukovaného střídavého napětí,

$R$  [ $\Omega$ ] odpor mezi ocelovým povrchem a půdou,

$A$  [ $m^2$ ] vypočtená nebo známá plocha odkrytého kovu.

Hodnota odporu  $R$  je v literatuře uváděná jako spread resistance a je to kompromis mezi odporem kruhového defektu s průměrem  $d$  a odporem pórovitého defektu v izolaci.

$$R = \frac{\rho_s}{2d} + \frac{4\rho_f h}{d^2\pi} \quad (2.3)$$

$\rho_s$  a  $\rho_f$  [ $\Omega\text{m}$ ] rezistivita půdy a elektrolytu,  
 $d$  [m] průměr defektu izolace,  
 $h$  [m] tloušťka izolace,

V případě, že  $\rho_s = \rho_f$ , při větších defektech ( $d \gg h$ ) se neuplatní druhý člen v rovnici 2.3. Dosazením rovnice 2.3 do rovnice 2.2 dostaneme vztah pro proudovou hustotu střídavého proudu v místě defektu izolace [15].

$$J_{AC} = \frac{8U_{AC}}{\pi d \rho_s} \quad (2.4)$$

Výše uvedené vztahy jsou převzaté a více je možné se dozvědět např. v [12]. V praxi se možnost vzniku AC koroze hodnotí dle širších kritérií s důrazem na proudovou hustotu v místě poškození izolace:

- proudová hustota menší než  $30 \text{ A/m}^2$  : žádná nebo malá pravděpodobnost vzniku koroze,
- proudová hustota mezi  $30$  a  $100 \text{ A/m}^2$  : střední pravděpodobnost vzniku koroze,
- proudová hustota větší než  $100 \text{ A/m}^2$  : velmi vysoká pravděpodobnost vzniku koroze,
- nejvyšší korozní rychlost nastává u defektů o ploše mezi  $1$  a  $3 \text{ cm}^2$  [13].

Obdobně toto riziko definuje i DIN 50925 (Korrosion der Metalle; Nachweis der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes erdverlegter Anlagen, 1992) a přebírá hodnotu  $30 \text{ A/m}^2$  od Baeckmanna a Schwenka, kteří se KPO dlouhodobě zabývají. Nicméně, nedávný výzkum, „Mark Yunovich a Neil G. Thompson: AC Corrosion, PRCI Catalog No. L52098 September 2003“ ukázal, že AC proudová hustota  $20 \text{ A/m}^2$  může způsobit, za podmínek vysoké půdní vodivosti v místě defektu izolace, podstatnou korozi.

Tyto publikace poukazují na to, že posuzování AC koroze pouze dle napětí je zavádějící. Standard NACE RP0177 „Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems“ doporučuje udržovat potenciál potrubí měřený proti referenční elektrodě pod  $15 \text{ V}$  a nebo pod  $65 \text{ V}$  dle smyslu standardu v Německu (Technical Recommendation No. 7, „Measures for the installation and operation

of pipelines in the vicinity of three-phase high-voltage systems and single-line traction systems“, Verlags-und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitaetswerke GmbH- WVEW, Frankfurt am Main, 1985). Hlavním doporučením je sledovat AC proudovou hustotu místo AC napětí. Přestože se předpokládá redukce proudové hustoty při snižování AC napětí na úložném zařízení, praktická měření ukazují, že i relativně malý defekt v izolaci trubky (6 až  $13 \text{ cm}^2$ ), může v relativně nízkorezistivní půdě vyvolat proudovou hustotu  $100 \text{ A/m}^2$  při AC napětí  $6 \text{ V}$  proti referenční elektrodě. Evropský standard doporučuje, aby AC napětí nepřekonalo  $10 \text{ V}$  po celé délce potrubí nebo  $4 \text{ V}$  v místech, ve kterých je lokální rezistivita půdy nižší než  $25 \Omega\text{m}$ .

V posledních letech se podařilo v Evropě sumarizovat počet případů koroze, které jsou přímým důsledkem působení střídavého proudu:

- počet případů koroze způsobených střídavým proudem – 23,
- počet případů trhlin, netěsností – 4,
- počet pozorovaných případů korozního napadení – 709.

Výše uvedený výčet je z dostupných informací. Pravděpodobně se jedná jen o malé procento všech případů korozního napadení způsobeného střídavým proudem. Jev koroze střídavými proudy je pozorován častěji na dobře izolovaných potrubích pomocí Fusion Bonded Epoxy používaných v U.S. nebo třívrstevným FBE/PE používaným v Evropě.

Působení střídavého proudu na ocelová/ litinová potrubí, tím i riziko korozního napadení, se může do budoucna zvyšovat důsledkem:

- výstavby nových, výkonnějších linek vysokého napětí,
- neustálým zvyšováním kvality izolací trub,
- snahou dosáhnout na nových potrubí téměř dokonalého odizolování od země,
- výstavbou nových vysokorychlostních železničních koridorů.

### 2.4.1 Faktory ovlivňující korozi střídavým proudem

Koroze je způsobena výměnou náboje mezi kovem a půdou. Velikost indukovaného napětí a impedance smyčky určuje množství prošlého náboje potrubím, závisí na parametrech proudové soustavy a stavu úložného zařízení:

- vzdálenosti mezi fázovými vodiči,
- vzdálenosti mezi vedením vysokého napětí a potrubím,
- velikosti protékajícího proudu vedením vysokého napětí,
- odporu izolace (povlaku) potrubí,
- frekvenci střídavého napětí.

Mezi přidružené faktory ovlivňující průběh koroze patří:

- proudová hustota střídavého proudu,
- hodnoty zapínacího a vypínacího potenciálu,
- velikost defektu izolace,
- rezistivita půdy v místě poruchy,
- chemické složení půdy v místě poruchy,
- tvorba chemických sloučenin na rozhraní kov – půda, vlivem katodické ochranné reakce – alkalizace prostředí.

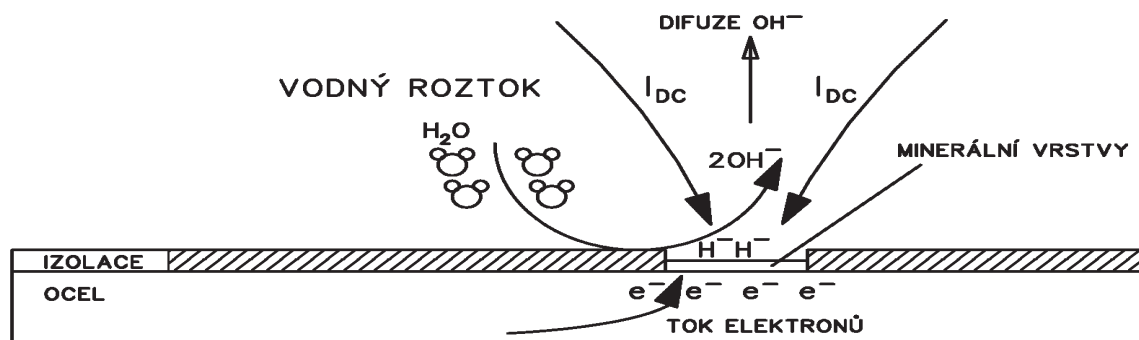
## 2.5 Princip katodické protikorozní ochrany

Katodická ochrana snižuje korozní rychlost oceli v místech poškození ochranného povlaku, ve kterých dochází ke kontaktu ocelového povrchu s půdním elektrolytem, dominantně alkalizací půdního elektrolytu u katodicky polarizovaného povrchu, snížením potenciálu oceli a vytvořením podmínek pro pasivaci ocelového povrchu. Pracovní bod se nachází v úzkém místě mezi oblastí imunity a pasivity Pourbaix diagramu, viz. Obrázek 2.5 - modrá čára. (KPO pracuje převážně v oblasti pasivity železa. Do oblasti imunity se lze dostat jen za velmi nízkých ochranných potenciálů s nežádoucím vývinem vodíku v místě defektu izolace.) KPO se zpravidla připojuje na dlouhé liniové stavby, svařovaná ocelová potrubí s páskovou izolací. Hlavní způsob polarizace se provádí pomocí vnějších zdrojů stejnosměrného proudu (usměrňovačů) o max. výstupním napětí 50 V v souladu s ČSN 33 2000. Výstupní proud se ustanoví dle impedance půdy, počtu poruch apod., zpravidla se pohybuje v hodnotách do 5 A při napětích 5 až 15 V [15]. Většina výkonu

zdrojů KPO je přeměněna v teplo při překonávání velkých vzdáleností na ohmických odporech půdního elektrolytu, přívodních kabelech a chráněném objektu. Proto se proud ke chráněnému zařízení šíří pomocí uzemněných anod instalovaných v rozestupech do cca. 10 km a vzdálených od chráněného povrchu do cca. 300 m nebo, však omezeně, pomocí anod vedených paralelně s potrubím po celé délce. Při používání diskretních anod se musí počítat s určitou podélnou nerovnoměrností ochranných potenciálů. Mezi elektrochemické reakce, které probíhají při katodické polarizaci v blízkosti defektu izolace patří redukce kyslíku dle (1.18). Rychlost této reakce je omezena množstvím vody a kyslíku v elektrolytu, tedy rychlostí difúze. Při doprovodné katodické reakci, která vyžaduje zvýšené proudové hustoty a dostatečně záporné potenciály, se vylučuje při redukci vody na ocelovém povrchu i vodík dle (1.17), který částečně vstupuje ve formě vodíkových atomů do kovu, ve kterém je nežádoucí a může způsobovat jeho křehnutí. Pro ochranné povlaky je též nežádoucí, protože může vést k tzv. disbondingu. U chráněného povrchu se hromadí anionty  $OH^-$ , roste alkalita okolního prostředí a od určitého okamžiku začne docházet ke koncentračním změnám v důsledku migrace, která je vyvolána gradientem potenciálu v iontově vodivém prostředí. U chráněného povrchu začne docházet k vyrovnávání přebytku záporného náboje tak, aby byla splněna podmínka elektroneutality, tzn. byl stejný počet kationtů a aniontů v elektrolytu. To má pozitivní dopad, protože v okolí katody je elektrolyt migrací zbavován chloridů a síranů, které podporují anodové rozpouštění železa a jsou také příčinou jeho malé korozní odolnosti. Migrace odvádí hydroxilové ionty dále od katody, ty jsou ale na katodě stále produkovány a rychlost vývinu aniontů  $OH^-$  je vyšší než jejich odvod, tím roste v okolí místa porušení izolace alkalita prostředí. Ta má přitom pozitivní vliv na vznik pasivační vrstvy, špatně rozpustných sloučenin ( $CaCO_3$ ,  $Mg(OH)_3$ ) a na dlouhodobě katodicky chráněném povrchu při ochranném potenciálu  $-0,85 V$  se tvoří vrstva magnetitu dle reakce (1.15). Tyto vrstvy jsou elektricky špatně vodivé a mohou způsobit kolísání a zhoršení distribuce ochranného proudu, což vede k nerovnoměrnému potenciálovému poli po délce potrubí, případně ke špatnému nastavení parametrů KPO, která se zpravidla řídí jen dle hodnoty ochranného potenciálu proti referenční elektrodě. Na Obrázku 2.4 je zobrazen vzrůst hodnoty  $pH$  v okolí místa porušení izolace.

## 2.6 Princip koroze střídavými proudy

Průběh harmonického proudu je složen z kladné - anodické půlvlny, a záporné - katodické půlvlny. Střední hodnota střídavého proudu je ekvivalent k hodnotě stejnosměrného



Obrázek 2.4: Ilustrace vzrůstu pH v blízkosti katodicky chráněného povrchu

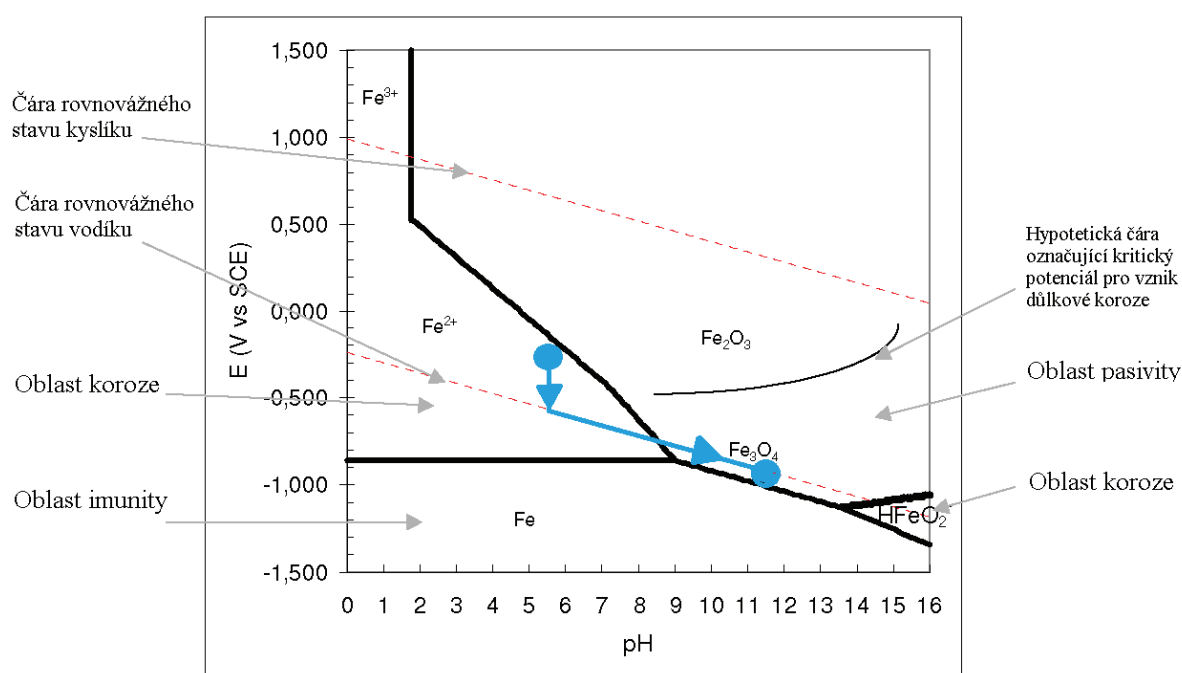
proudu, který za stejný čas přenese stejný náboj (neboli má stejné elektrochemické účinky, vyloučí z elektrolytu stejné množství kovu) je u harmonických průběhů v ideálním stavu rovna nule. Ke korozi teoreticky nemůže dojít, protože kov je střídavě v katodické půlvlně redukován a v anodické půlvlně oxidován a celkové množství přeměněného kovu v rez je nulové. Riziko vzniku koroze střídavým proudem klesá s rostoucí frekvencí. Pro korozi střídavou interferencí je proto nutná nesymetrie střídavého proudu, která je zpravidla způsobena přítomností stejnosměrné složky, která posune potenciál více katodicky. Dostatečný proud pro vznik koroze střídavou interferencí poskytuje například zařízení katodické ochrany. Usměrnující účinky některých zemin jsou také známy, avšak jejich vliv je omezený. Poruchové stavy liniových staveb vlivem střídavé interference byly pozorovány hlavně na potrubích, které byly katodicky chráněny. Jak již bylo uvedeno, stejnosměrné bludné proudy způsobují korozi v tzv. anodickém pásmu úložného zařízení a množství rozpuštěného kovu se řídí Faradayovými zákony. AC koroze může probíhat i na katodicky chráněných zařízeních a proč tomu tak vlastně je, není dosud zcela pochopeno. Pokusím se zde uvést nejnovější poznatky z této problematiky.

Pro korozi způsobenou střídavými bludnými proudy hraje podstatnou roli spolupůsobení několika faktorů: chemické složení půdy s ohledem na obsah kyselin nebo zásad, půdní vlhkost, výskyt stejnosměrných bludných proudů. Poslední výzkumy ukazují, že jeden faktor je zvláště důležitý – půdní alkalizace v blízkosti kovového povrchu zařízení.

Když katodicky chráněné potrubí přijímá proud z usměrňovače/ anody KPO, snižuje se tím jeho potenciál a v ideálním případě je držen v malém místě na rozhraní *oblasti imunity* a *oblasti pasivity* Pourbaix diagramu při ochranném potenciálu  $-0,85\text{ V}$  proti referenční elektrodě (modrý bod na Obrázku 2.5). Katodická ochrana může být narušena interferencí DC bludných proudů vstupujících a vystupujících z potrubí. V místě, kde tyto



proudy vstupují do potrubí (přidávají se k proudům KPO) se jeho potenciál snižuje (je více katodické). V místě, kde tyto proudy opouštějí potrubí se potenciál zvyšuje (více anodické), tj. zvyšuje se tím riziko koroze. V souladu s tím normy (např. EN 50162) stanoví, že korozi v důsledku stejnosměrných bludných proudů se dá zabránit přidáním proudu KPO [16]. Intuitivně se zdá, že stejná strategie ochrany proti korozi může být použita i proti

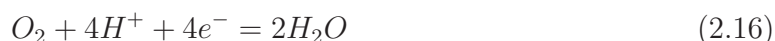
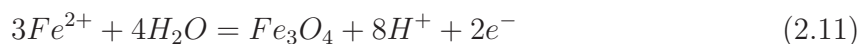
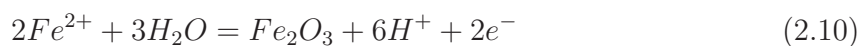
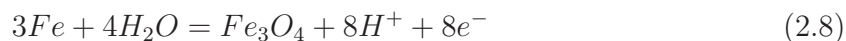
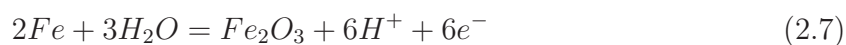
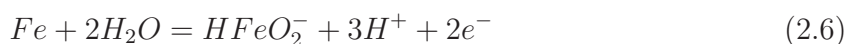
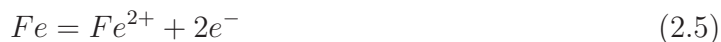


Obrázek 2.5: Potenciál (E) - pH (Pourbaix) diagram pro železo (litinu) ve vodě

interferencím způsobených střídavým proudem. Předpokládáme, že izolace trub je tvořena materiálem s vysokým izolačním odporem a je v určitém místě poškozena, potrubí je katodicky chráněno a katodická ochrana je nastavena dle technických standardů. V místě vady povlaku se vytvoří pasivační ochranná vrstva, kolem které vzrůstá hodnota pH (koncentrace  $OH^-$  iontů vzrůstá o 3 až 6 řádů) [16, 17]. Oscilující proud kmitá střídavě mezi kladnou půlvlnnou (anodickou) a zápornou půlvlnnou (katodickou), tím může docházet k periodickému posouvání bodu více doleva do oblasti s vysokou hodnotou  $pH$ , ve které je koroze teoreticky možná. Galsgaardovy a Nielsenovy výzkumy naznačují, že korozní rychlost roste s větším proudem KPO. Diagram potenciál (E) - pH je založen na teoretických výpočtech, nicméně jeho vhodnost a aplikovatelnost se prokázala v řadě praktických případech. Výpočty jsou založené na známých termodynamických údajích pro elektrochemické

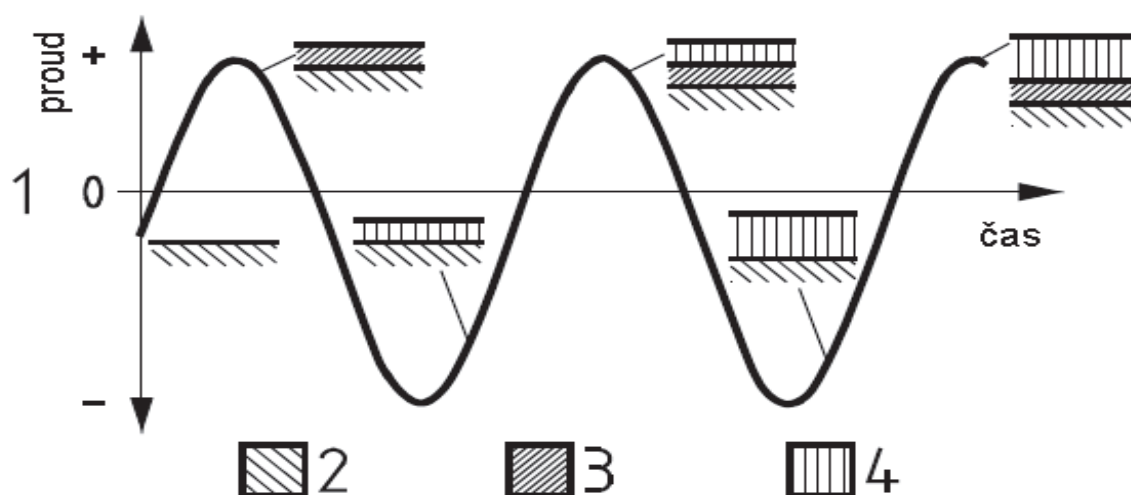


reakce (rovnice), které jsou uvedené níže.



Reakce (2.5) uvádí oxidaci a rozpouštění železa v jeho pevné fázi - což odpovídá koroznímu procesu. Toto je také případ pro reakci (2.6) a proces (2.9) ukazuje přechod z jedné rozpuštěné fáze do jiné. Rovnovážný potenciál pro tyto tři procesy - vypočtený jako funkce pH - zobrazuje v diagramu dvě korozní oblasti, oblast tzv. imunity a oblast

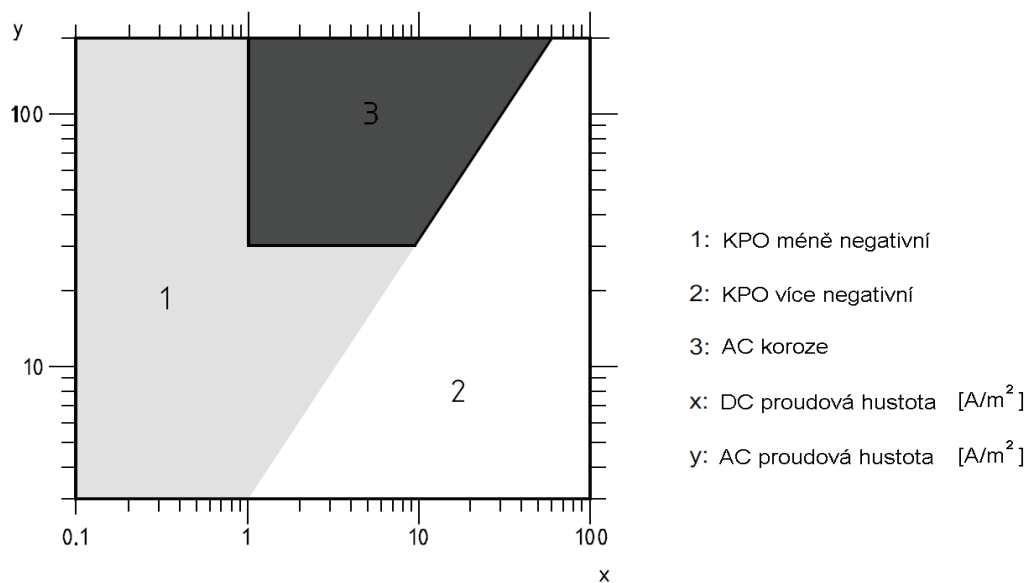
pasivity. Vlivem střídavé interference se potenciál vychyluje (osciluje) se stejnou frekvencí (50 Hz), jakou má tato interference. To znamená, že během kladné půlvlny střídavého napětí se může potenciál dostat z oblasti imunity do oblasti koroze. Otázkou je, zda-li jsou elektrochemické reakce dostatečně rychlé, aby se v čase působení 10 ms projevíly nebo zda-li kmitání potenciálu o frekvenci 50 Hz je tak rychlé, že se riziko koroze střídavým proudem vůbec neprojeví. Záleží na velikosti proudu katodické ochrany. Příliš velký proud způsobuje vysokou alkalizaci malé oblasti kolem defektu izolace, u které se akumulují ionty  $OH^-$  v důsledku redukce kyslíku (2.15) a tvorby vodíku (2.14). Současně s tím se vytvářejí na ocelovém povrchu minerální vrstvy podle toho, jaké kationty jsou rozpuštěny ve vodném půdním prostředí. Ochranný proud KPO vytváří, krom jiného, v místě poško-



Obrázek 2.6: Schematické znázornění procesu AC koroze na katodicky chráněném zařízení: 1 AC proud v místě poškození izolace, 2 Ocelový povrch, 3 Pasivní film (např.:  $Fe_3O_4$ ), 4 Hydroxid železnatý  $Fe(OH_2)$ , převzato z EN 15280:2014

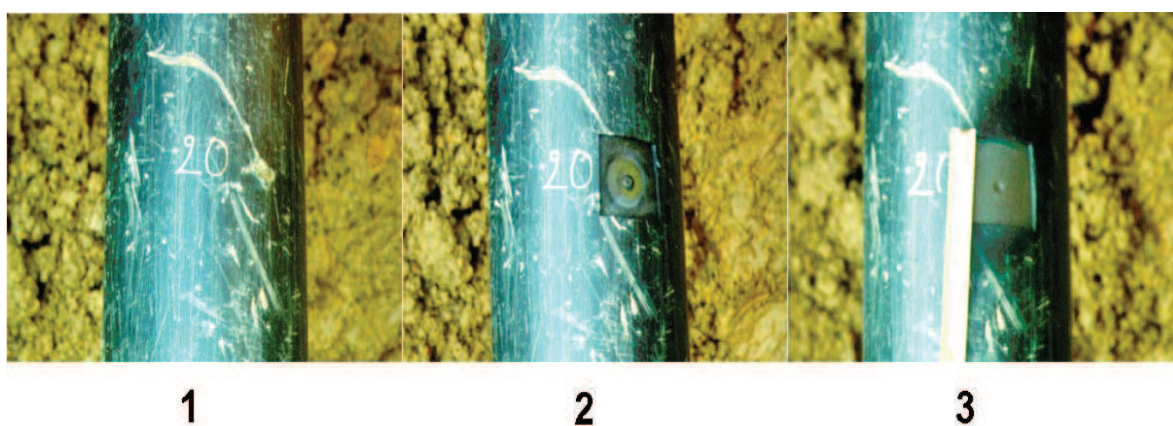
zení izolace tenkou ochrannou pasivní vrstvičkou oxidů  $Fe_3O_4$ , která je vlivem střídavého proudu se vzrůstem  $pH$  postupně přeměňována na poměrně nestálou sloučeninu  $Fe(OH)_4$ . Na základě mnoha výzkumů a pozorování, např. Büchlera, bylo zjištěno, že korozní proces střídavými proudy je možný pouze v případech, ve kterých jsou ochranné vrstvičky střídavě vytvářeny a rozpouštěny. Oxidací jedné atomové vrstvy za periodu lze dosáhnout teoretické korozní rychlosti 70 mm/rok [18]. Korozi lze zastavit zabráněním rozpouštění pasivační vrstvičky, to lze provést při vysokých hodnotách ochranného proudu KPO. Výzkumy z posledních let jsou shrnuty do aktualizované normy EN 15280:2014. Situace je dobře patrná z Obrázku 2.7, ve kterém je zobrazena pravděpodobnost AC koroze v souvis-

losti mezi hustotami AC a DC proudů, a stupněm ochrany KPO. Úplně nejhorší případ,



Obrázek 2.7: Vztah mezi proudovou hustotou DC a AC proudu a pravděpodobností AC koroze na úložných zařízeních, převzato z EN 15280:2014

ve kterém je korozní rychlost nejvyšší nastává tehdy, když ochranný proud je přidán ne dostatečně. V takovém případě se průběh AC koroze ještě urychlí tím, že roste rychlost tvorby pasivní vrstvičky a alkalita v okolí místa defektu izolace.

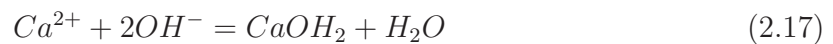


Obrázek 2.8: Ilustrace defektu v PE izolaci a příklad projevu AC koroze:

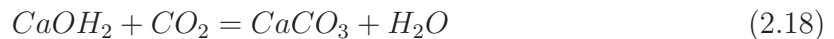
**1** velikost defektu izolace 15x20 mm, velikost vady je několik mm<sup>2</sup>; **2** oxidové vrstvy 40x40 mm a korozní produkt; **3** důlková koroze: průměr 5 mm, hloubka 0,5 mm, převzato z [12]

### 2.6.1 Soli vznikající z půdních alkalických kationtů

Kationty  $Ca^{2+}$  a  $Mg^{2+}$  tvoří hydroxidy s relativně špatnou rozpustitelností, která se silně snižuje s růstem hodnoty  $pH$ . Hodnota  $pH$  je největší na fázovém rozhraní kovu a elektrolytu, protože se zde tvoří  $OH^-$ , ty dále difundují od kovového zařízení a jejich koncentrace klesá.



Prostřednictvím absorpce  $CO_2$ , jehož koncentrace v půdě je 25x větší než ve vzduchu, může se  $CaOH_2$  transformovat na ještě hůře rozpustný uhličitan (vápenec).



Reakční schéma pro vápník je analogické i pro hořčík. V případě, že jsou v půdě obsaženy pouze alkalické kationty, vylučování těchto solí může probíhat přímo na fázovém rozhraní kov - elektrolyt a vytvořit tím vrstvu s vysokou rezistivitou, která snižuje hodnotu ochranného proudu KPO a hodnota ochranného potenciálu se snižuje.

### 2.6.2 Soli vznikající z dalších alkalických kationtů

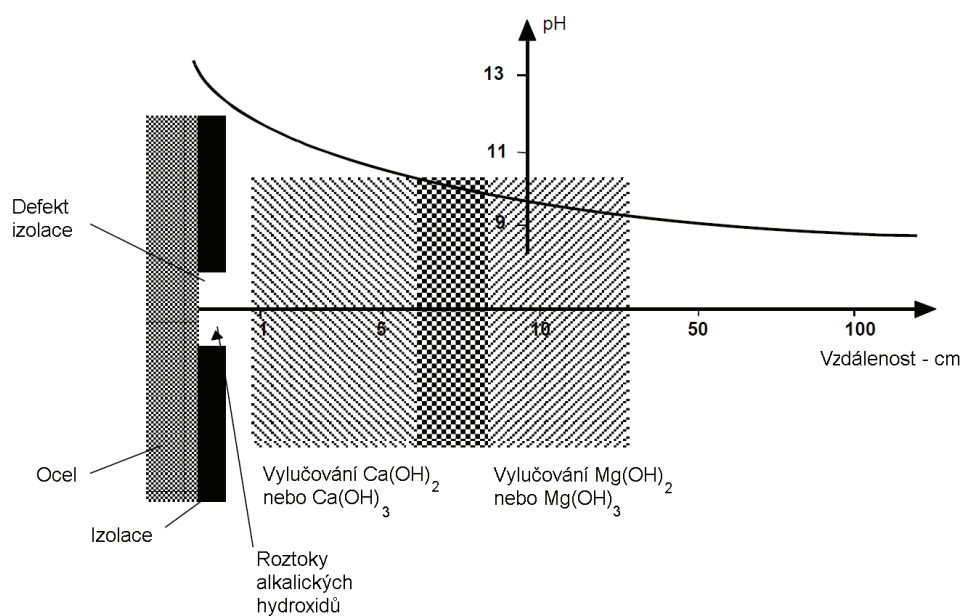
Alkalické kationty  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$  tvoří reakce v podobném smyslu s tím rozdílem, že vzniklé soli zformované v okolí defektu izolace jsou dobře rozpustné a silně hygroskopické. Absorbují vodu z okolního prostředí a tvoří vodné roztoky, např.: louh sodný.



Příjetím  $CO_2$  z půdy se  $NaOH$  transformuje do sody, která je stejně rozpustná.



V závislosti na poměru koncentrace mezi alkalickými kationty se tvoří krycí vrstvy s vysokým odporem a nebo roztoky s téměř nulovým odporem. Počáteční fáze proudu KPO způsobí, že kationty migrují k, a anionty od defektu izolace. Tato iontová migrace závisí na koncentraci iontů a na jejich pohyblivosti ve vodném půdním prostředí.



Obrázek 2.9: Vylučování špatně rozpustných solí v závislosti na vzdálenosti od chráněného potrubí, převzato z [12]

# 3 Základní způsoby ochrany úložných zařízení proti negativnímu vlivu bludných proudů

Rád bych zde uvedl několik opatření, kterými je možné snížit dopad negativních účinků (stejnoseměrných) bludných proudů na kovové konstrukce. Tato opatření vycházejí z normy ČSN EN 50122-2 a ČSN EN 50162.

Úroveň interference se se vzdáleností snižuje, proto si klademe za cíl vyloučit tok bludného proudu ohroženou konstrukcí. Nové liniové stavby mají být umístěny co nejdále od známých zdrojů bludných proudů. Ochranná opatření proti korozi se v protikorozní technice rozdělují do dvou základních skupin na *aktivní* a *pasivní*. Elektrochemická korozní ochrana zasahuje skrze změnu potenciálu aktivně do korozního procesu. Ochranné obaly a povlaky chrání úložná zařízení proti působení korozního prostředí.

## 3.1 Pasivní ochrana úložných zařízení

Pasivní, základní ochranu úložných zařízení, s největším významem proti bludným proudům, tvoří ochranné povlaky a izolace. Ukládání potrubí do chrániček, kolektorů, kanálů, nad zem apod., má jen omezený význam, především v oblastech s hustou civilní zástavbou.

### 3.1.1 Ochranné povlaky a technické požadavky na izolace potrubí

K zajištění protikorozní ochrany, tedy k oddělení kovového (litinového) povrchu potrubí od okolního agresivního prostředí (např. půdního), se používají ochranné obaly, povlaky nebo izolace, kterým tímto přisuzujeme hlavní význam. Doplňkový způsob pasivní ochrany je ukládání potrubí do kolektorů, kanálů, chrániček apod. Ochranné obaly používané v

současné době na ochranu trub z tvárné litiny můžeme dle použitého materiálu rozdělit do dvou skupin na *organické* a *anorganické*. Ochranné obaly musí mít takové vlastnosti, aby dobře splňovaly požadavky na dlouhodobou protikorozní ochranu kovového materiálu a zároveň výrazně neměnily své vlastnosti v průběhu své životnosti. K ochraně trub z tvárné litiny jsou v současné době používány tyto izolační materiály:

- bitumen, (asfalt) - používá se hlavně na koncích trub v místě hrdlových spojů,
- plasty - pásková izolace, extrudovaný nebo sintrovaný polyethylen, PUR,
- organické povlaky - ochranný obal z cementové malty,
- jiné - vrstva epoxidu.

Kvalita výše uvedených izolací se obvykle provádí podle níže uvedených zkoušek. Tyto zkoušky jsou v praxi vhodné pro nově vyrobené trubky, ale i pro potrubí, které je dočasně odhalené, např. za účelem opravy nebo kontroly celistvosti izolace. Mezi nejsnadnější kontrolu izolace patří posouzení vnějšího vzhledu izolace. Provádí se po celé délce trubky ze všech směrů. Na izolaci nesmí být známky hrubých škrábanců, trhlin nebo dokonce již začínající koroze litiny pod izolací. K poškození izolace může dojít již při neodborném transportu trub na místo pokládky. Častějším důvodem však bývá poškození trub přímo na místě provádění stavby.

Před pokládkou trub do našeho pokusného proudového pole prohlédneme trubky a zhodnotíme tyto faktory:

- celkový vzhled izolace - vizuální posouzení povrchu a struktury obalu z cementové malty,
- přilnavost obalu z cementové malty k litině po celé délce povrchu
- tloušťku obalu z cementové malty,
- pórovitost vysokým napětím.

Mezi hlavní požadavky na ochranné obaly zajišťující dlouhodobou korozní ochranu patří:

- a) vysoký *elektrický odpor* - také při dlouhodobém uložení ve vodě,
- b) vysoká *mechanická odolnost* a přilnavost ochranného obalu (povlaku), při skladování, transportu, montáži, ukládání, záhozu a provozu,
- c) dlouhodobá životnost, chemická odolnost, odolnost proti biologickým vlivům a stárnutí - musí vydržet stejně dlouho jako potrubí,
- d) nízká propustnost pro kyseliny a vodní páry, neporéznost,
- e) široký teplotní rozsah použití,
- f) dostatečná odolnost při elektrochemickém zatížení, obzvláště v kombinaci s elektrochemickými ochrannými opatřeními.

Ideální ochranný obal splňující všechny tyto požadavky v praxi neexistuje. Obecně můžeme konstatovat, že body *b*, *c* a *d* by měly být všeobecně platné pro všechny povlaky a izolace chránící úložná zařízení. Do skupiny organických materiálů používaných k ochraně trub z tvárné litiny spadají různé druhy plastů. Plastové izolace dobře obstojí v bodech *a*, *c*, *d*, *e* a *f*, ale mají velmi slabou mechanickou odolnost. K poškození ochranného např. *PE* obalu dochází často již při přepravě trub na stavenišťě. Nechtěné poškození izolačních obalů z *PE* nebo *PUR* při pokládce potrubí pracovním nářadím nebo technikou vede jistě ke zkrácení životnosti projektovaného zařízení. O kolik? To závisí především na velikosti defektu izolace, na lokálních podmínkách půdního prostředí a výskytu bludných proudů v dané oblasti úložného zařízení.



## 3.2 Vlastnosti OCM na litinových troubách

Ochranný obal z cementové malty spadá do kategorie těžké protikorozní ochrany trub z tvárné litiny. Tato ochrana litinových trub byla zavedena do praxe na konci 70. let minulého století. Požadavky na jeho výrobu jsou normalizovány normou ČSN EN 15542:2008. Ta popisuje složení použitého betonu, metodiku zkoušení kvality obalu a také možnosti opravy ochranné vrstvy.

### 3.2.1 Technické požadavky na OCM dle ČSN EN 15542:2008

#### 3.2.1.1 Zinkový povlak

Nanesená vrstva zinku na litinové potrubí má být v souladu s normami ČSN EN 545, EN 598 nebo EN 969 s minimálním naneseným množstvím zinku větším než  $200 \text{ g/m}^2$  a čistotou minimálně 99,99 %. Zinkový povlak má být suchý, čistý, bez oleje a jiných mastnot.

#### 3.2.1.2 Tloušťka primerového filmu

Změřená tloušťka vrstvy primeru dle metod popsanych v kapitole 7.1.2. výše zmiňované normy se má pohybovat v rozmezí hodnot od  $80 \mu\text{m}$  do  $150 \mu\text{m}$ .

#### 3.2.1.3 Složení čerstvé cementové malty

Čerstvá cementová malta je charakterizována poměrem cementu a písku  $v$ , vodním součinitelem  $w$  a obsahem plastické síťoviny  $f$ , vyjádřeným v procentech poměru množství vláken ku množství čerstvé malty. Tyto požadavky shrnuje Tabulka 3.1. Standardní směs

Polymerní úprava	písek/cement $v$	voda/cement $w$	obsah vláken $f$
bez	$\leq 1$	$\leq 0,35$	$0,8 \leq f \leq 3,5$
s	$\leq 2$	$\leq 0,35$	$\leq 2$

Tabulka 3.1: Požadavky na složení čerstvé cementové malty

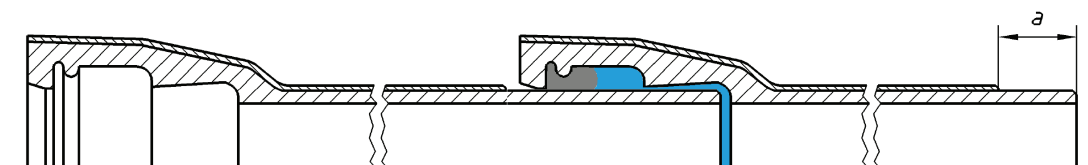
čerstvé cementové malty se vyrábí z  $280 \text{ kg}$  písku,  $140 \text{ kg}$  cementu (typ CEM III/A 42,5) a  $60 - 80 \text{ kg}$  pitné vody. Tento poměr zaručuje vodní součinitel v rozmezí 0,42 až 0,57. Beton s nižším vodním součinitelem vykazuje lepší mechanické vlastnosti (pevnosti, modul pružnosti, odolnost vůči průsakům vody) a vyšší trvanlivost než beton s vyšším vodním součinitelem. Maximální velikost vodního součinitele pro beton odolný proti korozi je 0,65 [2, 24].

### 3.2.1.4 Tloušťka cementové malty

Jmenovitá tloušťka nanesené čerstvé cementové malty má být 5 mm. Norma EN 15542:2008 dovoluje minimální tloušťku cementové malty 3 mm za předpokladu ojedinělého výskytu těchto míst.

### 3.2.1.5 Konce trub

Hrdlový spoj nemá být pokryt vrstvou cementové malty na koncích trub v místě napojení hrdla o délce  $a$ , viz Obrázek 4.3. Na konci trub je v délce  $a$  nanesen bitumenový lak.



Obrázek 3.1: Způsob propojení litinových trub hrdlovým spojem

### 3.2.1.6 Použitý cement

Cement použitý pro výrobu OCM obsahuje mletou granulovanou vysokopecní strusku, jedná se tedy o vysokopecní cement v souladu s normou EN 197-1, typu CEM III/b nebo typu CEM III/A 42,5 s minimálním obsahem alespoň 50 % mleté granulované vysokopecní strusky v objemu. Z chemického kompozice obsahuje 54 %  $CaO$ , 25 %  $SiO_2$ , 9 %  $Al_2O_3$ , 4 %  $MgO$ , 3 %  $Fe_2O_3$ , 3 %  $SO_3$ .

### 3.2.1.7 Použitý písek

Písek použitý do směsi má být čistý, přírodní a jemnozrný v souladu s normou EN 13055-1.

### 3.2.1.8 Použitá síťovina k vyztužení cementové malty

- skelná, vyrobená ze skla typu E dle normy EN 14020-1 a EN 14020-2,
- skelná vlákna odolná proti zásadám a žíravinám,
- neutrální plastická vlákna.

### 3.3 Aktivní ochrana úložných zařízení

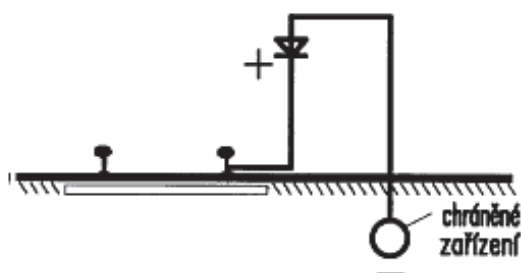
Aktivní, doplňkové ochrany jsou elektrická zařízení, která se instalují s cílem snížení interference nebo vyloučení toku bludného proudu z ohrožené konstrukce přímo do okolního prostředí.

Toho lze dosáhnout:

- odvedením bludného proudu z interferencí ohrožené konstrukce zpět do DC zdroje přes vodivý spoj (přímá drenáž),
- odvedením bludného proudu z interferencí ohrožené konstrukce zpět do DC zdroje zemí s použitím uzemňovacích elektrod,
- přiváděním stejnosměrného proudu zemí nebo vodou do interferencí ohrožené soustavy.

Ve všech případech musí být zařízení upravena tak, aby byl k dosažení požadovaného cíle použit minimální proud [19].

### 3.3.1 Polarizovaná elektrická drenáž

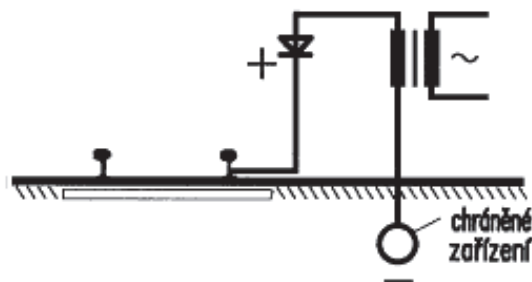


Obrázek 3.2: Polarizovaná elektrická drenáž, převzato z ČSN EN 50122-2

Jestliže to dovoluje umístění ohroženého/chráněného zařízení a potenciál kolejnic je dostatečně velký (v případě použití diod musí být potenciál větší než prahové napětí) a většinou negativní, je možné bludný proud přivést zpět do místa vzniku (do zpětného trakčního vedení).

### 3.3.2 Aktivní drenáž

V některých velmi výjimečných případech je možné použít metodu aktivní drenáže. Je to systém s nuceným proudem, kde kolejnice jsou anodou. Pokud je tato metoda použita, je nutné omezit proud drenáže, zvláště v hustě osídlených oblastech.



Obrázek 3.3: Polarizovaná elektrická drenáž, převzato z ČSN EN 50122-2

## 4 Metodika a vyhodnocení korozní odolnosti potrubí z tvárné litiny s ochrannou z cementové malty

Pravděpodobnost korozního ohrožení existujících nebo projektovaných potrubí se zjišťuje korozním průzkumem. Účelem korozního průzkumu je určení fyzikálních, fyzikálně-chemických, chemických, geologických, popř. jiných upřesňujících údajů (geoelektrické, hydrologické, apod.), podle nichž se upřesňuje trasa potrubí a navrhuje nebo doplňuje se způsob ochrany proti korozi [20]. Norma ČSN 03 8375 definuje tři typy korozních průzkumů:

- základní korozní průzkum,
- dodatečný korozní průzkum,
- kontrolní korozní průzkum.

Pro bližší představu o vlastnostech půdy v prostoru našeho pokusného proudového pole provedeme v souladu s normou ČSN 03 8375 základní korozní průzkum v rozsahu těchto úkonů:

1. stanovení zdánlivého měrného odporu půdy (rezistivity půdy),
2. zjištění geologické stavby a hydrologického režimu,
3. určení měrné elektrické vodivosti podzemních vod, chemický rozbor zemin a vod, obsah vlhkosti v zeminách, hodnota  $pH$ .

## 4.1 Půda jako korozní prostředí v místě pokusného pole

Úložná zařízení a liniové stavby se dostávají nejčastěji do kontaktu s půdním prostředím. V takovém prostředí se principy (zákonitosti) vzniku a působení korozních článků příliš neliší od jiných elektrolytů. Půda se od čistě vodných elektrolytů odlišuje svojí nesterodností. Jedná se o nehomogenní prostředí složené z mechanických, fyzikálních i chemických částí. Korozní agresivita půdy se odhaduje na základě mnoha kritérií. Mezi nevýznamnější patří její typ a soudržnost, homogenita, vlhkost, chemické složení půdního elektrolytu (včetně plynů), pH a redox potenciál, tlumivá kapacita, rezistivita a kolísání hladiny spodní vody. Bez přítomnosti vlhkosti v půdě by korozní napadení kovových materiálů nemohlo probíhat. Půda je prostředí, ve kterém se vyskytují póry a kapiláry, které dávají půdě schopnost vodu propouštět nebo zadržovat. Písčité půdy, které dobře propouštějí vodu jsou méně agresivní oproti jílovitým půdám, které vodu zadržují. (Při vysušování jílovitých půd dochází na povrchu ke vzniku rozměrných trhlin, kterými do půdy proniká vzduch a voda ze srážek. V takových lokalitách mohou vznikat korozní články s rozdílným ovzdušněním (diferenční areací).

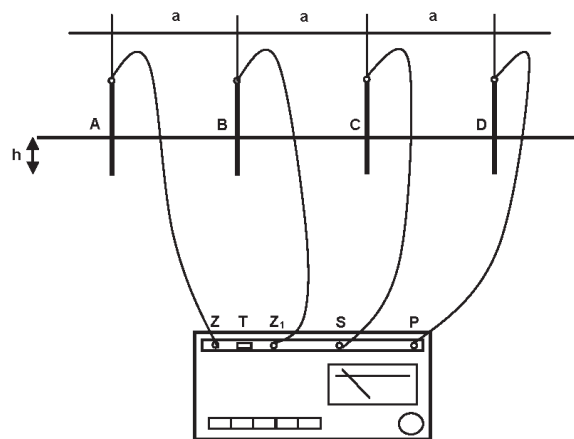
Kromě vody obsahuje půda i různé druhy a množství plynů. Výskyt plynů závisí na druhu půdy, hloubce, ročním období, množství atmosférických srážek, složení povrchových vod, činnosti mikroorganismů a na teplotě. Koncentrace kyslíku klesá se zvětšující se hloubkou, zvláště u jílovitých, močálovitých a bažinatých půd. V půdě vznikají korozní mikročlánky i makročlánky. Makročlánky vznikají zejména na liniových kovových konstrukcích, které procházejí půdami s různými fyzikálně-chemickými vlastnostmi.

### 4.1.1 Stanovení zdánlivého odporu půdy Wennerovou metodou

Zdánlivý odpor půdy patří k jednomu z ukazatelů, který udává míru agresivity půdy vůči konstrukcím, které degradují vlivem působení elektrochemické koroze. Mezi konstrukce nebo stavby patří zejména takové, jejichž základní stavební nebo konstrukční prvek sestává z kovových materiálů jako jsou ocel, litina, olovo a další kovy, které důsledkem působení elektrického proudu a jejich menší ušlechtilosti velmi snadno přecházejí z kovového do iontového stavu. V dokonale izolovaném prostředí tato reakce neprobíhá.

Rezistivita půdy se vyjadřuje v  $\Omega m$ . Číselně je to rezistance (elektrický odpor) v  $\Omega$  válce naplněného zeminou, jehož průřez je  $1 m^2$  a o délce  $1 m$ . Pro určení měrného odporu půdy využijeme čtyřbodovou metodu tzv. Wennerovu metodu. Jedná se v praxi o hojně používanou metodu založenou na odporovém měření. Touto metodou neměříme přímo měrný odpor, nýbrž tzv. zdánlivý měrný odpor půdy, což je průměrný měrný odpor půdy měřené vrstvy. Půda není homogenní hmota, a proto měrný odpor nemá stejnou hodnotu ve všech místech podél liniových staveb. Velmi záleží na složení půdy, převážně na obsahu rozpuštěných solí a podílu obsažené vody. V našem případě, kdy vytváříme umělé pokusné proudové pole na malé ploše, provedeme stanovení měrného odporu půdy před zahájením zeminých prací a také po uložení vzorků trub do země a následném zahrnutí zeminou. V místě pokusného pole je vysoká hladina spodní vody. Předpokládáme, že vlastnosti prostředí se po ukončení zeminých prací ustálí velmi rychle do původního stavu, neb je zde rezistivita půdního elektrolytu tvořena převážně vysokou půdní vlhkostí. Odporové měření Wennerovou metodou spočívá v měření proudu a potenciálu mezi čtyřmi ocelovými elektrodami (sondami) zaraženými do země do určité hloubky ve stejné vzdálenosti od sebe zaražené v jedné přímce. Princip uspořádání sond a zapojení měřicího přístroje je na Obrázku 4.1.

Vnější sondy  $A$  a  $D$  jsou proudové, vnitřní sondy  $B$  a  $C$  jsou napětové. Elektrody jsou zaražené do země do hloubky  $h_z = 0,2 m$  s rozstupem  $a = 1 m$ . Základní podmínkou přesného měření je dodržení stejných vzdáleností  $AB$  a  $CD$ .



Obrázek 4.1: Měření měrného odporu Wennerovou metodou

Zdánlivý odpor půdy je definován vztahem:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (4.1)$$

$\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] rezistivita půdy,

$a$  [m] vzdálenost elektrod,

$R$  [ $\Omega$ ] odečtená hodnota odporu z přístroje.

Takto stanovená hodnota rezistivity je střední rezistivita půdy do hloubky rovné přibližně rozestupu sond  $a$ . Tato hodnota kolísá v průběhu roku průměrně o 10 - 20 % vlivem teploty a vlhkosti půdy. Pro dosažení roční hodnoty zdánlivého měrného odporu půdy doporučuje ČSN 03 8363 vynásobit naměřenou hodnotu korekčním činitelem příslušejícího měsíce, ve kterém bylo měření provedeno [21].

Měsíce	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
<b>Korekční činitel</b>	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9

Tabulka 4.1: Korekční činitele pro zpřesňování naměřených hodnot měrného odporu půdy, převzato z ČSN 03 8363

Dle ČSN 33 2000-5-54 ed. 3 se korekčním činitelem vyloučí vliv kolísání odporu půdy v závislosti na ročním období do hloubky 3 m. Hodnoty zemního odporu půdy jsou uvedené níže v tabulkách,  $\rho_1$  je hodnota zemního odporu půdy vynásobená korekčním činitelem. Tabulka 4.2 udává obvyklé hodnoty rezistivity dle charakteru půdy. Z měření Wennerovou metodou a z optického posouzení jednotlivých složek půdy jsem usoudil, že v hloubkách od jednoho metru začíná půda převážně **hlinitá**, ve větších hloubkách půda spíše **jílovitá**.

Charakter půdy	Rezistivita ( $\Omega m$ )
Bažinatá půda	Od několika do 30
Naplaveniny	20 až 100
Humus, prst	10 až 150
Vlhká rašelina	5 až 100
Tvárný jíl	50
Vápenatý a kompaktní jíl	100 až 200
Jurský jíl	30 až 40
Jílovité písky	50 až 500
Křemenné písky	200 až 3000
Holé kamenité půdy	1500 až 3000
Zatravněné kamenité půdy	300 až 500
Měkký vápenec	100 až 300
Kompaktní vápenec	1000 až 5000
Rozpukaný vápenec	500 až 1000
Břidlice	50 až 300
Mikanitová břidlice	800

Tabulka 4.2: Hodnoty rezistivity půdy, převzato z ČSN EN 33 2000-5-54 ed. 3



#### 4.1.1.1 Změřené hodnoty měrného odporu půdy v místě pokusného pole

Měření vlastního zemního odporu půdy jsme provedli přístrojem Metra PU 430, který je k tomuto měření vhodný především proto, že dokáže vyloučit chyby vzniklé polarizací elektrod při použití stejnosměrného proudu. Přístroj pracuje s kmitočtem měřicího proudu odlišným od obvyklého síťového kmitočtu a jeho násobků.

##### Datum měření 14.11.2013

Vzdálenost elektrod $a$ (m)	$R$ ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	4,7	29,5	26,5
1,5	3	28,2	25,4
2	2,2	28,5	25,6
3	1,0	18,8	16,9

Tabulka 4.3: Hodnoty zemního odporu půdy v místě pokusného pole

##### Datum měření 3.4.2014

Vzdálenost elektrod $a$ (m)	$R$ ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	7,3	45,8	45,8
2	2,4	30,1	30,1

Tabulka 4.4: Hodnoty zemního odporu půdy v místě pokusného pole

##### Datum měření 30.6.2014

Vzdálenost elektrod $a$ (m)	$R$ ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	6,8	42,7	55,5
2	2,1	26,3	34,2

Tabulka 4.5: Hodnoty zemního odporu půdy v místě pokusného pole

##### Datum měření 27.10.2014

Vzdálenost elektrod $a$ (m)	$R$ ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )
0,5	14	43,9	43,9
1	6,5	40,8	40,8
1,5	3	28,6	28,6
2	1,8	22,6	22,6

Tabulka 4.6: Hodnoty zemního odporu půdy v místě pokusného pole

#### 4.1.1.2 Zjištění geologické stavby a hydrologického režimu

V místě pokusného pole jsou navezené vrstvy zeminy, jejich složení je značně různorodé. Ukázka rozložení jednotlivých vrstev do jednoho metru je na Obrázku 4.2. Do hloubky cca. 40 cm jsou vrstvy s obsahem písku, následuje vrstva jílu. Od hloubky cca. 50 cm převládají humusové složky s vysokým podílem složky jílu. V místě pokusného pole je vysoká hladina spodní vody, která je patrná z fotografií. I přes dlouhodobě suché počasí se výkop začal rychle plnit spodní vodou. Výskyt vysoké hladiny spodní vody doplňují výsledky z měření rezistivity půdy, podle kterých lze stanovit dle ČSN 03 8375 agresivitu prostředí jako zvýšená agresivita, neboli stupeň III.



Obrázek 4.2: Struktura půdy v místě pokusného pole

## 4.2 Předpoklady chování zkoušeného zařízení, stanovení ochranných vlastností cementové malty

Železo uloženo v cementové maltě nebo v betonu se nachází v *pasivním stavu*. Hodnota  $pH$  v alkalickém prostředí betonu se pohybuje okolo 12,5 - 13,5. V takovém prostředí koroze oceli nemůže probíhat. Pasivita oceli se může ztratit vlivem přístupu dostatečného množství chloridových iontů nebo skrze reakci cementové malty s  $CO_2$ . Na povrch litinových trub je nanášena žárovým zinkováním vrstva zinku v množství  $200 \text{ g/m}^2$ . Ačkoliv má zinek jisté pozitivní vlastnosti v protikorozní ochraně, zvláště pak v prostředí bez bludných proudů, v tomto případě brání vytvoření ochranné pasivní vrstvy mezi cementovým obalem a litinou. To, jestli vstoupí bludný proud do potrubí, či nikoliv, je otázka mnoha faktorů, mezi které zřejmě patří: vodivosti nasáklého betonu, použití jištěného nebo nejištěného spoje, délky potrubí a s tím spojené Kirchhoffovy zákony. V oblastech s vysokou hustotou bludných proudů nemusí tyto proudy potrubí s OCM vůbec napadnout, naopak mohou napadnout dlouhý vodovodní přivaděč, pokud k tomu budou vhodné podmínky a dostatečný úbytek napětí. Hydroxid obsažený v betonu zajišťuje v kontaktu s vodou jeho vodivost vnitřním elektrolytem. Potrubí s těžkou protikorozní ochranou tvořenou OCM vystavíme úmyslně anodické polarizaci. Anoda bude v tomto případě kladná, protože se jedná o elektrolyzér. Najdeme si typickou hodnotu, která reprezentuje bludný proud, tzn. hodnoty v jednotkách ampér. Budeme zvyšovat napětí a sledovat, jaký proud bude při jakém napětí protékat. Budeme sledovat potenciál potrubí - půda. Potenciál se měří ve stejném elektrolytu, což je půdní elektrolyt, potenciální rozdíl mezi kovovou fází a srovnávací elektrodou  $Cu/CuSO_4$ , která je ponořena v elektrolytu. Nás zajímá vypínací potenciál, který nám vyloučí složku IR spádu. Vypínací potenciál se zpravidla měří mezi elektrodou a kovem úložného zařízení. Měření zde bude trochu zkreslené, protože je zde vrstva zinku, takže nebudeme měřit mezi elektrodou a železem, ale mezi elektrodou a zinkem. Rozpouštění zinku v anodickém místě bude ještě rychlejší, než rozpouštění samotného železa. Anodické místo, při dostatečném přísunu vody, se nám začne okyselovat. Půdní elektrolyt způsobí, že nám začne  $pH$  klesat. Vzhledem k velmi vysoké vlhkosti ve zdejších prostředí budeme sledovat, jestli vrstva zinku zabráni tzv. podkorodování v místech neporušeného obalu. Zinek je schopen fungovat jako obětovaná anoda, poruchy povlaku je schopen katodicky chránit, svojí korozi „vyčytává“ kyslík. Ochrana v prostředí bez bludných proudů je zcela jednoznačná. Na anodickém místě se bude přednostně rozpouštět a oxidovat zinek. Bude nabývat v důsledku korozních produktů, dále se bude přeměňovat železo na dvojmocné a trojmocné a bude se vylučovat

kyslík. Může dojít důsledkem korozních produktů k porušení kompaktnosti celku ochranného obalu z cementové malty? Bludné proudy se odehrávají v úzkých poruchách povlaku, ve kterých není problém s odvodem korozních produktů. V našem případě je plocha OCM rovnoměrně rozložena, máme zde určitou porozitu po celé délce. Předpokládáme, že se anodické pásmo rozprostře na velkou vzdálenost, tzn. že účinek bludných proudů nemůže být lokalizovaný. Proto jsme pro srovnání uměle vytvořili kruhové poškození obalu OCM o průměru 5 cm, tedy ploše přibližně 20 cm<sup>2</sup> a budeme porovnávat stav s místy neporušenými, převážně na koncích trub a s hrdlovými spoji. Množství prošlého náboje lze porovnat s hodnotami pro bludné proudy v praxi reálnými a odhadnout životnost v dlouhodobém horizontu.

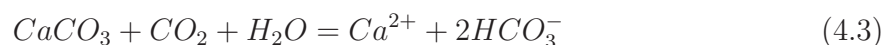
Kromě elektrochemické koroze stejnosměrnými proudy přichází v úvahu i možné korozní napadení karbonatací obalu OCM.

#### Koroze malty nebo betonu vlivem uhličitánových kyselin

Voda s velmi nízkým obsahem vápníku vykazuje zvýšenou koncentraci CO<sub>2</sub>. V takovém prostředí je cementová malta napadána nejdříve karbonatací vyjádřenou rovnicí:



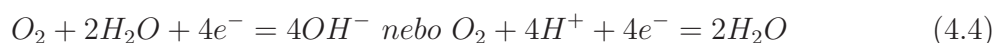
Následně probíhá *odvápňování* dle rovnice:



Z těchto dvou reakcí způsobuje pouze odvápňovací reakce měknutí a poškození cementové malty, mohou se objevit prasklinky, které způsobí ztrátu přilnavosti k litině.

#### Koroze železa v cementové maltě

Vlivem karbonatace a po vniknutí chloridových iontů dochází k aktivaci železa, které může korodovat. V případě, že je cementová malta plně obklopena vodou, je difúze kyslíku ve vlhké maltě extrémně malá, korozní odolnost je tím vysoká, protože katodická dílčí reakce podle



neprobíhá. Z tohoto důvodu není snížena ochranná funkce cementového obalu ani v důsledku karbonatace, ani v důsledku proniknutí chloridových iontů.

Ohrožení obalu spočívá při anodické polarizaci vlivem přístupu kyslíku, který při zapla-

vení pórů v plynné fázi nemůže do obalu vstupovat. Silná koroze probíhá na rozhraní zón *voda/ vzduch*, na kterém se tvoří korozní produkty, které mohou poškodit ochranný obal. Na tento děj má příznivý vliv pozinkování železa, protože působí jako galvanická anoda, která odstraňuje vnitřní tvorbu prvků. Ochranný účinek působí dočasně v závislosti na tloušťce zinkové vrstvy. Působením bludných proudů vznikají v anodickém pásmu kyseliny, které neutralizuje alkalita (CaO) cementové malty jen do času, než se vyčerpá veškerý oxid vápenatý.

#### 4.2.1 Stanovení izolačního odporu trub s obalem z cementové malty

Základní ochranou kovových částí úložných zařízení proti působení bludných proudů je pokrytí těchto zařízení materiálem s velkým izolačním odporem. Takto chráněné zařízení není v ideálním případě bludnými proudy napadeno vůbec, protože vysoký izolační odpor zabránilo prostupu bludných proudů do kovového materiálu.

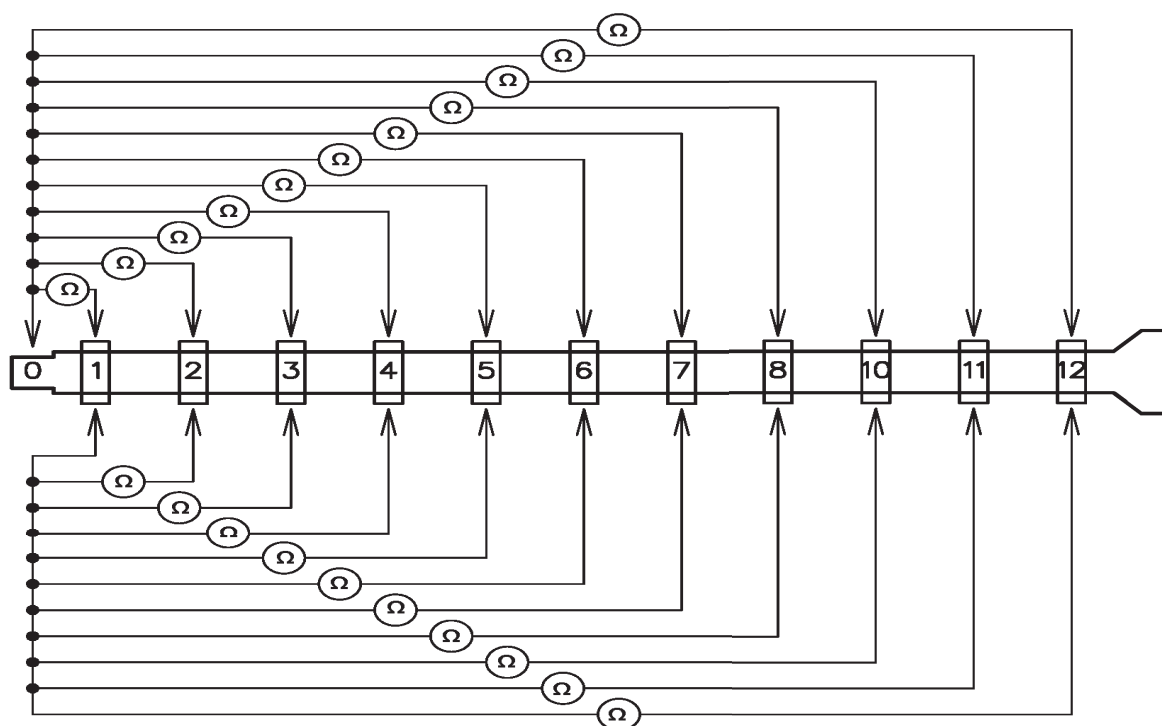
Izolační odpor jsme zkoumali na trubce, která má nosnou část tvořenou z tvárné litiny. Vnitřní prostor trubky tvoří cementová vystýlka, která přichází přímo v kontakt s pitnou vodou. Vnější část tvoří těžká protikorozi ochrana, obal z cementové malty, který je stažen plastickou síťovinou. Obal vypadá opticky jako velmi homogenní a kompaktní, zjevně bez známek prasklin či poruch. Domnívám se, že homogenita a pórovitost OCM přímo ovlivňuje nasákavost neboli pronikání vody do obalu. Tím se zvyšuje jeho elektrická vodivost jinak téměř nevodivého betonu a snižuje se ochrana proti pronikání bludných proudů do litinového jádra a tím i životnost potrubního systému.

##### 4.2.1.1 Použité měřicí přístroje a pomůcky

- Měřicí přístroj METRA PU 187.1 k měření izolačních odporů,
- měřicí objímky zhotovené z plechu o šířce 6,5 cm, celkové ploše 200 cm<sup>2</sup>.

#### 4.2.1.2 Měřicí pracoviště

Trubka o délce 6 m byla umístěna na dřevěných podstavcích. Pro zajištění stykové plochy 200 cm<sup>2</sup> jsme si připravili objímky z plechu, které jsme okolo trubky pevně stáhli páskou. Pro zajištění přibližně stejných podmínek přechodu mezi objímkou a OCM, byl pod objímku umístěn ještě namočený hadr stejně široký jako objímka. Hodnoty změřených izolačních odporů jsou spjaty s plochami objímek 200 cm<sup>2</sup>. Celková styková plocha trouby dimenze DN 80 s půdním elektrolytem odpovídá přibližně válci o ploše 1,84 m<sup>2</sup>, čili 92x větší ploše oproti měřicí objímce. Hodnota izolačního odporu vztažená k této ploše bude 92x menší. S vyššími dimenzemi trub roste styková plocha s elektrolytem, klesá hodnota izolačního odporu a roste proudová hustota bludného proudu, který by teoreticky vstoupil do potrubí. K měření jsme použili přístroj pro měření izolačních odporů Metra PU 187.1. Izolační odpor jsme měřili vždy při 1000 V. Schema zapojení měřícího pracoviště je na Obrázku 4.3. Měření probíhalo ve dvou krocích. Ve změření izolačního odporu OCM proti litinovému jádru a ve změření izolačního odporu OCM proti OCM proti počáteční objímce (bod 1). Takto jsme změřili trubku suchou namočenou a trubku před měřením tři týdny trvale ponořenou ve vodě.



Obrázek 4.3: Schema zapojení měřicího pracoviště příčného izolačního odporu a podélné vodivosti ochranného obalu z cementové malty



Obrázek 4.4: Ukázka provedení kovové objímky pro měření izolačního odporu OCM



## 4.2.2 Výsledky měření přechodového odporu obalu z cementové malty

### 4.2.2.1 Suchá trubka

Tabulka naměřených hodnot izolačního odporu. Měření probíhalo při teplotě 21 °C v suchém skladu. Pro měření jsme zvolili hodnotu zkušebního napětí vždy 1000 V.

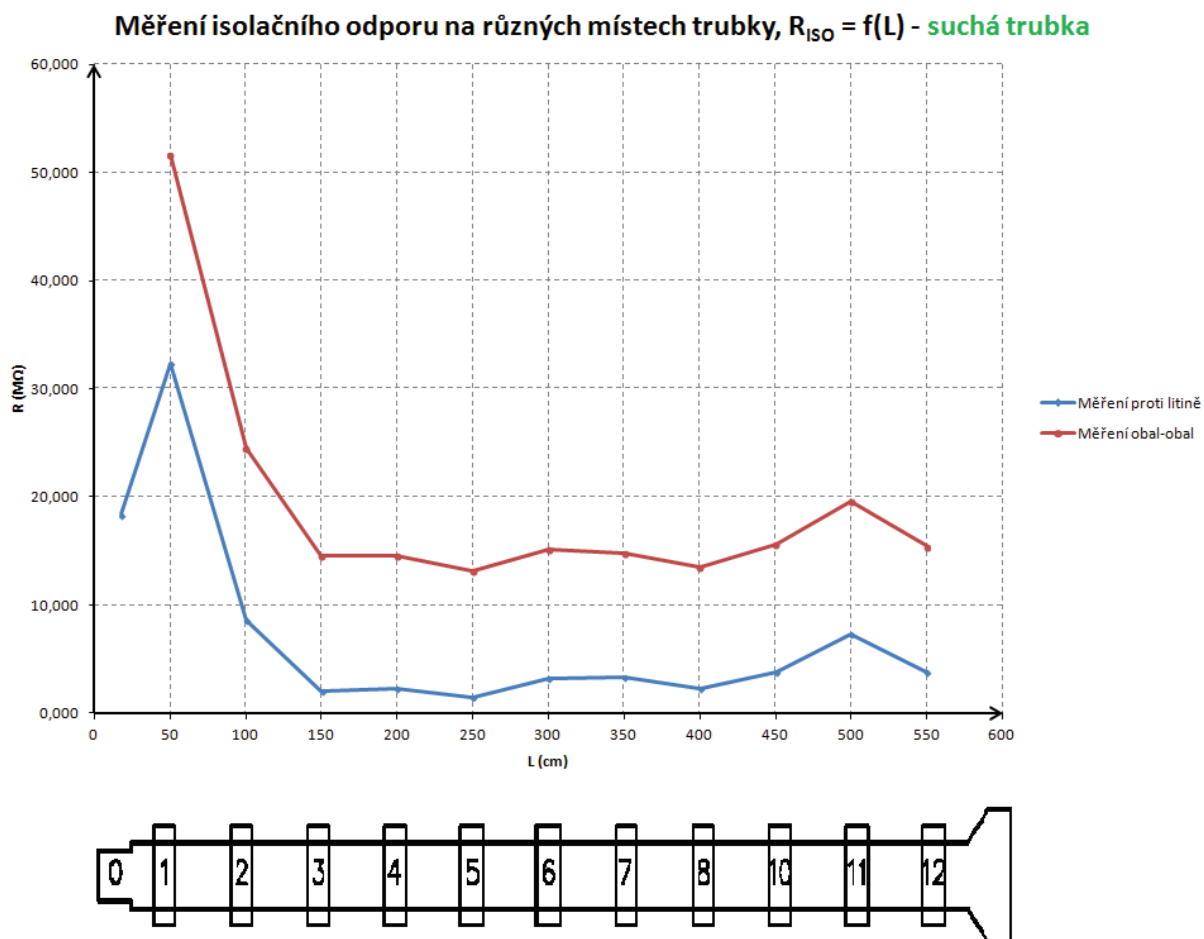
L (cm)	Měření proti litině		Měření OCM – OCM	
18	R <sub>ISO01</sub> [MΩ]	18,37	-	-
50	R <sub>ISO02</sub> [MΩ]	32,30	R <sub>ISO12</sub> [MΩ]	51,60
100	R <sub>ISO03</sub> [MΩ]	8,58	R <sub>ISO13</sub> [MΩ]	24,50
150	R <sub>ISO04</sub> [MΩ]	2,01	R <sub>ISO14</sub> [MΩ]	14,51
200	R <sub>ISO05</sub> [MΩ]	2,26	R <sub>ISO15</sub> [MΩ]	14,54
250	R <sub>ISO06</sub> [MΩ]	1,47	R <sub>ISO16</sub> [MΩ]	13,11
300	R <sub>ISO07</sub> [MΩ]	3,21	R <sub>ISO17</sub> [MΩ]	15,12
350	R <sub>ISO08</sub> [MΩ]	3,30	R <sub>ISO18</sub> [MΩ]	14,84
400	R <sub>ISO09</sub> [MΩ]	2,23	R <sub>ISO19</sub> [MΩ]	13,54
450	R <sub>ISO10</sub> [MΩ]	3,75	R <sub>ISO110</sub> [MΩ]	15,63
500	R <sub>ISO11</sub> [MΩ]	7,31	R <sub>ISO111</sub> [MΩ]	19,62
550	R <sub>ISO12</sub> [MΩ]	3,76	R <sub>ISO112</sub> [MΩ]	15,43

Tabulka 4.7: Konkrétní hodnoty izolačního odporu OCM, měřené v bodech po 50 cm

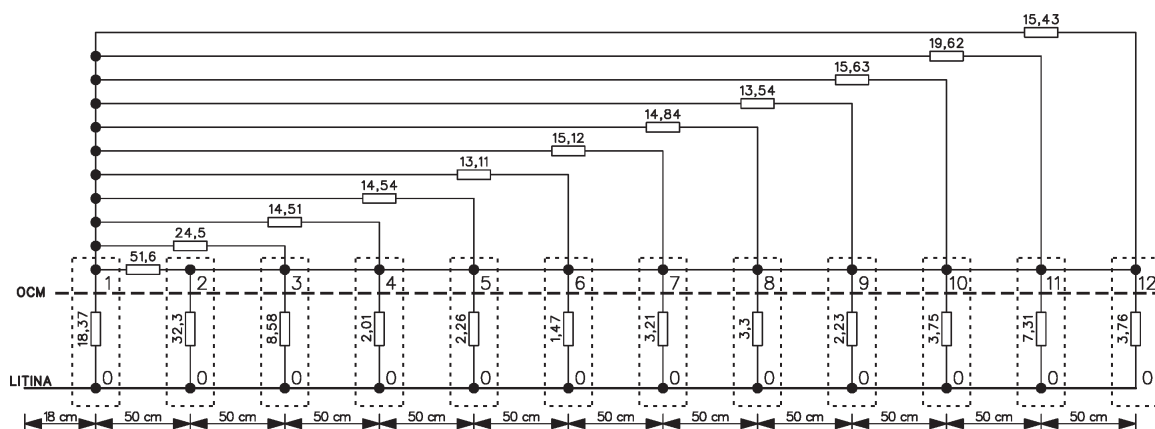


Obrázek 4.5: Měřicí přístroj METRA PU 187.1 k měření izolačních odporů do hodnoty 20 GΩ





Obrázek 4.6: Naměřené hodnoty isolačního odporu OCM vynesené do grafu v závislosti na délkové souřadnici



Obrázek 4.7: Příčný a podélný odpor suchého obalu z cementové malty

#### 4.2.2.2 Mokrý trubka

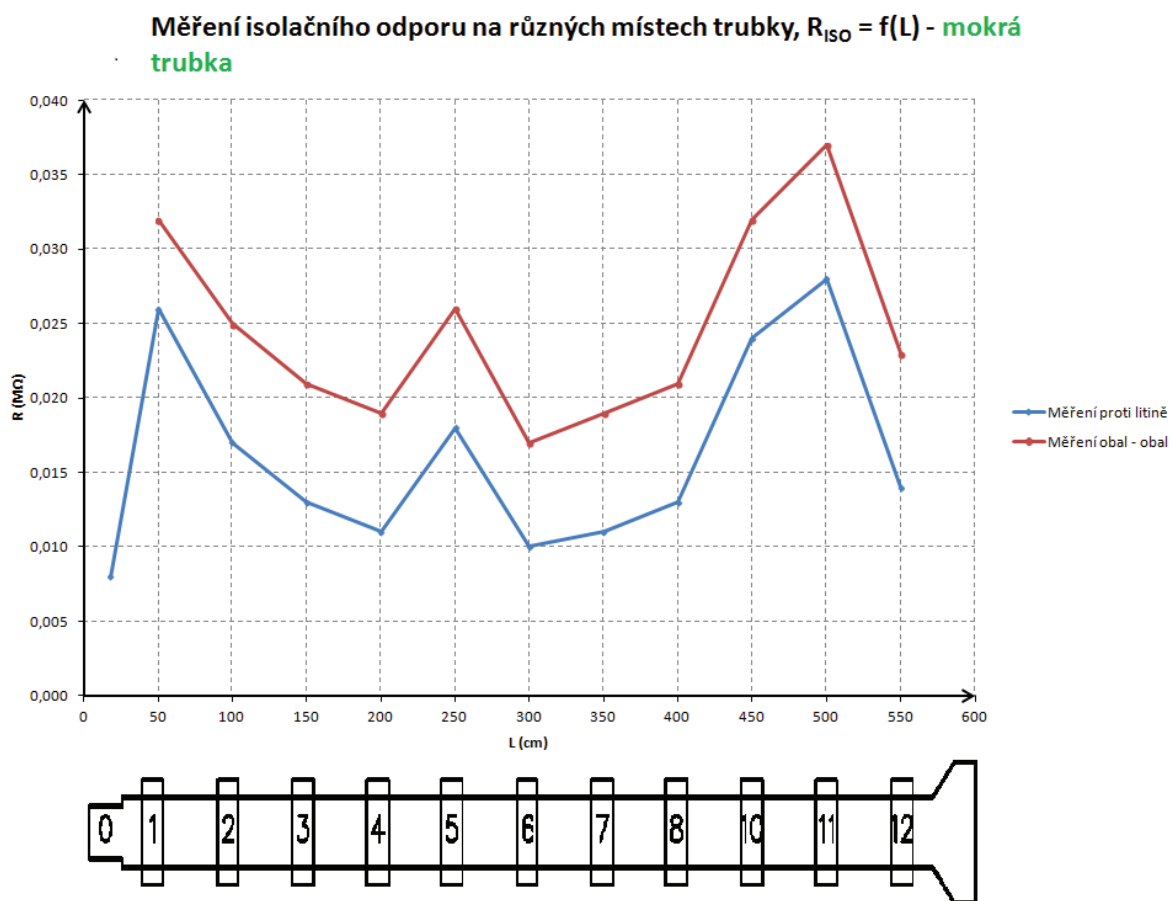
Tabulka naměřených hodnot izolačního odporu. Měření probíhalo při teplotě 12 °C ve venkovním prostředí. Pro měření jsme zvolili hodnotu zkušebního napětí vždy 1000 V. Trubka byla polévána vodou po celé své délce. V průběhu měření jsme trubku již nepolévali, aby zde nedošlo ke zkreslení měření. Hodnoty jsme se snažili odečítat co možná nejdříve.

L (cm)	Měření proti litině		Měření OCM – OCM	
18	R <sub>ISO01</sub> [MΩ]	0,008	-	-
50	R <sub>ISO02</sub> [MΩ]	0,026	R <sub>ISO12</sub> [MΩ]	0,032
100	R <sub>ISO03</sub> [MΩ]	0,017	R <sub>ISO13</sub> [MΩ]	0,025
150	R <sub>ISO04</sub> [MΩ]	0,013	R <sub>ISO14</sub> [MΩ]	0,021
200	R <sub>ISO05</sub> [MΩ]	0,011	R <sub>ISO15</sub> [MΩ]	0,019
250	R <sub>ISO06</sub> [MΩ]	0,018	R <sub>ISO16</sub> [MΩ]	0,026
300	R <sub>ISO07</sub> [MΩ]	0,01	R <sub>ISO17</sub> [MΩ]	0,017
350	R <sub>ISO08</sub> [MΩ]	0,011	R <sub>ISO18</sub> [MΩ]	0,019
400	R <sub>ISO09</sub> [MΩ]	0,013	R <sub>ISO19</sub> [MΩ]	0,021
450	R <sub>ISO10</sub> [MΩ]	0,024	R <sub>ISO110</sub> [MΩ]	0,032
500	R <sub>ISO11</sub> [MΩ]	0,028	R <sub>ISO111</sub> [MΩ]	0,037
550	R <sub>ISO12</sub> [MΩ]	0,014	R <sub>ISO112</sub> [MΩ]	0,023

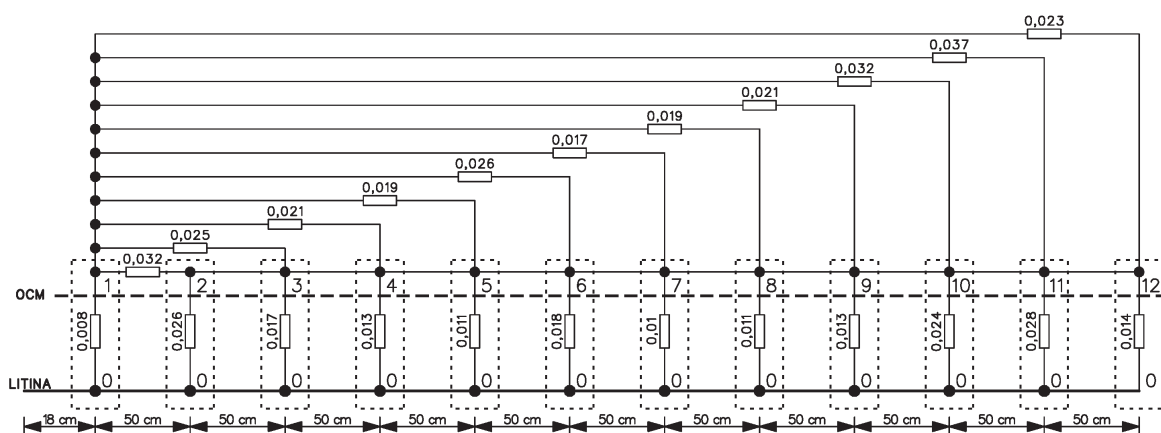
Tabulka 4.8: Konkrétní hodnoty izolačního odporu OCM při částečně namočené trubce, měřeno v bodech s krokem po 50 cm

L (cm)	Měření proti litině		Měření OCM – OCM	
25	R <sub>ISO01</sub> [MΩ]	0,001	-	-
50	R <sub>ISO02</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO12</sub> [MΩ]	0,001
100	R <sub>ISO03</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO13</sub> [MΩ]	0,001
150	R <sub>ISO04</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO14</sub> [MΩ]	0,001
200	R <sub>ISO05</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO15</sub> [MΩ]	0,001
250	R <sub>ISO06</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO16</sub> [MΩ]	0,0015
300	R <sub>ISO07</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO17</sub> [MΩ]	0,001
350	R <sub>ISO08</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO18</sub> [MΩ]	0,001
400	R <sub>ISO09</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO19</sub> [MΩ]	0,001
450	R <sub>ISO10</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO110</sub> [MΩ]	0,001
500	R <sub>ISO11</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO111</sub> [MΩ]	0,001
550	R <sub>ISO12</sub> [MΩ]	0,001	R <sub>ISO112</sub> [MΩ]	0,001

Tabulka 4.9: Konkrétní hodnoty izolačního odporu OCM při zcela namočené trubce ve vodě, měřeno v bodech s krokem po 50 cm

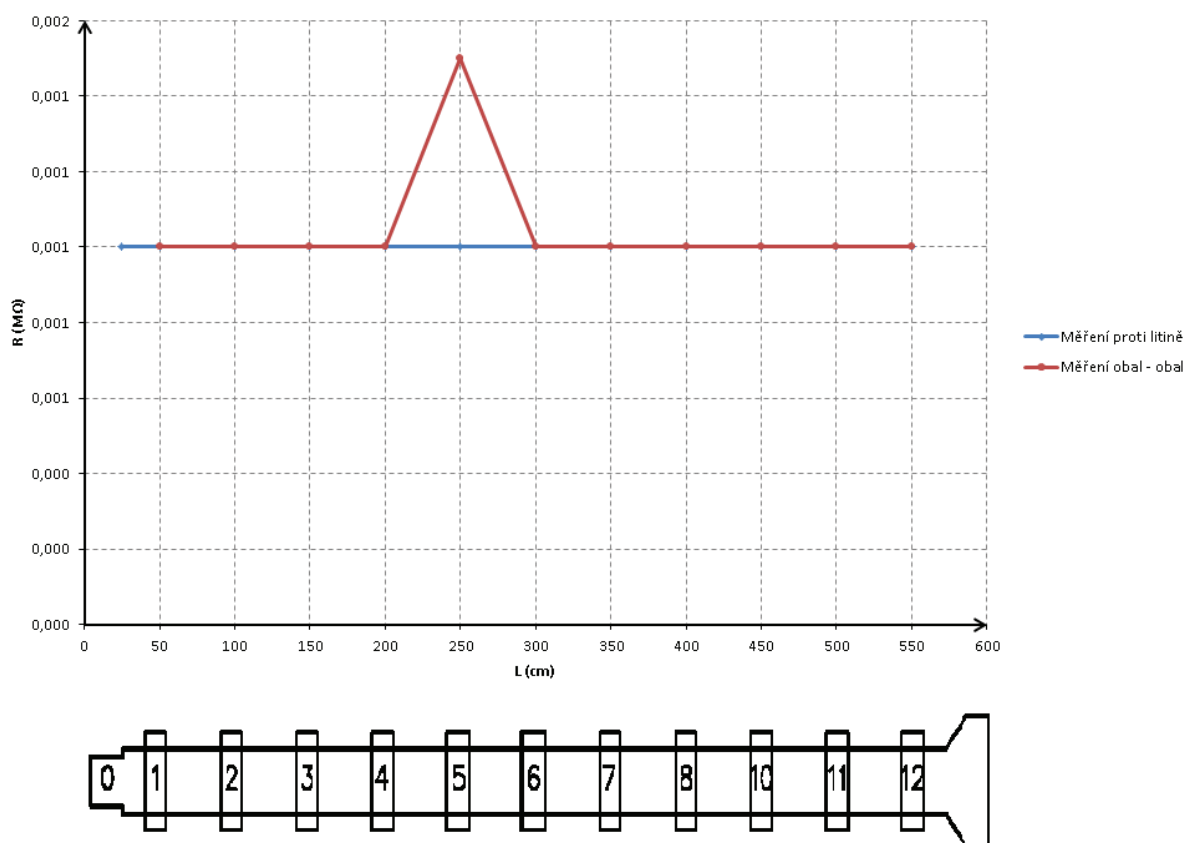


Obrázek 4.8: Změřené hodnoty izolačního odporu částečně namočeného OCM, vynesené do grafu v závislosti na délkové souřadnici

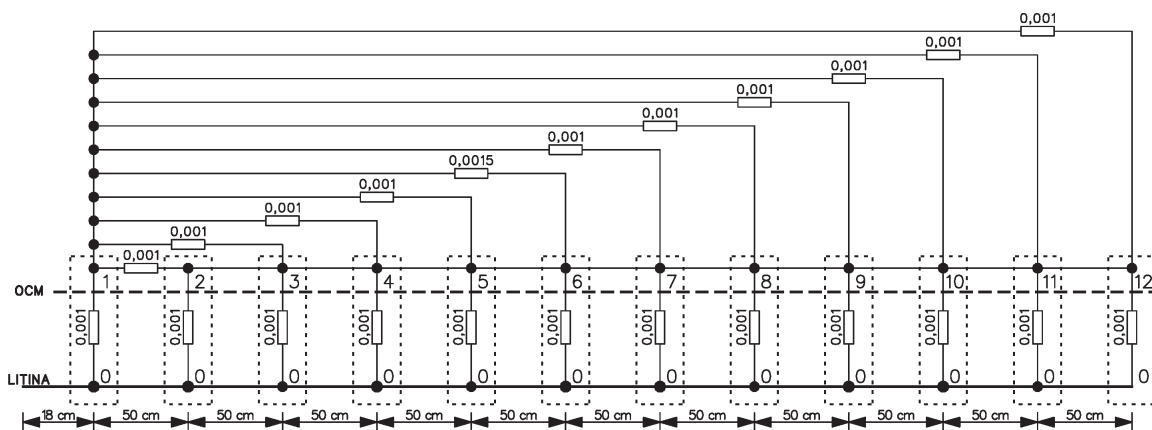


Obrázek 4.9: Příčný a podélný odpor částečně namočeného obalu z cementové malty

Měření izolačního odporu na různých místech trubky,  $R_{ISO} = f(L)$  - mokrá trubka, trvale ponořena ve vodě



Obrázek 4.10: Změřené hodnoty izolačního odporu zcela namočeného OCM, vynesené do grafu v závislosti na délkové souřadnici



Obrázek 4.11: Příčný odpor a podélná vodivost zcela namočeného obalu z cementové malty

Z naměřených hodnot izolačního odporu OCM lze usoudit dva závěry. Konce trub a střed mají o něco větší tloušťku cementové ochranné malty, křivky prvních dvou grafů vykazují ke konci a uprostřed stoupající charakter. Toto je dáno výrobní technologií, při které je vrstva cementové malty nanášena na otáčející se podepřenou rouru, na jejíž konce je nanášeno více malty otáčením a ve středu trub dochází k průhybu. Pro ověření předpokladu snížení hodnoty izolačního odporu vlivem nasákavosti OCM jsme nechali vzorek trub ponořený tři týdny před měřením zcela pod vodou. Potvrdilo se, že poté obal z cementové malty vykazuje ve všech místech stejný izolační odpor  $0,1 M\Omega$ . Z Obrázku 4.10 si lze povšimnout, že podélný odpor se vůbec neuplatňuje, protože hodnota příslušného podélného odporu se přibližně rovná součtu příčného odporu v měřeném bodě s hodnotou příčného odporu v bodě 01. Obal z cementové malty podélně elektrický proud nevede. Vysokopecní beton tvořící OCM je vzhledem ke své pevnosti v tlaku prakticky izolant, lze předpokládat, že změřenou hodnotu izolačního odporu  $0,001 M\Omega$  tvoří rezistivita resp. vodivost vody penetrované v OCM. Vztah pro elektrický odpor vyjádřený pomocí rezistivity odpovídá teoretickému odporu v  $\Omega$  válce materiálu o ploše  $1 m^2$  a délce  $1 m$ , vztah 4.5:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad , \quad \rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (4.5)$$

$R [\Omega]$  elektrický odpor,

$\rho [\Omega m = \Omega \cdot \frac{m^2}{m}]$  rezistivita,

$l [m]$  délka,

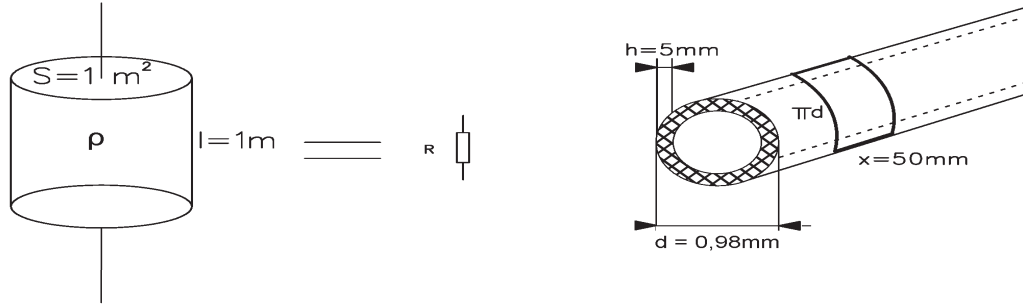
$S [m^2]$  plocha.

Z hodnot naměřeného izolačního odporu a z plochy měřících objímek, upravíme vztah pro rezistivitu, dle Obrázku 4.12, do podoby pro rezistivitu OCM, pro nejmenší hodnotu  $R_{ISO}$  z prvního měření:

$$\rho_{OCM} = R_{ISO} \cdot \frac{S_{DN80}}{l_{OCM}} = R_{ISO} \cdot \frac{\pi d \cdot x}{h} = 1,47 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,098 \cdot 0,065}{0,005} = 5,88 \cdot 10^6 \Omega m \quad (4.6)$$

pro nejmenší hodnotu  $R_{ISO}$  ze druhého měření:

$$\rho_{OCM} = R_{ISO} \cdot \frac{S_{DN80}}{l_{OCM}} = R_{ISO} \cdot \frac{\pi d \cdot x}{h} = 10000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,098 \cdot 0,065}{0,005} = 40000 \Omega m \quad (4.7)$$



Obrázek 4.12: Převedení rezistivity na plochu obalu z cementové malty

pro nejmenší hodnotu  $R_{ISO}$  ze třetího měření:

$$\rho_{OCM} = R_{ISO} \cdot \frac{S_{DN80}}{l_{OCM}} = R_{ISO} \cdot \frac{\pi d \cdot x}{h} = 1000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,098 \cdot 0,065}{0,005} = 4000 \Omega m \quad (4.8)$$

ve které, ze vztahu 4.5. odpovídá  $l_{OCM} \approx h$  a  $S(\pi r^2) \approx S_{OCM}(\pi dx)$ . Dosadíme-li vypočtenou hodnotu rezistivity OCM a plochu roury dimenze DN80 ( $1,84 \text{ m}^2$ ) do vztahu 1.2., dostaneme elektrický odpor obalu OCM celé roury pro nejhorší případ zcela ponořené trubky:

$$R_{DN80} = \rho_{OCM} \cdot \frac{h}{S_{DN80}} = 3140 \cdot \frac{0,005}{1,84} = 10,83 \Omega \quad (4.9)$$

Vynásobíme-li elektrický odpor obalu OCM celkovou plochou trouby, dostaneme plošný odpor dle vztahu:

$$R_i = R_{DN80} \cdot S_{DN80} = 10,83 \cdot 1,84 = 19,92 \Omega m^2 \quad (4.10)$$

Rezistivita pláště z OCM se pohybuje v rozmezí hodnot tří řádů. Ukazuje se, že ochranný obal určité dielektrické vlastnosti má a jsou silně závislé na vlhkosti okolního prostředí.

Konduktivita běžné pitné vody je  $40 \text{ mS/m}$ , převrácená hodnota, rezistivita vody je  $25 \Omega m$ . Prakticky se ukazuje, že vodné prostředí ovlivňuje rezistivitu obalu z cementové malty. Vzhledem k pevnosti použitého betonu pro výrobu OCM lze usuzovat, že vrstva malty samotná je prakticky nenasákavá. Sníženou rezistivitu OCM při ponoření do vody

mohou tvořit průsaky vody skrze póry v betonu, které dle [2] mohou být v rozmezí až 10 %. Celkový vypočtený odpor opláštování OCM jedné délky potrubí je úměrný jeho celkové ploše, zřetelné je to zvláště u vyšších dimenzí trub, viz. Tabulka 4.10., která pro vyráběné dimenze trub udává vypočtený celkový odpor opláštění OCM v závislosti na změřených izolačních odporech při různém stavu namočení trub.

Dimenze trub DN (mm)	D (mm)	$S_{celk}$ [m <sup>2</sup> ]	$R_{OCM1}$ [Ω]	$R_{OCM2}$ [Ω]	$R_{OCM3}$ [Ω]
DN 80	98	1,84	15923	108,3	10,8
DN 100	118	2,22	13224	89,9	8,9
DN 125	144	2,71	10836	73,7	7,3
DN 150	170	3,20	9179	62,4	6,2
DN 200	222	4,18	7029	47,8	4,7
DN 250	274	5,16	5695	38,7	3,8
DN 300	326	6,14	4786	32,5	3,2
DN 350	378	7,12	4128	28,0	2,8
DN 400	429	8,08	3637	24,7	2,4
DN 500	532	10,02	2933	19,9	1,9
DN 600	635	11,96	2457	16,7	1,6
DN 700	738	13,90	2114	14,3	1,4
DN 800	842	15,86	1853	12,6	1,2
DN 900	945	17,80	1651	11,2	1,1
DN 1000	1048	19,74	1489	10,1	1,0

Tabulka 4.10: Vypočtené celkové odpory OCM pro různé dimenze trub dle druhu prostředí



Obrázek 4.13: Návarek pro připojení vodičů ke zdroji DC proudu

## 4.3 Zvolené zapojení pokusného proudového pole

Pro posouzení korozní ochrany obalu z cementové malty jsme se rozhodli umístit čtyři vzorky trub spojené v potrubí a ukončené tvarovkami do reálného prostředí s elektrickými vlastnostmi a s půdním složením popsaným v odstavci 4.1.1.1 a 4.1.1.2. Tím se snažíme přiblížit prostředí a podmínky, co možná nejvěrněji, reálnému příkladu.

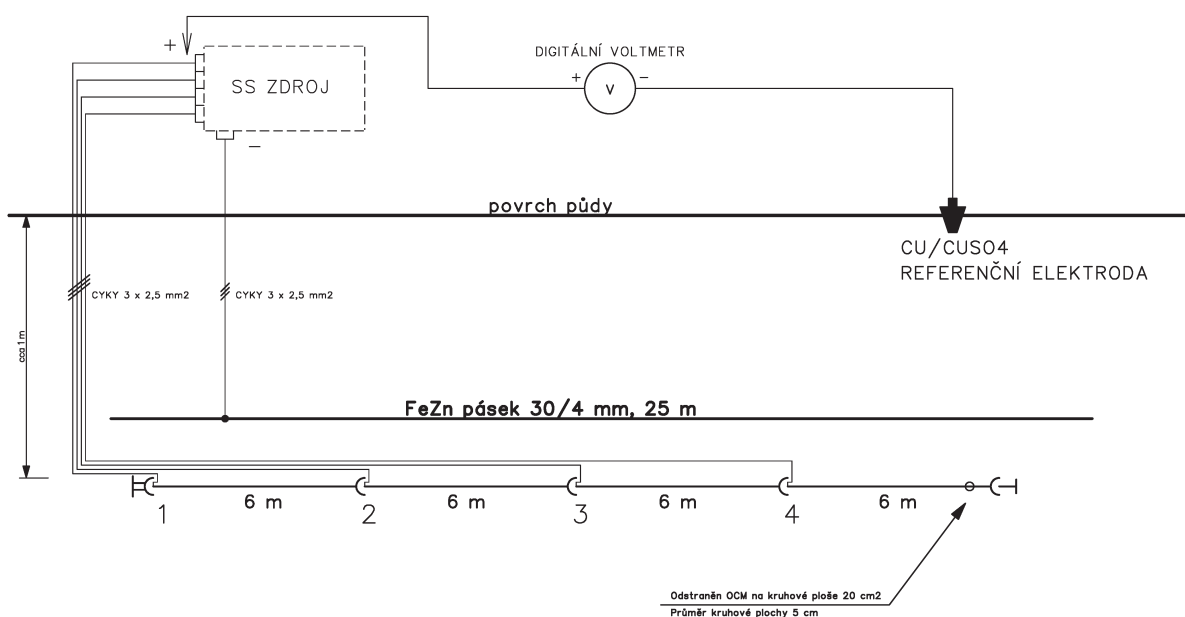
K přivedení stejnosměrného proudu do zkoušeného zařízení jsme si na konce trub DN 80 (konce, kde není hrdlo) řezným kotoučem vyřízli drážku ve tvaru „V“ a navařili šroub *M6* tak, že hlava šroubu je přivařena v drážce a dřík šroubu směřuje dovnitř trubky, viz. Obrázek 4.14. Na každý šroub jsou přišroubována tři kabelová oka s vyvedeným kabelem *CYKY – J 3 x 2,5 mm<sup>2</sup>*. Kabely z jednotlivých konců trub jsou vedeny uvnitř trub a přivedeny na svorkovnici stejnosměrného zdroje napětí. Celkově jsme takto spojili čtyři trubky. V hrdlových spojích jsme použili izolační gumová těsnění (standardně v praxi používaná) a změříme jejich skutečný přechodový odpor. Pitná voda s hodnotou běžné rezistivity  $25 \Omega m$  je schopna vést část bludného proudu skrze hrdla v závislosti na jejich vzájemném doražení, viz. Obrázek 4.3, však omezeně, protože volná část je chráněna bitumenem s izolačním odporem  $5,04 G\Omega$  a vnitřní část hrdla je chráněna epoxidem s izolačním odporem  $0,012 M\Omega$ , proto předpokládáme, že jednotlivé délky trub budou od sebe izolované, byť v prostředí s takto nízkou rezistivitou půdy lze předpokládat určitý přestup proudu od sousedních trub. Těsnění v hrdle je znázorněno šedivou barvou a modrou barvou je znázorněna oblast zaplavena vodou. Trubky budou naplněny čistou pitnou vodou, avšak nebudou natlakovány. Napětí stejnosměrného zdroje je možné volit v rozmezí 0 - 60 V.

### 4.3.1 Použité měřicí přístroje a pomůcky

- Regulovatelný stabilizovaný zdroj napětí 0 - 60 V, MATRIX MPS3003L3,
- klešťový ampérmetr s voltmetrem Voltcraft VC-531,
- ručkový miliampérmetr UNIMET,
- měřicí referenční elektroda  $Cu/CuSO_4$ .



## 4.3.2 Pokládka trub, měření počátečních parametrů



Obrázek 4.14: Schema zapojení pokusného proudového pole



Obrázek 4.15: Ukončení pokusného potrubí s vyvedením vodičů pro připojení DC proudu

Pro srovnání korozního napadení jsou hrdlové spoje chráněny převlečnými gumovými manžetami (v praxi používaných), poslední spoj zcela vpravo v blízkosti záměrného poškození izolace, je spoj nechráněn.

Po položení trub do půdního prostředí jsme změřili samovolný potenciál potrubí - půda jednotlivých trub pomocí elektrody  $Cu/CuSO_4$ . Měření bylo provedeno digitálním přístrojem Voltcraft VC531, + pól digitálního přístroje připojen na ocel, - pól na elektrodu. Hodnota potenciálu potrubí - půda, vyjadřuje potenciál povrchu kovu v místech vad, event. pórů v ochranné izolaci, tzn. potenciál míst s přímým elektrolytickým kontaktem s

okolní zeminou. Nejedná se o potenciál celého povrchu potrubí, jak by mohlo ze zavedeného značení vyplývat. Elektroda se umísťuje nad osu potrubí. Zpravidla se v měření více uplatňují vady blíže místu měření.

Bod měření	Změřený $U_S$ (V) 14.11.2013
1	-0,67
2	-0,695
3	-0,68
4	-0,70

Tabulka 4.11: Změřené hodnoty samovolného korozního potenciálu potrubí - půda

Stručně můžeme vyhodnotit naměřené potenciály dle následujícího výčtu:

- -0,55 V.....základní potenciál oceli, koroze probíhá bez vlivu vnějšího napětí,
- -0,55 až -0,87 V.....koroze zpomalena,
- -0,87 až -2 V.....vhodná oblast nastavení katodické ochrany,
- -2 V a výše do záporných hodnot.....poškození izolace vývinem vodíku pod izolací,
- -0 V a výše do kladných hodnot.....velmi nebezpečné rozpouštění kovů úměrné výši v + hodnotách napětí.

Z měření vyplývá a to i vzhledem ke stupni agresivity místní půdy, že změřený potenciál je dostatečně záporný na to, aby koroze litiny mohla samovolně probíhat. Potenciál samovolné koroze v půdách se pohybuje proti  $Cu/CuSO_4$  pro zinek -1,18 až -1,10 V, uhlíkovou ocel -0,75 až -0,50 V a ocel v betonu -0,20 V [15].

## 4.4 Anodická polarizace zkoušeného zařízení

Na část potrubí s poškozenou izolací jsme připojili + pól zdroje stejnosměrného proudu o napětí 17,5 V, – pól jsme připojili na sběrací FeZn pásek. Změřená hodnota vypínacího potenciálu potrubí - půda byla +1,82 V. Hodnoty anodického proudu v časové závislosti udává Tabulka 4.12 a Tabulka 4.13.

Datum	8.11.2013	22.11.2013	5.12.2013	20.12.2013	20.1.2014	25.2.2014	26.3.2014
U (V)	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
$I_{kor}(A)$	0,8	0,7	0,7	0,55	0,53	0,51	0,5
$R_i(\Omega m^2)$	20,9	23,2	26,1	56,9	59,0	61,3	62,6

Tabulka 4.12: Korozní proud procházející zkoumaným potrubím skrze zem zpět ke zdroji při napětí 17,5 V

Datum	26.3.	25.4.	25.5.	25.6.	18.7.	19.8.	5.9.	19.9.	10.10.	28.11.
U (V)	31,4	31,3	31,3	31,4	31,5	31,5	31,6	31,6	31,5	31,3
$I_{kor}(A)$	1,24	1,18	1,1	0,95	0,84	0,64	0,67	0,66	0,64	0,49
$R_i(\Omega m^2)$	46,6	48,8	52,4	60,8	69,0	90,6	86,8	88,1	90,6	117,5

Tabulka 4.13: Korozní proud procházející zkoumaným potrubím skrze zem zpět ke zdroji při napětí 31,4 V, v průběhu roku 2014

Změřené hodnoty proudu jsou vyneseny do grafu na Obrázku 4.16. Z proudu lze vypočítat množství prošlého náboje při napětí 17,5 V dle vztahu:

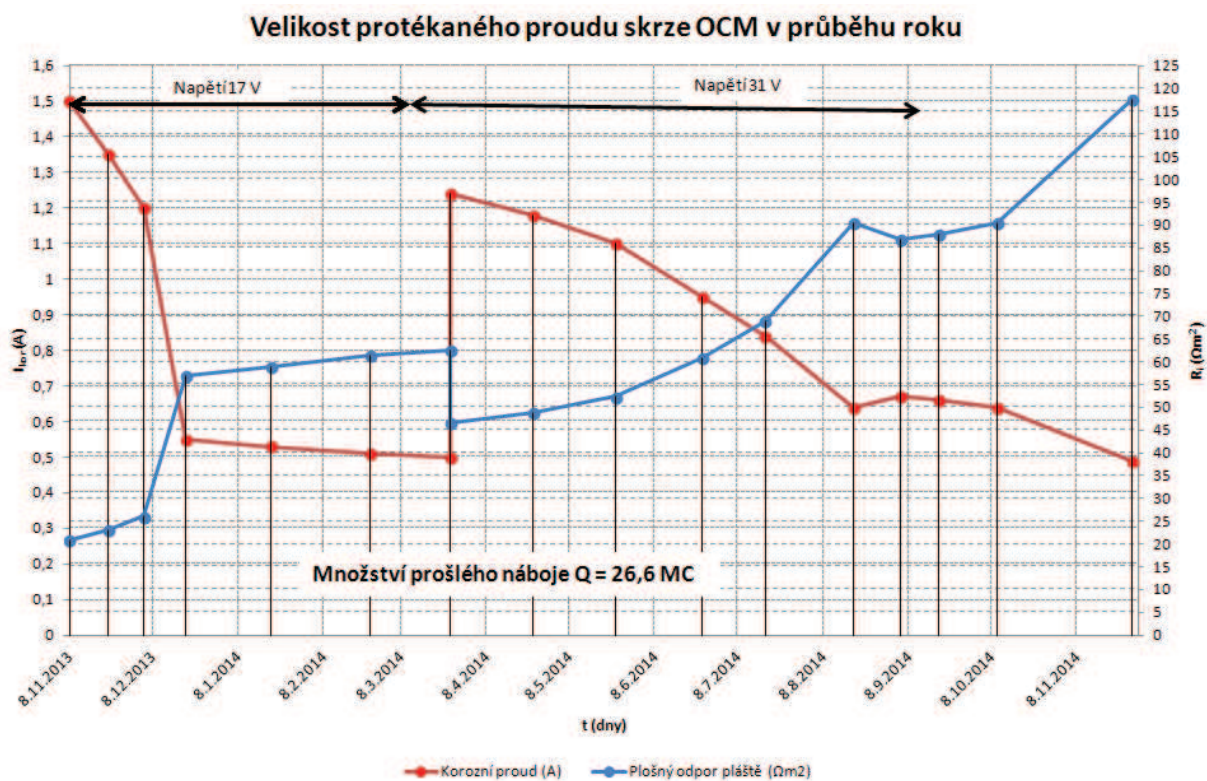
$$Q_1 = \sum \Delta t_i \cdot \frac{I_i + I_{i+1}}{2} = 24 \cdot 3600 \left[ \left( 14 \cdot \frac{1,5 + 1,35}{2} \right) + \dots + \left( 29 \cdot \frac{0,51 + 0,5}{2} \right) \right] = 8,61 \text{ MC} \quad (4.11)$$

Což odpovídá množství úbytku litiny dle vztahu 1.10:

$$m_1 = \frac{M_{Fe} \cdot I \cdot \tau}{z_k \cdot F} = \frac{55,84 \cdot 8618832}{2 \cdot 96485,34} = 2494g \quad (4.12)$$

Obdobně pro druhou část:

$$Q_2 = \sum \Delta t_i \cdot \frac{I_i + I_{i+1}}{2} = 24 \cdot 3600 \left[ \left( 30 \cdot \frac{1,24 + 1,18}{2} \right) + \dots + \left( 49 \cdot \frac{0,64 + 0,49}{2} \right) \right] = 17,99 \text{ MC} \quad (4.13)$$



Obrázek 4.16: Průběh korozního proudu měřeným potrubím v čase

Což odpovídá množství úbytku litiny dle vztahu 1.4:

$$m_1 = \frac{M_{Fe} \cdot I \cdot \tau}{z_k \cdot F} = \frac{55,84 \cdot 17998848}{2 \cdot 96485,34} = 5208g \quad (4.14)$$

## 4.5 Analýza úložného zařízení po roce anodického namáhání

Úložné zařízení jsme odkryli po roce extrémní anodické polarizace 1.12.2014. Celkový průměrný korozní proud v průběhu roku dosáhl hodnoty  $0,85 A$  v místě čtvrté trubky s uměle vytvořeným defektem. Do ostatních trub se, buď skrze vodu v hrdlových spojích nebo vodivým půdním elektrolytem, dostala také část korozního proudu, který jsme měřili přes napětí a v průměrných hodnotách za celý rok jsme naměřili v trubce č.3.  $100 mA$ , č.2.  $53 mA$  a č.1.  $48,5 mA$ . Pro porovnání s počátečním stavem jsme změřili vypínací potenciál potrubí - půda při zapojeném zdroji napětí ve čtvrté trubce, jehož hodnota byla  $+1,56 V$ . Nižší kladný vypínací potenciál zpravidla značí nižší korozní rychlost, způsobenou sníženým stykem kovu s půdním elektrolytem, což doprovází zmiňovaný jev zvyšování odporu ochranného pláště OCM. Z obrázku 4.16. je patrné, že korozní proud po celý rok měření neustále velmi klesal a ustálil se na hodnotě kolem  $0,55 A$  již po zhruba 51 dnech při množství prošlého náboje  $4,2 MC$ , což odpovídá množství přeměněného kovu  $1453 g$ . Anodická oxidace zinku v místě porušení obalu vytváří zinečnatany, které mají špatnou elektrickou vodivost a snížily průtok proudu místem poškozeného obalu. S klesajícím korozním proudem rostl odpor pláště OCM, který lze vypočítat z napětí a proudu, viz. Obrázek 4.16. To je opačný trend oproti ostatním druhům izolací, u kterých izolační odpor stárnutím klesá, u PUR nebo epoxidových izolací až o tři řády (stále však  $\geq 10^6 \Omega m^2$ ), u PE izolací  $\geq 10^8 \Omega m^2$ . Změnu vodivosti ochranného obalu OCM můžeme vysvětlit anodickou reakcí zinku (oxidací) na zinečnaté ionty nebo oxidací cementových částic. Přechod zinku na rozpustné korozní produkty doprovází uvolňování bublinek vodíku na jeho povrchu. My můžeme na konci měření jen ověřit, zda-li nedochází v důsledku vývinu vodíku k roztrhání obalu. Oxidací zinku vznikají špatně vodivé korozní produkty, které mohou snižovat porozitu OCM a tím snižují jeho vodivost. Vysokopecní cement v OCM obsahuje mnoho oxidů a sulfidů, které mají redukční fáze, které mohou být také oxidovány.

### 4.5.1 Prozkoumání stavu úložného zařízení

Po odhalení trub nás především zajímalo ověřit soudržnost obalu a mechanickou přilnavost k litině. Zkontrolovat stav hrdlových spojů chráněných gumovou ochrannou manžetou a porovnat jejich stav se spojem nechráněným. Dále jsme se snažili zjistit do jakého dosahu je poškozen obal OCM směrem k ostatním zapojeným troubám.

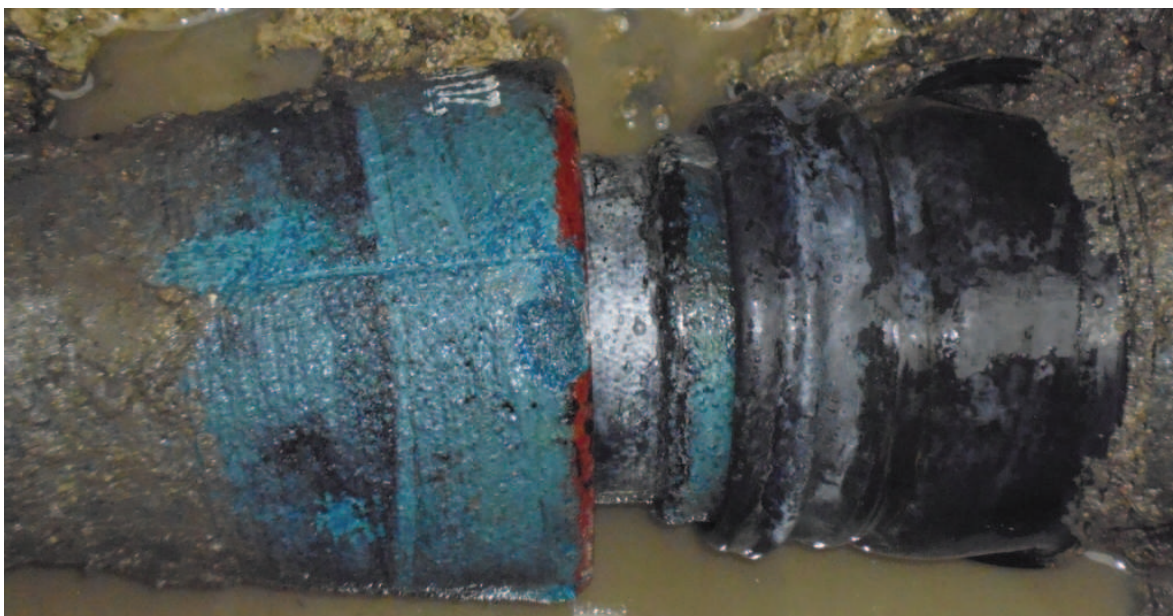


#### 4.5.1.1 Prozkoumání stavu hrdla mezi troubami č. 1 a 2

Na Obrázku 4.17 je zobrazeno hrdlo po sundání gumové manžety. Stav hrdla ve vnitřní části nebylo možné zkontrolovat. Lze si povšimnout, že obal OCM po délce trub zčernal. Toto lze přisuzovat anodické reakci zinku pod obalem na zinečnatany. Na Obrázku 4.18 je možné sledovat toto rozhraní jako černou linku, která přesně kopíruje oblast překryvu gumové manžety hrdla od zbytku trouby. Obal nejeví na povrchu známky korozního poškození, homogenita je zachována, přilnavost také.



Obrázek 4.17: Zobrazení hrdlového spoje chráněného gumovou manžetou po roce korozního namáhání



Obrázek 4.18: Detail 1 zobrazení hrdlového spoje chráněného gumovou manžetou po roce korozního namáhání



Obrázek 4.19: Detail 2 zobrazení hrdlového spoje chráněného gumového manžetou po roce korozního namáhání



#### 4.5.1.2 Prozkoumání stavu místa defektu izolace

Na Obrázku 4.20 jsou zobrazeny v horní části korozní produkty kolem místa poškození obalu, které nemohly vlivem vrstvy zeminy migrovat od místa defektu pryč a shromažďovaly se v jeho blízkosti. Po odstranění korozních produktů jsme zjistili, že litina je napadena až k hrdlovému spoji vpravo (vzdálenost 15 cm), jehož značná část byla rozpuštěna. Korozní napadení až k místu nechráněného hrdla je možné vidět na Obrázku 4.21. Typickým projevem elektrolytické koroze stejnosměrnými bludnými proudy ve vodném prostředí je skutečné odplavování materiálu podobné „tání“ ledu.

Bod měření	Změřený $U_S$ (V) 18.12.2014	Změřený $U_S$ (V) 23.12.2014
1	-0,340	-0,655
2	-0,335	-0,651
3	-0,407	-0,6
4	-0,750	-0,695

Tabulka 4.14: Změřené hodnoty samovolného korozního potenciálu potrubí - půda, po roce korozního namáhání



Obrázek 4.20: Zobrazení místa s poškozenou izolací po roce korozního namáhání

Zjistili jsme, že ve vzdálenosti pouhých 15 cm (na Obrázku 4.22) směrem vpravo od místa defektu se objevují místa, která vykazují pod obalem jen povrchovou korozi a po 30 cm (na Obrázku 4.23 vpravo dole) zbylá část trubky již nejevila známky rozrušení





Obrázek 4.21: Zobrazení místa s poškozenou izolací po roce korozního namáhání



Obrázek 4.22: Zobrazení místa s poškozenou izolací po roce korozního namáhání



Obrázek 4.23: Zobrazení místa s poškozenou izolací po roce korozního namáhání

ochranného obalu z cementové malty. Poškozenou část jsme odřízli a změřili samovolný korozní potenciál všech částí úložného zařízení viz. Tabulka 4.14.

Hodnotu potenciálu ve čtvrté trubce  $-0,75\text{ V}$  lze vysvětlit tím, že poškozenou část, přibližně  $50\text{ cm}$  potrubí, jsme odřízli a potenciál jsme změřili až poté. Defekt v plášti OCM tedy zřejmě způsobil odsátí většiny proudu do půdního elektrolytu do doby, než vlastní korozní produkty vytvořily „strup“, který tvorbu další koroze zpomalil. Opakované měření samovolného korozního potenciálu ukázalo jeho zvýšení v ostatních částech trub. Zdá se, že pasivační schopnost betonu je opravdu vysoká a v tomto případě vykazuje jakýsi samo regenerační efekt.



## 5 Závěr

Cílem práce bylo objasnit vliv anodických stejnosměrných bludných proudů na litinové potrubí s ochranným obalem OCM. Z korozního šetření obalu z plasticky modifikované cementové malty na potrubí DN80 lze vyvodit dílčí závěry, ze kterých vyplývají doporučení pro pokládku a použití trub v reálných podmínkách, protože potrubní systémy z tvárné litiny mají oproti plastovým, převážně PE, řady výhod.

### Závěr č.1.

Obal z cementové malty vykazuje vysokou mechanickou odolnost, která byla zkoušena v minulosti v mnoha odborných publikacích, např. [25]. Porušení ochrany litinových trub s plastovými izolacemi, ať už při transportu nebo při pokládce, nutně vede k podobným korozním projevům, jako v našem pokusném poli. Obal z cementové malty má v tomto směru oproti jiným izolacím výhodu, že je velmi těžké ho porušit. Na obrázku 3.1 je vidět vryp lžicí bagru při odhalování trub, který by v případě plastových izolací nutně vedl k jejich porušení.

### Závěr č.2.

Zjistilo se, že potrubí v proudovém poli bez použití ochrany je náchylné na proreznutí, což se zjistilo záměrným porušením obalu OCM. Nutné je používat ochranné povlaky, buď OCM nebo alternativní povlaky z PE



Obrázek 5.1: Vryp lžicí bagru

nebo PUR, ale OCM má oproti plastickým povlakům výhodu v mechanické odolnosti. Proud procházející anodickým povrchem oceli je v alkalickém prostředí betonu zpomalován na úkor elektrochemických reakcí. Ocel uložená v betonu je schopna dlouhodobě odolávat určitým proudovým hustotám. Při zvýšení proudové hustoty nad tuto mez se rozruší ochranná vrstva betonu a nastává koroze kovu dle Faradayových zákonů. Skokové zvýšení proudových hustot do extrémních hodnot i po krátký čas vede také zpravidla k rozrušení ochranné vrstvy. V našem případě se jednalo o proudové hustoty v místě defektu izolace o ploše  $20 \text{ cm}^2$  v průměru o  $J = 0,85/0,002 = 425 \text{ A/m}^2$ , přepočítáme-li proudovou hustotu na délku poškození trubky v délce  $50 \text{ cm}$ , vyjde nám  $J = 0,85/3,14 \cdot 0,098 \cdot 0,5 = 0,85/0,15 = 5,66 \text{ A/m}^2$ . Takovému proudovému zatížení naše pokusné potrubí nevydrželo. Zbylá část trubky již nejevila známky rozrušení ochranného obalu z cementové malty. Vyjdu-li z poměrů ploch poškozené a zbylé nepoškozené trubky  $3,14 \cdot 0,098 \cdot 0,5/3,14 \cdot 0,098 \cdot 5,5 = 0,15/1,69 = 0,088$ , budou i proudové hustoty koroziho proudu v tomto poměru. Ve zbylé části trubky protékal proud o proudové hustotě  $J = 0,088 \cdot 5,66 = 498 \text{ mA/m}^2$ . Lze tedy konstatovat, že z dlouhodobého hlediska je toto mezní hodnota proudové hustoty, kterou obal OCM dimenze trub DN80, může vydržet. U větších dimenzí trub, u kterých se zvětšuje plošný styk s půdním elektrolytem lze předpokládat přímo úměrné snižování této hodnoty. Uvážíme-li hodnotu bludného proudu v Praze-Radlicích  $1,06 \text{ mA/m}^2$ , lze předpokládat, že ochranný obal z OCM vyhoví požadavkům na protikorozi ochranu proti anodickým bludným proudům ve zvýšeném agresivním prostředí stupni III. Vliv karbonatace se v důsledku převážně vodného prostředí bez chloridových iontů nepotvrdil.

### **Závěr č.3.**

Hrdlové spoje je třeba chránit buďto gumovými převlečnými manžetami nebo lépe, teplem smrštitelnými manžetami na bázi polyolefinů. Vrstva lepidla na jejich navařovací straně lépe přilne k potrubí a zabráni nežádoucímu průniku podzemní vody do prostoru hrdla.

# Literatura

- [1] J. Bochníček, P. Hejda, Magnetické pole Země a kosmické počasí, Geofyzikální ústav AV ČR, Boční II, 141 31 Praha 4.
- [2] J. Polák, Limity pro použití anorganických povlaků při ochraně kovových úložných zařízení proti korozi. PLYN. Ročník LXXXVII, 2007, číslo 2.
- [3] J. Polák, D. Hlinomaz, Vliv bludných proudů na parametry katodické ochrany potrubí na území Prahy. PLYN Ročník XCII, 2012, číslo 2.
- [4] P. Novák, Koroze kovů, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství. VŠCHT.
- [5] Materiály SŽDC, Historie železnice. [online]. [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/o-nas/zeleznice-cr.html>
- [6] J. Matouš, Měření elektrických veličin na stejnosměrně elektrizovaných tratích. SŽDC Technická údržba dopravní cesty.
- [7] ČSN EN 50162. Ochrana před korozi bludnými proudy ze stejnosměrných proudových soustav. Praha: ČNI, 2005.
- [8] ČSN EN 50122-2\_2010 ed. 2. Ochranná opatření proti účinkům bludných proudů DC trakčních soustav. Praha: ČNI, 2010.
- [9] P. Novák, M. Kouřil, Elektrochemická koroze kovů, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství. VŠCHT.
- [10] ČSN EN 50443:2012. Účinky elektromagnetické interference na potrubí způsobené AC vysokonapěťovými elektrickými trakčními soustavami a/nebo AC vysokonapěťovými napájecími soustavami. Praha: ČNI, 2012.

- 
- [11] KOSTADINOV, Dečo. Ochrana sdělovacích kabelů před korozi. Praha: Knižnice spojové techniky, 1983.
- [12] A.C. CORROSION ON CATHODICALLY PROTECTED PIPELINES. Guidelines for risk assessment and mitigation measures. 2001, s. 52. Dostupné z: [www.ceocor.lu](http://www.ceocor.lu).
- [12] M. Yunovich, S. Waters, External Corrosion Direct Assessment for Unique Threats to Underground Pipelines, CC TECHNOLOGIES, 2007, p. 213.
- [13] G. Helm, T. Helm, H. Heinzen, W. Schwenk, Investigation of corrosion of cathodically protected steel subjected to alternating currents, 3R International, Vol. 32, 1993, p. 246.
- [14] BAECKMANN, W. v. a W. SCHWENK. *Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes*. 4. vyd. Würzburg: WILEY-VCH, 1999. ISBN 3-527-29586-0.
- [15] POLÁK, Josef a Pavel VELETA. *Rukověť katodické protikorozi ochrany*. První vydání. Praha: Český plynárenský svaz, 2002. ISBN 3-527-29586-0.
- [16] F. Galsgaard, L. V. Nielsen, AC/ DC interference corrosion in pipelines - Summary Report, MetriCorr. 2006.
- [17] P. Novák, Pasivace oceli při průmyslových aplikacích elektrochemické ochrany, SlovGas. 5/2005.
- [18] M. Büchler, Managing AC and DC Interference with Smart Cathodic Protection, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 2014.
- [19] ČSN EN 50162:2004. Ochrana před korozi bludnými proudy ze stejnosměrných proudových soustav. Praha: ČNI, 2005.
- [20] ČSN EN 03 8375. Ochrana kovových potrubí uložených v půdě nebo ve vodě proti korozi. Praha: ČNI, 1986.
- [21] ČSN EN 03 8363. Zásady měření při protikorozi ochraně kovových zařízení uložených v zemi. Praha: ČNI, 1979.
- [22] ČSN EN 15 542:2008. Trubky, tvarovky a příslušenství z tvárné litiny - Vnější povlak trubek cementovou maltou - Požadavky a zkušební metody. Praha: ČNI, Leden 2009.

- 
- [23] ČSN EN 197-1:ed.2. Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: ČNI, Duben 2012.
- [24] ČSN EN 206-1. Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda Praha: ČNI, Září 2001.
- [25] A. Kottmann, Erfahrungen bei der Herstellung und Verlegung von Rohren mit Rohrumhüllungen aus Zementmörtel. Gas/Erdgas, 121. Jahrgang (1980), Heft 7, Seite 280 - 291.
- [26] I. Kudláček, Degradální procesy I. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. Skriptum ČVUT. ISBN 80-01-01098-8.
- [27] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, Fahrleitungen elektrischer Bahnen. Siemens Aktiengesellschaft, Publicis Publishing, Erlangen, 3. Auflage 2014, ISBN 978-3-89578-407-1.