

# Ochrana staveb proti agresivnímu prostředí a bludným proudům

ČESKÁ KOMORA AUTORIZOVANÝCH INŽENÝRŮ A TECHNIKŮ ČINNÝCH VE  
VÝSTAVBĚ

Rada pro podporu rozvoje profese ČKAIT

Autor: Ing. Josef Polák, CSc.

## ČÁST 10 PŘÍLOHY

### OBSAH

<b>10.1</b>	<b>PŘÍLOHA č. 1 – VÝSLEDKY ŠETŘENÍ PŘECHODOVÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU KONTAKTŮ OCELOVÉ VÝZTUŽE BETONU .....</b>	<b>3</b>
1	ÚČEL TEORETICKÝCH A LABORATORNÍCH ŠETŘENÍ .....	3
2	TEORETICKÁ ŠETŘENÍ .....	3
2.1	ELEKTRICKÁ REZISTIVITA MAGNETITU .....	3
2.2	TLOUŠŤKA VRSTVY OKUJÍ .....	3
2.3	TEORETICKÝ VÝPOČET PŘECHODOVÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU KONTAKTU DVOU OCELOVÝCH TYČÍ PŘI KŘÍŽENÍ .....	4
3	VÝSLEDKY LABORATORNÍHO ŠETŘENÍ .....	5
3.1	POPIS MĚŘENÍ .....	5
3.2	KONTAKT PŘI KŘÍŽENÍ VÝZTUŽE .....	6
3.3	KONTAKT PŘESAHEM VÝZTUŽE .....	6
3.4	DVĚ TYČE PŘI POUŽITÍ VÁZACÍHO DRÁTU .....	7
<b>10.2</b>	<b>PŘÍLOHA č. 2 – PŘÍKLAD STANOVENÍ PODÉLNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU STANDARDNĚ USPOŘÁDANÉ OCELOVÉ VÝZTUŽE REFERENČNÍ LINIOVÉ KONSTRUKCE VE TVARU ŽELEZOBETONOVÉ DESKY .....</b>	<b>11</b>
1	POPIS PROVEDENÍ MODELOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY .....	11
1.1	POPIS ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ .....	11
1.2	HORNÍ VÝZTUŽ .....	11
1.3	DOLNÍ VÝZTUŽ .....	11
1.4	DISTANČNÍ VÝZTUŽ .....	12
1.5	PARAMETRY MODELOVÉ DESKY .....	12
1.6	POČET KONTAKTŮ VÁZACÍM DRÁTEM PŘI KŘÍŽENÍ A PŘESAHU TYČÍ .....	13
2	SCHÉMA SLOŽENÉHO ELEKTRICKÉHO OBVODU OCELOVÉ VÝZTUŽE U MODELOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY A VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU VZTAŽENO NA JEDNOTKU DÉLKY .....	13
3	VÝPOČET PODÉLNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU OCELOVÉ VÝZTUŽE REFERENČNÍ LINIOVÉ KONSTRUKCE VE TVARU ŽELEZOBETONOVÉ DESKY .....	13
3.1	ÚVOD .....	13
3.2	VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY .....	13
3.3	POSTUP VÝPOČTU PODÉLNÉHO ODPORU LINIOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY VZTAŽENO NA JEDNOTKU DÉLKY .....	14
3.4	VÝPOČET OHMICKÝCH ODPORŮ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ VÝZTUŽE MODELOVÉ DESKY (O DÉLCE $L = 10$ M) PODLE PŘÍLOHY Č. 10.1 .....	15
3.5	PŘECHODOVÁ ČÁST DVOU DESEK (V DÉLCE $L_1 = 1,0$ M) .....	16
3.6	PODÉLNÝ ODPOR LINIOVÉ KONSTRUKCE VE TVARU MODELOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY VZTAŽENO NA JEDNOTKU DÉLKY .....	17
3.7	KONTROLNÍ VÝPOČET PRŮŘEZU OCELOVÉHO VODIČE ODPOVÍDAJÍCÍ HODNOTĚ $R_L = 96,28 \Omega \text{km}^{-1}$ .....	17
3.8	DÍLČÍ ZÁVĚR .....	18

<b>10.3</b>	<b>PŘÍLOHA č. 3 – HODNOTY ELEKTRICKÉHO PODÉLNÉHO ODPORU ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE V ZÁVISLOSTI NA ROZSAHU TEORETICKÉ A REÁLNÉ PROVAŘENOSTI VÝZTUŽE PRO TYPICKÉ LINIOVÉ KONSTRUKCE.....</b>	<b>21</b>
1	VŠEOBECNĚ .....	21
2	ZÁVISLOST TEORETICKÉ A REÁLNÉ PROVAŘENOSTI VÝZTUŽE NA ROZSAHU PROPOJENÍ JEJICH JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ .....	21
3	HODNOTY PODÉLNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU PRO TYPICKÉ ŽELEZOBETONOVÉ LINIOVÉ KONSTRUKCE .....	21
4	POZNATKY Z MĚŘENÍ V TERÉNU U REALIZOVANÝCH STAVEB .....	22
5	INFORMATIVNÍ VÝPOČTY .....	22
5.1	VÝPOČET PRŮMĚRU OCELOVÉHO DRÁTU, KTERÝ MÁ PODÉLNÝ ODPOR $R_L = 100 \Omega \text{km}^{-1}$ .....	22
5.2	VÝPOČET ROZSAHU PROVOZOVANÉM U JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ LINIOVÝCH KONSTRUKCÍ, PŘI KTERÉM $R_L = 100 \Omega \text{km}^{-1}$ : .....	23
5.3	VÝPOČET PODÉLNÉHO ODPORU UZEMŇOVACÍHO PŘÍVODU PÁSKU FeZn 30/4 mm .....	23
5.4	DÍLČÍ ZÁVĚR.....	23
5.5	PODÉLNÝ ODPOR BETONOVÉ DESKY O PRŮŘEZU 2,4 M <sup>2</sup> (6 X 0,4 m) DÉLKY L = 10 m (PODLE PŘÍLOH č. 10.1 A č. 10.2) .....	23
<b>10.4</b>	<b>PŘÍLOHA č. 4 – KATODICKÁ OCHRANA ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ.....</b>	<b>24</b>
1	ÚVOD.....	28
2	HISTORIE KATODICKÉ OCHRANY OCELI V BETONU .....	28
3	SPECIFIKA KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU .....	28
3.1	MECHANIZMUS KOROZE OCELI V BETONU.....	28
3.2	KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE VLIVEM PŘÍTOMNOSTI CHLORIDŮ .....	29
4	POSOUZENÍ STAVU KONSTRUKCE A JEJÍ OPRAVA .....	29
4.1	POSOUZENÍ PORUCH BETONU A JEJICH PŘÍČIN .....	29
4.2	STAVEBNĚ-TECHNICKÝ PRŮZKUM KONSTRUKCE, JEHO STRATEGIE A METODY OPRAVY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	30
4.3	POTVRZENÍ VHODNOSTI KATODICKÉ OCHRANY .....	30
5	MONITOROVÁNÍ KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU .....	31
6	ZÁSADY KATODICKÉ OCHRANY OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU.....	34
6.1	VŠEOBECNĚ .....	34
6.2	ZÁSADY KATODICKÉ OCHRANY OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU .....	34
6.3	KRITÉRIA OCHRANY .....	35
6.4	VLIV KONCENTRACE CHLORIDŮ NA PARAMETRY OCHRANY .....	37
7	PŘÍKLADY POSTUPU NAVRHOVÁNÍ A VÝHODNÝCH APLIKACÍ KATODICKÉ OCHRANY VÝZTUŽE V BETONU .....	37
7.1	POSTUP NAVRHOVÁNÍ.....	37
7.2	PŘÍKLAD DÁLKOVÉHO OVLÁDÁNÍ STANICE KATODICKÉ OCHRANY VÝZTUŽE V BETONU .....	38
7.3	PŘÍKLADY EFEKTIVNÍHO A EKONOMICKÉHO POUŽITÍ KATODICKÉ OCHRANY .....	39
7.4	ZÁVĚR.....	40
<b>10.5</b>	<b>PŘÍLOHA č. 5 – VLIV BLUDNÝCH PROUDŮ NA VODIČE ULOŽENÉ V ZEMI.....</b>	<b>50</b>
1	ÚVOD.....	50
2	VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ PRO LINIOVOU KONSTRUKCI .....	51
3	VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ PRO NELINIOVÉ KONSTRUKCE .....	53
4	POUŽITELNOST VZORCŮ PRO LINIOVÉ A NELINIOVÉ KONSTRUKCE .....	55
5	ROZDĚLENÍ NAPĚTÍ A PROUDU VE SMĚRU KOLMÉM NA LINIOVOU KONSTRUKCI (LK) .....	56
5.1	STANOVENÍ ZMĚNY ELEKTRICKÉHO POLE V OKOLÍ LINIOVÉ I NELINIOVÉ KONSTRUKCE .....	56
5.2	ODVOZENÍ VZTAHŮ PRO NAPĚTÍ A PROUD.....	57
5.3	INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE VE SMĚRU KOLMÉM NA OSU LK .....	58
5.4	PŘÍKLAD VÝPOČTU HODNOTY OSY HYPERBOLY .....	59
5.5	POROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ PRO NAPĚTÍ PODÉL OSY A KOLMO K LINIOVÉ KONSTRUKCI .	59
5.6	PŘÍKLAD VÝPOČTU PRŮMĚRNÉ HODNOTY $E_u$ LK DÉLKY L .....	61
5.7	ZÁVĚR .....	61

## 10.1 PŘÍLOHA č. 1 – VÝSLEDKY ŠETŘENÍ PŘECHODOVÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU KONTAKTŮ OCELOVÉ VÝZTUŽE BETONU

### 1 ÚČEL TEORETICKÝCH A LABORATORNÍCH ŠETŘENÍ

Jak bylo uvedeno v *odst. 4.2.1*, uspořádání ocelové výztuže v železobetonové konstrukci je z hlediska kontaktů jednotlivých prutů ovlivněno stochastickým jevem. To prakticky znamená zkoumat jaká je pravděpodobnost, že dva nebo tři na sobě nezávislé jevy nastanou zároveň. Za účelem zjištění použitelných hodnot pro výpočty pro případy kontaktů při křížení, při přesahu (stykování) výztuže a při použití vázacího drátu je třeba provést teoretická a laboratorní šetření, tj. měření na vybraných vzorcích výztuže.

### 2 TEORETICKÁ ŠETŘENÍ

I když takovéto šetření má charakter odborného odhadu, z hlediska metodiky zkoumání problematiky považujeme za účelné je zahrnout do této publikace. Ocelová výztuž skladovaná na staveništi se vyznačuje tím, že má okujený povrch, tvořený zejména magnetitem ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Pro další srovnání je důležité stanovit elektrickou rezistivitu okují a jejich tloušťku.

#### 2.1 ELEKTRICKÁ REZISTIVITA MAGNETITU

Okuje na ocelové výztuže vznikají v důsledku atmosférické koroze a sestávají hlavně ze dvou složek  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (60-64 %) a  $\text{FeO}$  (28-31 %). Již chemické složení ukazuje, že elektrická rezistivita okují bude řádově vyšší než u uhlíkové oceli. Z hlediska velikosti přechodového odporu na kontaktu ocelových tyčí se jedná o důležitou konstantu. V této souvislosti využijeme údajů ze studie japonských vědců (Japan Carlit Company Limited), kteří zjišťovali elektrickou rezistivitu magnetitových anod [10]. K tomu účelu vytvořili vzorek z magnetitu vel. 15/8/75 mm složení:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (53,4 %);  $\text{FeO}$ (44,2 %);  $\text{SiO}_2$ (1,09 %);  $\text{MgO}$ (0,13 %);  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (0,93 %);  $\text{CaO}$ (0,5 %). Z jednotlivých komponentů tavením na 800 až 900 °C vytvořili ingot, který byl použit pro měření elektrického odporu (za použití Cu-desek přiložených z obou stran na plochu 15x8 mm;  $R = 6,25 \Omega$ ). Při alomovém poměru 2 ( $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ ) se hodnota elektrického odporu ustálila, takže výsledná hodnota **rezistivity magnetitu**

$$\rho_m = 1,0 \Omega\text{cm} = 0,01 \Omega\text{m} = 10^4 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1} = 10 \Omega\text{mm}.$$

#### Poznámka

Pro ocel 11353 je  $\rho_o = 0,21 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m} = 0,21 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

Poměr:  $\rho_m / \rho_o = 47619 = 5 \cdot 10^4$

#### 2.2 TLOUŠŤKA VRSTVY OKUJÍ

Vytvořená tloušťka vrstvy okují závisí na agresivitě prostředí a době, kdy je výztuž vystavena korozním podmínkám, především atmosférické korozi, dále se uplatňuje druh a profil ocelové výztuže. Jedná se v podstatě o přirozeně vzniklou pasivní ochranu povrchu ocelové výztuže. Tloušťka této vrstvy bude především závislá na době působení atmosférické koroze, neexistují však spolehlivé údaje, jaké tloušťky může vrstva okují na bázi magnetitu dosáhnout. Pro účely orientačního výpočtu postačí odborný odhad opřený o technologii plazmových povlaků na bázi komerčního magnetitového prášku z Krivoj Rogu na kovovém povrchu z oceli nebo titanu [45] vyvinutou pracovníky Ukrajinské akademie věd (Materials Science Institute). Na povrchu 250x500 mm formou „spraying active layers“ byla docílena vrstva povlaku v tloušťce 300 až 1500  $\mu\text{m}$ .

Pro další výpočtu je analogicky uvažována průměrná **tloušťka magnetitové vrstvy  $t = 0,5$  mm.**

## 2.3 TEORETICKÝ VÝPOČET PŘECHODOVÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU KONTAKTU DVOU OCELOVÝCH TYČÍ PŘI KŘÍŽENÍ

### 2.3.1 Výchozí údaje o výztuži

Uvažujeme jednak s tyčí z oceli 10505 R  $\varnothing$  14 až 20 mm (žebírková, resp. hřebínková ocel), kde výška výstupku je až 1,2 mm, její šířka 2 mm, jednak s tyčí z hladké oceli 10216 E o  $\varnothing$  8 až 14 mm. Při orientační úvaze předpokládáme suchý povrch obou tyčí s okujeným povrchem.

### 2.3.2 Praviděpodobnost kontaktu výztuže u liniové železobetonové konstrukce

Při křížení prutů horní (vnější) výztuže nebo dolní (vnitřní) výztuže, případně i distanční výztuže pouze určitá část je v přímém kontaktu. Pro stanovení počtu těchto reálných kontaktů využijeme principů statistiky:

$K$  (%) - teoretický počet kontaktů při křížení výztuže, jde o vzájemný počet všech křížení podélné výztuže ( $X$ ) a příčné výztuže ( $Y$ ) – viz dále *obr. 3.1*.

$K'$  (%) - reálný počet kontaktů

$n$  (%  $\cdot 10^{-2}$ ) – pravděpodobnost kontaktů všech prutů při vzájemném křížení

Pravděpodobnost, že dva na sobě nezávislé jevy  $A_1$ ,  $A_2$  nastanou zároveň, je dána vztahem [8]:

$$P = P(A_1) \cdot P(A_2)$$

Pro případ křížení podélné a příčné výztuže ( $x$ ,  $y$ ) platí:

$$n^2 = (K / 100)^2, \text{ současně platí:}$$

$$n^2 = K' / 100$$

$$\text{z toho vyplývá:} \quad K' = K^2 / 100 \quad (\%)$$

$$\text{kde} \quad K \leq 100; K' \leq 100$$

Za předpokladu, že v případě jak příčné, tak podélné výztuže je pouze každý třetí kontakt funkční, pokud jde o vzájemné propojení obou druhů výztuže, tedy

$$K = 33,3 \% \text{ je reálný počet kontaktů}$$

$$K' = 33,3^2 / 100 = 11 \%$$

Za dalšího předpokladu, že při reálném kontaktu je skutečná plocha / geometrická plocha  $\alpha = 0,5$  bude počet funkčních elektrických kontaktů z hlediska elektrického přechodového odporu

$$K'' = K' \cdot 0,5 = 11 \cdot 0,5 = \underline{5,5 \%}.$$

### 2.3.3 Porovnání výpočtu elektrického odporu drátu z uhlíkové oceli a z magnetitu

Pro drát o průřezové ploše  $S = 1 \text{ mm}^2$  ( $d = 1,13 \text{ mm}$ ) a o délce  $L = 50 \text{ mm}$  vychází:

$$\text{pro ocel} \quad R_o = 0,21 \cdot 0,05 / 1 = 0,010 \Omega$$

$$\text{pro magnetit} \quad R_m = 10^4 \cdot 0,05 / 1 = 500 \Omega$$

Hodnota  $R_o = 0,01 \Omega$  je na hranici měřitelnosti a je prakticky považována za kritérium úplného kontaktu dvou ocelových prutů s lesklým povrchem.

### 2.3.4 Výpočet přechodového odporu kontaktu s okujeným povrchem vztaženo na celkový počet křížení

Přechodový odpor při křížení dvou prutů:

$$R_{K1} = \rho_m (2t / S_m) = 10^4 (2 \cdot 0,0005 / 0,28) = 35,7 \Omega$$

Pro:  $\rho_m = 10^4 \Omega \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $t = 0,5 \text{ mm} = 0,0005 \text{ m}$

$$S_m = \pi d^2 / 4 = \pi \cdot 0,6^2 / 4 = 0,28 \text{ mm}^2$$

$$d = 0,6 \text{ mm.}$$

Stanoveno z orientačního výpočtu kontaktu dvou válcových ploch o průměru 14 mm ve vzdálenosti  $t = 0,5 \text{ mm}$  od povrchu.

Přechodový odpor kontaktu vztaženo na celkovou výztuž ( $x \cdot y$ ).

$$R_K = R_{K1} \cdot 100 / K'' = 35,7 \cdot 100 / 5,5 = \underline{649 \Omega}$$

## 3 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO ŠETŘENÍ

### 3.1 POPIS MĚŘENÍ

U vybraných vzorků výztuže byly konce tyčí očištěny až na lesklý povrch pro připojení krokodýlků měřících kabelů. Použitý měřicí přístroj – ohmmetr Norma 666 má čtyři měřicí rozsahy, takže lze s dostatečnou přesností měřit elektrické odpory od 0,05 ohmu až 5000  $\Omega$ , tedy v rozsahu pěti řádů (viz obr. 1.1).

Ze skládky na stavbě byly odebrány vzorky výztuže s okujeným povrchem v délkách 0,4 až 1,2 m různých profilů, a sice: R8, R12, R14, R18; hladká výztuž:  $\varnothing 6$ ;  $\varnothing 10$ ;  $\varnothing 12$  a  $\varnothing 14 \text{ mm}$ .

Při měření byly vzorky izolovány od podkladu a ohmmetrem byly při dvoupólovém zapojení přímo měřeny elektrické přechodové odpory. Pro mechanické vzájemné spojení tyčí (při křížení a přesahu) byla použita plastová lepicí páska v šířce 50 mm.

Při simulaci spojení výztuže vázacím ocelovým drátem byl použit  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$  s kontaktem drátu po obvodu spojované výztuže 70–80 mm.

Standardní měření bylo prováděno se suchým povrchem výztuže. V případě simulace přesahu byl měřen elektrický odpor i pro případy vlhkého povrchu výztuže (po krátkém ponoření do vody) a sledován nárůst elektrického odporu v průběhu času. Byly sledovány různé kombinace vzájemného uspořádání výztuže: různý počet mechanických spojů při přesahu, kontakty: spirála / hladký povrch okujený, spirála / hladký povrch vyleštěný, mechanické spojení různých profilů výztuže. Při použití vázacího drátu byl sledován pokles elektrického odporu s počtem spojů v suchém stavu i s vlhkým povrchem. Dále byl sledován vliv způsobu připojení vázacího drátu k výztuži (normální spoj, pevný spoj). Kontrola správnosti měření (viz obr. 1.2).

## 3.2 KONTAKT PŘI KŘÍŽENÍ VÝZTUŽE

### 3.2.1 Výsledky měření

Měření podle *obr. 1.3*, tj. výztuže R14 / R14 se uskutečnilo v 05/09. Při suchém povrchu mimo hřebínek byl  $R_K = 1300 - 1500 \Omega$ , při vlhkém povrchu  $R'_K = 300 \Omega$ , při kontaktu hřebínek / hřebínek byl  $R_K > 5000 \Omega$ .

U další kombinace:  $\varnothing 8 / \varnothing 6$  mm (těsný kontakt – za pomoci kleští s izolací)  $R_K = 350 \Omega$ , při standardním kontaktu  $R'_K = 800 \Omega$ .

Podobně při kontaktu  $\varnothing 14 / \varnothing 16$   $R_K = 800 \Omega$ .

Při křížení R 8 /  $\varnothing 10$  (mimo hřebínek):  $R_K = 3000 \Omega$ , kontakt 8 R/ $\varnothing 14$  (lesklý povrch):  $R_K = 400 \Omega$ ; 8R (vlhký povrch) /  $\varnothing 14$  (lesklý povrch)  $R_K = 250 \Omega$ .

### 3.2.2 Dílčí závěr

Z výše uvedených a dalších měření bylo zjištěno, že elektrický přechodový odpor:  $R_K = 300$  až  $3000 \Omega$ , průměrná hodnota byla  $\varnothing R_K = 900 \Omega$  (při suchém okujeném povrchu).

## 3.3 KONTAKT PŘESAHEM VÝZTUŽE

### 3.3.1 Popis simulace přesahu

#### Vzorek A:

R 18 / R 8 v délce 1,2 m vlastní délka přesahu  $p = 1,1$  m (PLP) vzájemné mechanické spojení plastovou lepicí páskou v šířce 50 mm, celkem provedeno 7 spojů po 50 mm, tj. v dl. 350 mm. Detail spoje je patrný z *obr. 1.4*.

#### Vzorek B:

R 14 / R 8 v délce 0,4 m, vlastní délka přesahu  $p = 0,3$  m. Spojení PLP na třech místech, tj. v délce 150 mm.

#### Vzorek C:

R 12 /  $\varnothing 6$ ; dl. 0,8 m; dtto.

### 3.3.2 Výsledky měření

#### Vzorek A:

$R_A = 480 \Omega$  (suchý povrch)

Elektrický odpor těsně po vyjmutí tyčí z nádoby s vodovodní vodou.

$R'_A = 40$  až  $45 \Omega$ , tj. 36 až  $41 \Omega / \text{bm}$

$R'_A = p_0$  10':  $70 \Omega$ ; po 20':  $100 \Omega$ ; po 40':  $240 \Omega$

#### Vzorek B:

$R_B = 1\,300 \Omega$  (suchý povrch)

Vlhký povrch:  $170 \Omega$ ; po 10':  $210 \Omega$ ; po 20':  $300 \Omega$ ; tj. 51 až  $60 \Omega/\text{bm}$

#### Vzorek C:

$R_C = 350 - 390 \Omega$  (mimo šroubovici, suchý povrch).

Vlhký povrch:  $R'_C = 10$  až  $60 \Omega$

po 1 hodině (po oschnutí)  $\varnothing R_A = \varnothing R_B = 150 - 170 \Omega/\text{bm}$ .

### 3.3.3 Dílčí závěr

Podle uvedených měření byl  $R_p = 150$  až  $400 \Omega$  průměrně  $\varnothing R_p = 250 \Omega$ .

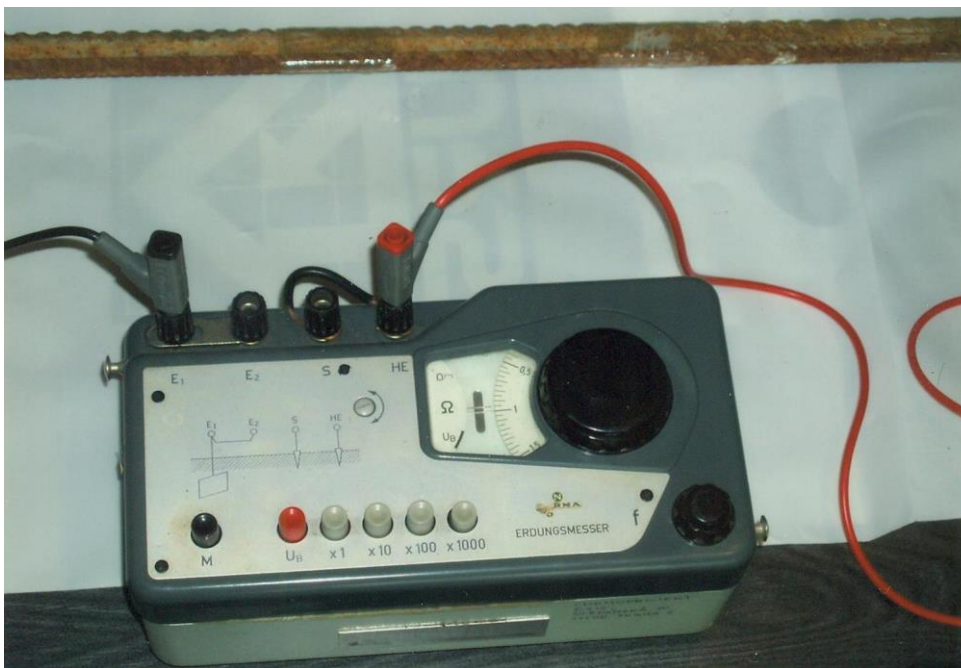
### 3.4 DVĚ TYČE PŘI POUŽITÍ VÁZACÍHO DRÁTU

V 07/09 bylo provedeno měření s aplikací vázacího drátu  $\varnothing 1,2$  mm u R18 / R8 v dl. 1,2 m (viz *bod 3.3.1*, vzorek A – suchý povrch).

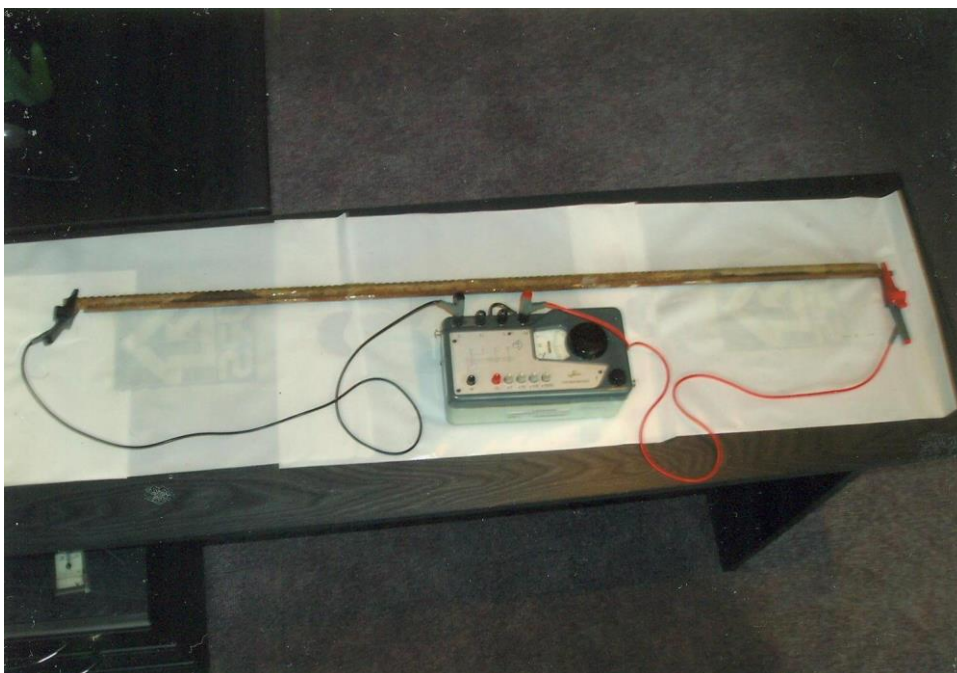
Podle těsnosti spoje byly změřeny hodnoty  $R_v = 9$  až  $150 \Omega$ .

Průměrná hodnota spoje  $\varnothing R_v = 40 \Omega$ .

## Obrázky k příloze č. 1



Obr. 1-1 Pohled na ohmmetr a část výztuže R18





*Obr. 1-2* Kontrola správnosti připojení ohmmetru k ocelové výztuži



Obr. 1-3 Pohled na měřicí obvod ke stanovení přechodového odporu v případě křížení výztuže R14/R14



Obr. 1-4 Detail připojení krokodýlku k výztuži R8 a způsob simulace přesahu výztuže R18/R8 při použití lepicí pásky o šířce 50 mm

## 10.2 PŘÍLOHA č. 2 – PŘÍKLAD STANOVENÍ PODÉLNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU STANDARDNĚ USPOŘÁDANÉ OCELOVÉ VÝZTUŽE REFERENČNÍ LINIOVÉ KONSTRUKCE VE TVARU ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

### 1 POPIS PROVEDENÍ MODELOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

Schéma uspořádání referenční liniové konstrukce ve tvaru železobetonové desky je znázorněno na *obr. 2.1*. Další podrobnosti jsou uvedeny v legendě k *obr. 2.1*.

#### 1.1 POPIS ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ

Rozměry:  $L = 10 \text{ m}$ ;  $b = 6 \text{ m}$ ;  $d = 0,4 \text{ m}$

Celkový objem:  $V = 24 \text{ m}^3$

Celkový povrch desky:  $P = 60 \text{ m}^2$

Beton: B30 – HV 8; C 30/37-XC1-XD1

podle ČSN 73 1201; ČSN EN 206-1

betonová směs: S3

Přesahová délka (stykování výztuže) pro:  $\varnothing 14$  je 800 mm (55  $\varnothing$ )

$\varnothing 10$  420 – 550 mm

Délka prutu: max. 12 m

Základní rastr: 200 mm

#### 1.2 HORNÍ VÝZTUŽ

5 $\varnothing$ R14 / ln; dl. 6,43 m:	50 ks .....	321,5 m
5 $\varnothing$ R14 / ln; dl. 5,76 m:	31 ks .....	178,6 m
5 $\varnothing$ R14 / ln; dl. 4,76 m:	31 ks .....	<u>147,6 m</u>
	Celkem	647,6 m

Při průřezu  $S_{14} = 153,9 \text{ mm}^2$ ,

hmotnosti  $G_{14} = 1,208 \text{ kg/bm}$  a povrchu:  $P_{14} = 0,044 \text{ m}^2/\text{bm}$

je celková hmotnost:  $G_H = 782,4 \text{ kg}$

je celkový povrch:  $P_H = 28,5 \text{ m}^2$

Počet kontaktů křížením (teoreticky):  $31 \cdot 50 = 1\,550 \text{ ks}$

Délka kontaktů přesahem (stykování 0,8 m):  $31 \cdot 0,8 = 24,8 \text{ bm}$

#### 1.3 DOLNÍ VÝZTUŽ

5 $\varnothing$ R14 /bm; dl. 5,82 m:	50 ks .....	291,0 m
5 $\varnothing$ R14 /bm; dl. 9,12 m:	31 ks .....	<u>282,7 m</u>
	Celkem	573,7 m

$$G_D = 573,7 \cdot 1,208 = 693,0 \text{ kg}$$

$$P_D = 573,7 \cdot 0,044 = 25,2 \text{ m}^2$$

Počet kontaktů křížením: 31 · 50

1 550 ks

#### 1.4 DISTANČNÍ VÝZTUŽ

(Distanční prvky vymezují vzdálenost mezi dolní a horní výztuží)

4 Ø R10 / m<sup>2</sup>; dl. 1,29 m: 110 ks ..... 141,9 lm

Při průřezu  $S_{10} = 78,54 \text{ mm}^2$ ;  $G_{10} = 0,617 \text{ kg/bm}$  a  $P_{10} = 0,031 \text{ m}^2/\text{bm}$

je celková hmotnost  $G_F = 141,9 \cdot 0,617 = 87,6 \text{ kg}$

celkový povrch  $P_F = 141,9 \cdot 0,031 = 4,4 \text{ m}^2$

Počet kontaktů přes distanční prvky (mezi horní a dolní výztuží):

Horní výztuž: počet křížení: 2 x 110 = 220 ks

Dolní výztuž: přesahy: 2 x 110 ks v délce 0,2 m

délka kontaktů přesahem: 220 · 0,2 = 44 bm

#### 1.5 PARAMETRY MODELOVÉ DESKY

Celková hmotnost výztuže  $G = 1563 \text{ kg}$

Celkový povrch výztuže  $P = 58,1 \text{ m}^2$

Hmotnost výztuže na m<sup>3</sup> betonu:  $G / V = 1563 / 24 = 65,1 \text{ kg/m}^3$

Povrch výztuže na m<sup>3</sup> betonu:  $P / V = 58,1 / 24 = 2,42 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Průměrná hmotnost výztuže na 1 bm desky:

$$\underline{G_o = G / L = 1563 / 10 = 156,3 \text{ kg/m}}$$

Počet kontaktů křížením na 1 m<sup>3</sup> betonu

$$2 \times 1550 + 440 = 3540 \text{ ks}$$

$$\text{tj. } 3540 / 24 = 147,5 \text{ ks/m}^3$$

Délka kontaktů přesahem na 1 m<sup>3</sup> betonu

$$24,8 + 44 = 66,8 \text{ bm}$$

$$\text{tj. } 66,8 / 24 = 2,78 \text{ bm} / \text{m}^3 \text{ betonu}$$

Počet kontaktů křížením na 1 bm desky:

$$3540 \text{ ks} / 10 = 354 \text{ ks/m}$$

Délka kontaktů přesahem na 1 bm desky:

$$66,8 / 10 = 6,68 \text{ bm/m}$$

## 1.6 POČET KONTAKTŮ VÁZACÍM DRÁTEM PŘI KŘÍŽENÍ A PŘESAHU TYČÍ

Průměrný počet kontaktů za použití vázacího drátu je  $n' = 4 \text{ ks/m}^2$ .

V případě horní výztuže je to  $n_4 = L \cdot b \cdot n = 10 \cdot 6 \cdot 4 = 240 \text{ ks}$

U dolní výztuže  $n_D = 10 \cdot 6 \cdot 4 = 240 \text{ ks}$

U distanční výztuže  $n_F = 2 \times 110 = 220 \text{ ks}$

Celkový počet  $n = 700 \text{ ks}$  tj.  $700 / 24 = 29,2 \text{ ks/m}^3$   
 resp.  $700 / 10 = 70 \text{ ks/bm}$

## 2 SCHÉMA SLOŽENÉHO ELEKTRICKÉHO OBVODU OCELOVÉ VÝZTUŽE U MODELOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY A VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU VZTAŽENO NA JEDNOTKU DÉLKY

Schéma zapojení dílčích obvodů a jejich elektrický odpor pro referenční desku o délce  $L$  podle *obr. 2.1*, dále elektrický odpor přechodové (spojovací) části dvou referenčních železobetonových desek o délce  $L_1$ , jakož i podélný elektrický odpor vztaženo na jednotku délky desky je uveden a rozveden na *obr. 2.2*.

## 3 VÝPOČET PODÉLNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU OCELOVÉ VÝZTUŽE REFERENČNÍ LINIOVÉ KONSTRUKCE VE TVARU ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

### 3.1 ÚVOD

Exaktním výpočtem můžeme dospět ke dvěma krajním (teoretickým) hodnotám elektrického podélného odporu výztuže liniové betonové konstrukce. Je to případ, kdy jsou všechny druhy výztuže spojené navzájem svařováním (provařenost  $P' = 100 \%$ ).

Druhý extrém nastává, když ocelová výztuž je spojována výhradně stykováním (přesahem, kontaktem dvou nebo více pruhů), případně vázacím drátem (provařenost  $P = 0 \%$ ).

Pro účely orientačního výpočtu celkového odporu složeného elektrického odporu druhého případu, tj. především horní (vnější) výztuž, dolní (vnitřní) výztuž a distanční výztuže, uvažujeme modelovou železobetonovou desku s definovanými technickými parametry podle *obr. 2.1*.

### 3.2 VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY

Pro zvolený modelový případ – ocelová výztuž sestává v podstatě ze tří druhů, a sice: horní výztuž (H), dolní výztuž (D) a distanční výztuž (F). Největší elektrický odpor na jednotku délky bude dosažen za předpokladu, že jednotlivé pruty budou spojovány výhradně stykováním (přesahem a kontaktem dvou nebo více prutů) a vázacím drátem.

Složený elektrický obvod představuje složité sérioparalelní zapojení včetně zapojení odporu do trojúhelníku. Schéma zapojení jednotlivých odporů je znázorněno na *obr. 2.2* včetně rovnic pro výpočet dílčích odporů. Na zvláštní příloze je uvedena *legenda k obr. 2.2* s příslušnými značkami, termíny, definicemi a vysvětlujícími poznámkami.

### 3.3 POSTUP VÝPOČTU PODÉLNÉHO ODPORU LINIOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY VZTAŽENO NA JEDNOTKU DÉLKY

Postup výpočtu bude demonstrován na konkrétním příkladu s využitím zadaných konstrukčních konstant a změřených hodnot elektrického odporu při různém uspořádání kontaktů ocelové výztuže a podle schématu zapojení jednotlivých ohmických odporů, jak jsou znázorněny na *obr. 2.1* a *obr. 2.2*.

#### 3.3.1 Zadané konstrukční konstanty

Podle *obr. 2.1* a příslušné legendy:

$L = 10 \text{ m}$ ;  $L_1 = 55 \varnothing$  (pro  $\varnothing 14 \text{ mm}$  je to  $0,77 \text{ m}$ , pro  $\varnothing 20 \text{ mm}$ :  $1,1 \text{ m}$ ). Dále uvažujeme  $L_1 = 1,0 \text{ m}$ ;  $b = 6 \text{ m}$ ;  $d = 0,4 \text{ m}$

Podélná výztuž:  $x = 6,0 / 0,2 = 31 \text{ ks}$

Příčná výztuž:  $y = 10,0 / 0,2 = 50 \text{ ks}$

Přesah:  $p = 0,8 \text{ až } 1,1 \text{ m}$

Základní rastr:  $r = 0,2 \text{ m}$

#### 3.3.2 Počet kontaktů výztuže na 1 bm modelové desky

##### 3.3.2.1 Horní výztuž – kontakt

dvou prutů při křížení:  $K = 155 \text{ ks/bm}$

tří prutů při křížení:  $K_1 = 3,1 \text{ ks/bm}$

přesahem (stykováním):  $p = 3,1 \text{ ks/bm}$

vázacím drátem  $v = 24 \text{ ks/bm}$

##### 3.3.2.2 Dolní výztuž – kontakt

dvou prutů při křížení:  $K = 155 \text{ ks/bm}$

vázacím drátem  $v = 24 \text{ ks/bm}$

##### 3.3.2.3 Distanční výztuž – kontakt

přesahem (stykováním):  $p = 22 \text{ ks/bm}$

vázacím drátem  $v = 22 \text{ ks/bm}$

#### 3.3.3 Počet kontaktů při spojení dvou desek při $L_1 = 1,0 \text{ m}$ (podle *obr. 2.1*.)

##### 3.3.3.1 Horní výztuž

$K = 155 \text{ ks}$ ;  $K_1 = 31 \text{ ks}$ ;  $p = 31 \text{ ks}$ ;  $v = 24 \text{ ks}$

##### 3.3.3.2 Dolní výztuž

$K = 155 \text{ ks}$ ;  $K_1 = 31 \text{ ks}$ ;  $p = 31 \text{ ks}$ ;  $v = 24 \text{ ks}$

**3.3.3.3 Distanční výztuž**

$$p = 22 \text{ ks}; v = 22 \text{ ks}$$

**3.3.4 Změřené hodnoty přechodových odporů podle přílohy č. 10.1****3.3.4.1 Dvě tyče při křížení**

$$\varnothing R_K = 900 \Omega$$

**3.3.4.2 Tři tyče při křížení**

$$R_{K1} = 150 \text{ až } 1500 \Omega; \varnothing R_{K1} = 450 \Omega$$

**3.3.4.3 Dvě tyče při přesahu  $p = 1,0 \text{ m}$** 

$$R_p = 150 \text{ až } 400 \Omega; \varnothing R_p = 250 \Omega$$

**3.3.4.4 Kontakt tyčí za použití vázacího drátu**

$$R_v = 10 \text{ až } 150 \Omega; \varnothing R_v = 40 \Omega$$

**3.3.4.5 Počet tyčí:  $x = 31$ ;  $y = 50 \text{ ks}$** **Poznámka**

Jedná se o přechodový odpor dvou vrstev okují v suchém stavu.

**3.4 VÝPOČET OHMICKÝCH ODPORŮ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ VÝZTUŽE MODELOVÉ DESKY (O DÉLCE  $L = 10 \text{ M}$ ) PODLE PŘÍLOHY Č. 10.1****3.4.1 Výztuž horní desky**

Pro:  $R = 1,3636 \cdot 10^{-2} \Omega$  ( $\varnothing 14 \text{ v dl. } 10 \text{ m}$ );  $R_p = 250 \Omega$ ,

$R_K = 900 \Omega$        $x = 31 \text{ ks}; y_1 = p / r = 1,0 / 0,2 = 5 \text{ ks}$

$$R'_4 = 6,6474 \Omega$$

Pro:  $R_v = 40 \Omega$ ;  $n_v = 4 \text{ ks/m}^2$ ;  $b = 6 \text{ m}$ ;  $L = 10 \text{ m}$

$$R''_H = 0,1667 \Omega$$

$$\mathbf{R_H = 0,1626 \Omega}$$

**3.4.2 Výztuž dolní desky**

Pro:  $R = 1,3636 \cdot 10^{-2} \Omega$ ;  $R_K = 900 \Omega$ ;  $y = 50 \text{ ks}$ ;  $x = 31 \text{ ks}$

$$R'D = 0,00027 \Omega$$

Pro:  $R_v = 40 \Omega$ ;  $n_D = 4 \text{ ks/m}^2$ ;  $b = 6 \text{ m}$ ;  $L = 10 \text{ m}$

$$R''D = 0,1667 \Omega$$

$$\mathbf{RD = 0,00027 \Omega}$$

**3.4.3 Distanční výztuž**

Pro:  $R'_p = 2 R_p = 500 \Omega$  ( $p' = p / 2$ );  $f = 22 \text{ ks} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $L = 10 \text{ m}$ ;  $f' = 220 \text{ ks}$ ,

$R'_F = 4,5454 \Omega$   $x = 31 \text{ ks}$ ;  $y_1 = p / r = 1,0 / 0,2 = 5 \text{ ks}$

Pro:  $R_v = 40 \Omega$ ;  $f' = f'' = 220 \text{ ks}$

$R'_v = 0,3636 \Omega$

**$R_F = 0,3367 \Omega$**

**3.4.4 Celkový elektrický odpor desky o délce  $L = 10 \text{ m}$** 

Pro:  $R_H = 0,1626 \Omega$ ;  $R_D = 0,00027 \Omega$ ;  $R_F = 0,3367 \Omega$

**$R_c = 0,1097 \Omega$**

**3.5 PŘECHODOVÁ ČÁST DVOU DESEK (V DÉLCE  $L_1 = 1,0 \text{ M}$ )****3.5.1 Výztuž horní desky**

Pro:  $R_{K1} = 450 \Omega$ ;  $y_1 = p / r = 5 \text{ ks}$ ;  $x = 31 \text{ ks}$

$R'_{Hp} = 4,2683 \Omega$

Pro:  $R_v = 40 \Omega$ ;  $L_1 = 1,0 \text{ m}$ ;  $n_v = 4 \text{ ks/m}^2$

$R''_{Hp} = 1,6667 \Omega$

**$R_{Hp} = 1,1986 \Omega$**

**3.5.2 Výztuž dolní desky**

$R'_{Hp} = R'_{Dp}$ ;  $R''_{Hp} = R''_{Dp}$

$R_{Dp} = 1,1986 \Omega$

**3.5.3 Distanční výztuž**

Pro:  $R'_p = 500 \Omega$ ;  $f = 22 \text{ ks} \cdot \text{m}^{-1}$ ,

$R'_{Fp} = 45,4545 \Omega$

Pro:  $R_v = 40 \Omega$ ;  $f = 22 \text{ ks} \cdot \text{m}^{-1}$

$R'_{vFp} = 0,6363 \Omega$

**$R_{Fp} = 0,3669 \Omega$**



**3.5.4 Celkový elektrický odpor přechodové části**

Pro:  $R_{Hp} = 1,1986 \Omega$ ;  $R_{Dp} = 1,1986 \Omega$ ;  $R_{Fp} = 3,3669 \Omega$

$R_{cp} = 0,9494 \Omega$

**3.6 PODÉLNÝ ODPOR LINIOVÉ KONSTRUKCE VE TVARU MODELOVÉ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY VZTAŽENO NA JEDNOTKU DÉLKY**

Pro:  $R_c = 0,1092 \Omega$ ;  $R_{cp} = 0,9494 \Omega$ ;  $L = 10 \text{ m}$ ;  $L_1 = 1,0 \text{ m}$

$R_{L_1} = 10^3 [(0,1097 + 0,9494) / (10 + 1)] = 96,28 \Omega \text{ km}^{-1}$

**Poznámka**

Hodnota  $R_L$  odpovídá hmotnosti výztuže

$G_o = 156,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  a provařenosti výztuže  $P' = 0 \%$ .

**3.7 KONTROLNÍ VÝPOČET PRŮŘEZU OCELOVÉHO VODIČE ODPOVÍDAJÍCÍ HODNOTĚ  $R_L = 96,28 \Omega \text{ km}^{-1}$** 

Ze vztahu pro výpočet elektrického odporu vodiče o délce  $L$ , tj.

$R = \rho \cdot L / S$ ; ( $\Omega$ ;  $\Omega \text{ mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\text{m}$ ;  $\text{mm}^2$ ) se odvodí rovnice pro průřez ocelového vodiče pro podélný odpor na jednotku délky  $R_L$  ( $\Omega \text{ km}^{-1}$ )

$S_o = \rho_o \cdot 10^3 / R_L$  ( $\text{mm}^2$ ;  $\Omega \text{ mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\Omega \text{ km}^{-1}$ )

Pro  $\rho_o = 0,21 \Omega \text{ mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $R_L = 96,28 \Omega \text{ km}^{-1}$

$S_o = 2,18 \text{ mm}^2$ , což odpovídá průměru drátu  $d = 1,67 \text{ mm}$ .

Hmotnost tohoto fiktivního ocelového drátu je:

$G'_o = V \cdot S = 2,18 \cdot 7,85 = 17,11 \text{ (cm}^3; \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}; \text{g} \cdot \text{m}^{-1})$

$G'_o = 0,0171 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$

Proti hmotnosti výztuže referenční desky, tj.  $G_o = 156,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  je poměr

$G'_o / G_o = 1,094 \cdot 10^{-4}$ .

Přepočteno na procenta se šíření bludných proudů týká  $P_o = 0,0109 \%$  procenta průřezu výztuže, kdy provařenost považujeme za nulovou.

Přepočteno na kabelový kanál I na obr. 3.2(1) – viz příloha č. 10.3

$G_o / G_1 = P_1 / P_o$  je  $P_1 = 156,3 \cdot 0,0109 / 165 = 0,01 \%$

### 3.8 DÍLČÍ ZÁVĚR

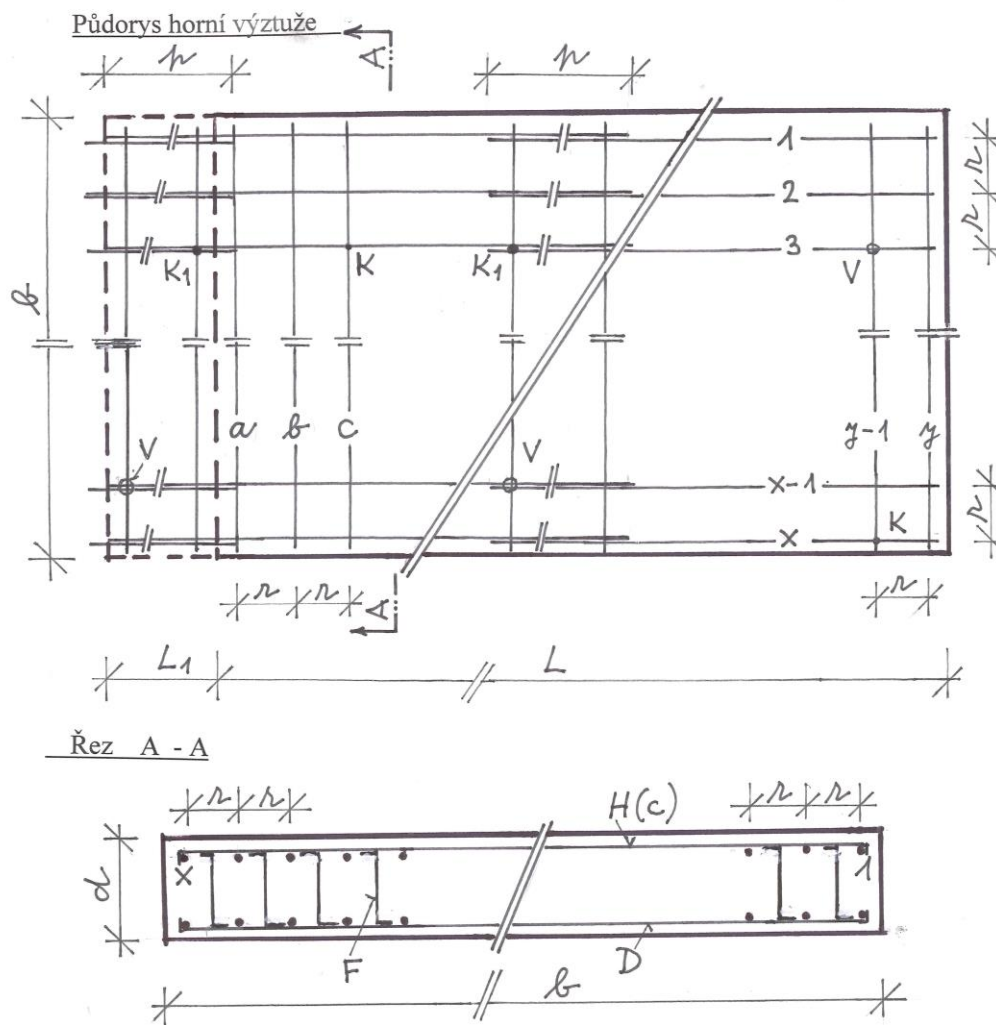
Pro vybrané železobetonové liniové konstrukce je jako srovnávací základ pro hodnoty elektrického podélného odporu uvažován kabelový kanál o hmotnosti výztuže na jednotku délky  $G_1 = 165 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Jak bylo shora odvozeno, rozsah teoretické provařenosti výztuže  $P_1 = 0,01 \%$  odpovídá stavu, kdy výztuž je spojována pouze stykováním a vázacím drátem.

Hodnota  $R_L = 96,28 = 100 \Omega \text{km}^{-1}$  (s chybou menší než 4 %) je dále uvažována jako konstanta pro výpočet rozsahu teoretické provařenosti výztuže  $P \%$  pro železobetonové konstrukce s vyšší hmotností.

Např. pro  $G_4 = 1650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  je  $P_4 = 0,001 \%$  (viz příloha č. 10.3).

Obrázky k příloze č. 2



Obr 2-1 Schéma uspořádání referenční liniové konstrukce ve tvaru železobetonové desky

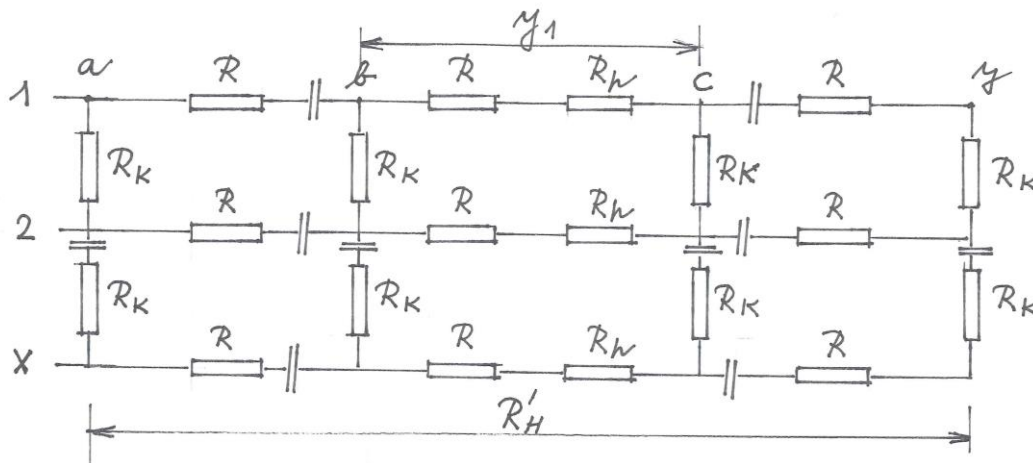
- L (m)** - Délka referenční desky
- L<sub>1</sub> (m)** - Délka přesahu navazující podélné výztuže liniové konstrukce
- b (m)** - Šířka referenční desky
- d (m)** - Tloušťka referenční desky
  
- 1 až X** - Podélná výztuž
- a až Y** - Příčná výztuž
- p** - Přesah (stykování výztuže)
- r** - Základní rastr
- K** - Kontakt dvou prutů při křížení
- K<sub>1</sub>** - Kontakt tří prutů při křížení
- V** - Spojení výztuže vázacím drátem
- H** - Horní (vnější) výztuž
- D** - Dolní (vnitřní) výztuž
- F** - Distanční výztuž

Legenda k obr. 2-1

2.1. Schéma zapojení dílčích obvodů a jejich elektrický odpor pro referenční desku o délce  $L$  (podle obr. 2.1)

2.1.1. Horní výztuž desky

2.1.1.1 Kontakt při křížení a stykování výztuže

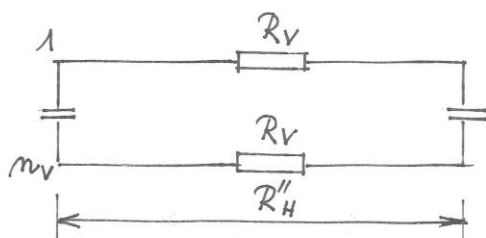


Exaktně:  $R_H^* = \frac{(R+R_n)[(R+R_n)+R_k]}{y_1 [X(R+R_n)+R_k]} + \frac{R(R+R_k)}{(y-y_1)(XR+R_k)} \quad (\Omega)$

Zjednodušeně:  $R_H' = \frac{R_n(R_n+R_k)}{y_1 (XR_n+R_k)} \quad (\Omega) \quad y_1 = n/n \quad (ks)$

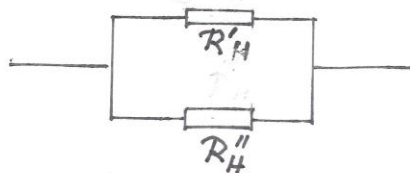
2.1.1.2 Kontakt vázacím drátem

podle Obr. 2.1



$R_H'' = \frac{R_v}{m_v \cdot b \cdot L} \quad (\Omega); \quad m_v (ks \cdot m^{-2})$

2.1.1.3 Celkový elektrický odpor horní výztuže



$R_H = \frac{R_H' \cdot R_H''}{R_H' + R_H''} \quad (\Omega)$

Obr. 2-2 Schéma složeného elektrického obvodu ocelové výztuže referenční liniové konstrukce ve tvaru železobetonové desky a elektrický odpor stažen na jednotku délky

### 10.3 PŘÍLOHA č. 3 – HODNOTY ELEKTRICKÉHO PODÉLNÉHO ODPORU ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE V ZÁVISLOSTI NA ROZSAHU TEORETICKÉ A REÁLNÉ PROVAŘENOSTI VÝZTUŽE PRO TYPICKÉ LINIOVÉ KONSTRUKCE

#### 1 VŠEOBECNĚ

U standardního provedení liniových železobetonových konstrukcí se jedná v podstatě o neprovařenou ocelovou výztuž spojovanou pouze stykáním a vázacím drátem (cca 4 ks/m<sup>2</sup>), což je ovšem pouze teoretický případ. Zrovna tak je prakticky nemožné a neúčelné aplikovat výztuž, která by byla zcela provařená (P = 100 %). V praxi se vyskytuje pouze částečně svařovaná výztuž z konstrukčních statických a montážních důvodů (např. kari sít'), která může být z hlediska uzemňování uvažována jako náhodný zemnič.

#### 2 ZÁVISLOST TEORETICKÉ A REÁLNÉ PROVAŘENOSTI VÝZTUŽE NA ROZSAHU PROPOJENÍ JEJICH JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ

Na obr. 3.1 je znázorněna závislost hodnoty reálné provařenosti P' (%) na teoretické provařenosti výztuže P (%) pro galvanické proudové cesty přes horní (vnější) výztuž ( $\eta_H$ ) přes dolní (vnitřní) výztuž ( $\eta_D$ ), přes distanční výztuž ( $\eta_F$ ) a přes přesahy podélné výztuže ( $\eta_P$ ) pro případy, kdy proud teče pouze jedním druhem výztuže ( $\eta$ ) až po případ, kdy proud teče čtyřmi druhy výztuže současně ( $\eta^4$ ), jak je vysvětleno v odst. 4.2.1 a v příloze č. 10.1 (odst. 2.3).

U nejběžnějšího případu, tj. při použití horní, dolní a distanční výztuže je reálná provařenost výztuže  $P'_3 = 100 (P / 100)^3 = 100 \cdot \eta^3 = 100 \cdot \eta_D \cdot \eta_F$  (%).

Např. pro teoretickou provařenost P = 27,1 % je reálná provařenost

$$P' = 100 \cdot (27,1 / 100)^3 = 1,99 = \underline{2,0 \%}, \text{ jak je patrné z obr. 3.1 (pro } \eta^3 \text{).}$$

#### 3 HODNOTY PODÉLNÉHO ELEKTRICKÉHO ODPORU PRO TYPICKÉ ŽELEZOBETONOVÉ LINIOVÉ KONSTRUKCE

Na obr. 3.2 je znázorněna závislost hodnoty podélného elektrického odporu železobetonové liniové konstrukce na rozsahu provařené výztuže. Jedná se o grafy pro různé liniové konstrukce (od kabelových kanálů přes kolektory až po silniční tunel) představující jednak ideální případy kontinuální elektrické proudové cesty  $R_L = f(P)$ , jednak reálné případy

$R_L = f(P')$ , přičemž  $P = (10^4 \cdot P')^{1/3}$ , kde P (%) je teoretická provařenost, P' (%) je reálná provařenost výztuže. Např. pro kolektorovou přípojku ( $G_3 = 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ) při poměru hmotnosti výztuže  $n = 3$  bude při

$$P' = 2 \% ; \underline{P} = (10^4 \cdot 2)^{1/3} = \underline{27,14 \%}$$

$$S_V = 500 / 7850 = 0,063694 \text{ m}^2$$

$$\underline{R}_L = \rho_o \cdot L \cdot 10^3 S_V^{-1} = 0,21 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1000 / 0,063694 = \underline{3,29701 \cdot 10^{-3} \Omega \text{km}^{-1}}$$

$$\text{Pro } P' = 2 \% \text{ bude } \underline{R}'_L = (P_o / P') \cdot R_L = (100 / 2) \cdot 3,29701 \cdot 10^{-3} = \underline{0,165 \Omega \text{km}^{-1}}$$

Z tab. 3.1 je patrné, že můžeme vypočítat hodnotu teoretické provařenosti výztuže, jestliže je dána hodnota podélného odporu liniové konstrukce  $R'_L = 0,1 \Omega\text{km}^{-1}$  např. pro případ kolektorové přípojky ( $n = 3$ ).

$$\underline{P} = 1 / (R'_L \cdot n) = 1 / (0,1 \cdot 3) = \mathbf{3,33 \%}$$

Jestliže nás zajímá hodnota reálné provařenosti výztuže pro případ, že podélný odpor liniové konstrukce při  $P_o = 100 \%$  je  $r_L = 0,1 \Omega\text{km}^{-1}$  pro analogický případ ( $n = 3$ ).

$$\underline{P}' = (10^4 / n \cdot R_L)^{1/3} = (10^4 / 3 \cdot 0,1)^{1/3} = \mathbf{32,18 \%}$$

Tyto a další kombinace jsou znázorněny na obr. 3.2. Např. pro případ kabelového kanálu II (Smíchov)  $C_2 = 330 \text{ kg.m}^{-1}$  ( $n = 2$ ) bude z grafu pro  $P' = 0,5 \%$  hodnota  $R'_L = 1 \Omega\text{km}^{-1}$ , což odpovídá hodnotě  $P = 17 \%$  a hodnotě  $R'_L = 1 \Omega\text{km}^{-1}$  odpovídá hodnota  $R_L = 0,005 \Omega\text{km}^{-1}$  pro  $P_o = 100 \%$ .

#### Kontrola:

$$P = (10^4 \cdot 0,5)^{1/3} = 17,1 \%$$

$$R'_L = (P_o / P') \cdot R_L = (100 / 0,5) \cdot 0,005 = 1,0 \Omega\text{km}^{-1}$$

Obdobně pro kolektor ve tvaru tunelu ( $n = 10$ )

$G_4 = 1650 \text{ kg.m}^{-1}$  bude pro  $P' = 5 \%$  a hodnotě  $R'_L = 0,02 \Omega\text{km}^{-1}$  odpovídá  $P = 37 \%$  a hodnotě  $R'_L = 0,02 \Omega\text{km}^{-1}$  koresponduje  $R_L = 0,001 \Omega\text{km}^{-1}$ .

#### Kontrola:

$$P = (10^4 \cdot 5)^{1/3} = 36,8 \%$$

$$\underline{R}'_L = (100 / 5) \cdot 0,001 = \mathbf{0,02 \Omega\text{km}^{-1}}$$

## 4 POZNATKY Z MĚŘENÍ V TERÉNU U REALIZOVANÝCH STAVEB

Nelze prakticky zajistit, aby byla systematicky svařována část podélné výztuže z důvodu zvýšení její podélné vodivosti (snížení podélného elektrického odporu).

Z hlediska omezení šíření bludných proudů, by šlo o práci nejen zbytečnou, ale ve svých důsledcích ohrožující životnost předmětné liniové konstrukce.

Podle měření VÚZ (někdejší výzkumný ústav železniční) [44] a dalších šetření [45] voltmetrickou metodou aplikovanou u některých liniových železobetonových konstrukcí (stanic metra A, C, technologických a eskalátorových tunelů, jakož i u traťových železobetonových tunelů  $\varnothing 5,1 \text{ m}$ ) byl podélný elektrický odpor (po přepočtu) v rozmezí

$$R_L = 0,03 \text{ až } 1,0 \Omega\text{km}^{-1}.$$

## 5 INFORMATIVNÍ VÝPOČTY

### 5.1 VÝPOČET PRŮMĚRU OCELOVÉHO DRÁTU, KTERÝ MÁ PODÉLNÝ ODPOR $R_L = 100 \Omega\text{km}^{-1}$

$$S_v = \rho_o (10 / R_L) = 0,21 (10 / 100) = 0,021 \text{ cm}^2$$

$$\underline{d} = (4 S_v / \pi)^{0,5} = (4 \cdot 0,021 / \pi)^{0,5} = 0,1635 \text{ cm} = \mathbf{1,635 \text{ mm}}$$

## 5.2 VÝPOČET ROZSAHU PROVOZOVANÉM U JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ LINIOVÝCH KONSTRUKCÍ, PŘI KTERÉM $R_L = 100 \Omega\text{km}^{-1}$ :

0	$G_0 = 156,3 \text{ kg.m}^{-1}$	$P_0 = 0,0109 \%$
1	$G_1 = 165 \text{ kg.m}^{-1}$	$P_1 = 0,01 \%$
2	$G_2 = 330 \text{ kg.m}^{-1}$	$P_2 = 0,005 \%$
3	$G_3 = 500 \text{ kg.m}^{-1}$	$P_3 = 0,0025 \%$
4	$G_4 = 1650 \text{ kg.m}^{-1}$	$P_4 = 0,001 \%$
5	$G_5 = 6200 \text{ kg.m}^{-1}$	$P_5 = 0,000266 \%$

## 5.3 VÝPOČET PODÉLNÉHO ODPORU UZEMŇOVACÍHO PŘÍVODU PÁSKU FeZn 30/4 mm

Tl. Zn-vrstvy: 80  $\mu\text{m}$  spojovaného svařováním nebo mechanicky:

$$R_L(\text{Fe}) = \rho_{\text{Fe}} \cdot (1000 / 30 \cdot 4) = 0,21 \cdot (1000 / 120) = 1,75 \Omega\text{km}^{-1}$$

$$R_L(\text{Zn}) = \rho_{\text{Zn}} \cdot (1000 / 68 \cdot 0,08) = 0,021 \cdot (1000 / 5,44) = 3,85 \Omega\text{km}^{-1}$$

$$1 / R_c = 1 / 1,75 + 1 / 3,85 = 0,571428 + 0,259740 = 0,831168$$

$$R_c = 1,20312 \Omega\text{km}^{-1}$$

V kabelových kanálech se používají 2 paralelní FeZn pásy 30/4 mm, které mají

$$R_L(\text{FeZn}) = 0,6015 \Omega\text{km}^{-1}$$

## 5.4 DÍLČÍ ZÁVĚR

Podélný odpor dvou FeZn pásků je  $100/0,6015 = 166\text{x}$  nižší než odpor výztuže kabelového kanálu.

## 5.5 PODÉLNÝ ODPOR BETONOVÉ DESKY O PRŮŘEZU $2,4 \text{ M}^2$ (6 X 0,4 m) DÉLKY $L = 10 \text{ m}$ (PODLE PŘÍLOH č. 10.1 A č. 10.2)

### 5.5.1 Betonové obložení zemničů: C 16/20; $n_p = 16,7 \%$ ; $\rho_b = 60 \Omega\text{m}$ (podle obr. 11)

$$R = \rho_b \cdot L / S = 60 \cdot 10 / 2,4 = 250 \Omega / 10 \text{ m} = 25 \Omega\text{.m}^{-1}$$

$$\underline{R}_{Lb} = 25 \cdot 1000 = 25000 \Omega\text{km}^{-1}$$

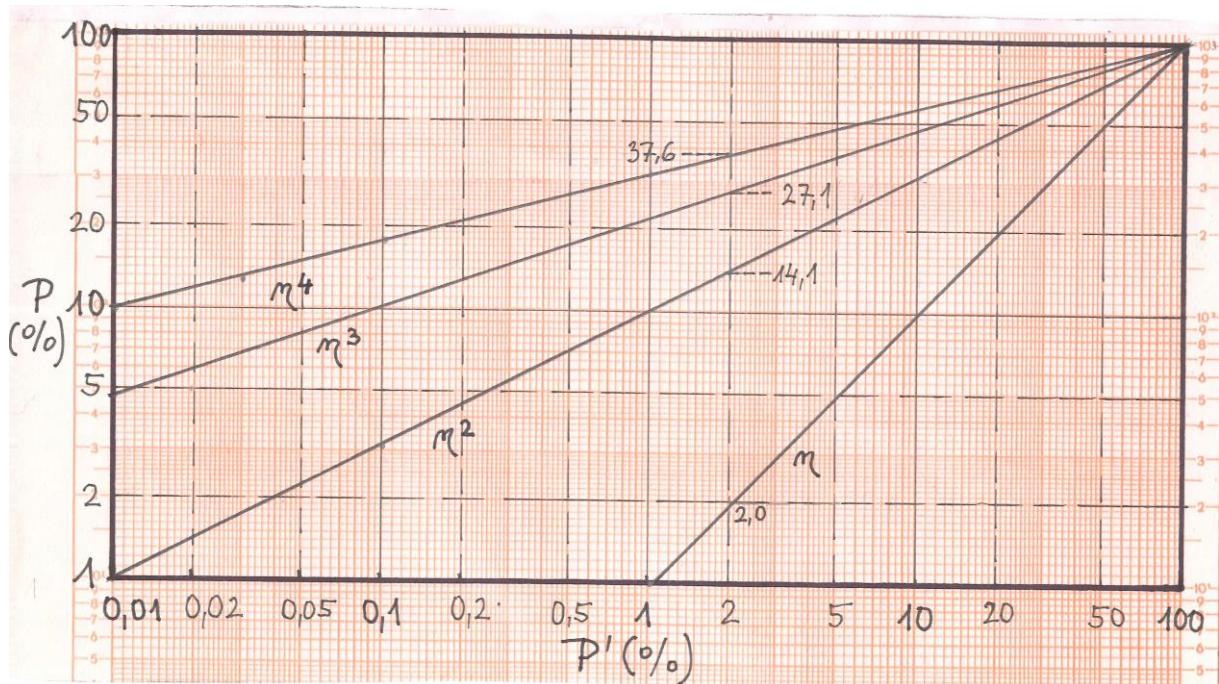
### 5.5.2 Vodostavebný beton C 30/37; $n_p = 0,25 \%$

$$\rho_b = 4000 \Omega\text{m}$$

$$R = 4000 \cdot 10 / 2,4 = 16666,7 \Omega / 10 \text{ m} = 1666,7 \Omega\text{.m}^{-1}$$

$$\underline{R}'_{Lb} = 1666,7 \cdot 1000 = 1\ 666\ 700 \Omega\text{km}^{-1}$$

## Obrázky k příloze č. 3



Obr. 3-1 Závislost teoretické a reálné provařenosti ocelové výztuže liniové železobetonové konstrukce na rozsahu propojení jejich jednotlivých částí

Legenda k obr. 3-1:

$P$  (%) - Teoretická provařenost výztuže

$P'$  (%) - Reálná provařenost výztuže z hlediska podélné elektrické vodivosti výztuže

$\eta$  ( $\% \cdot 10^{-2}$ ) - Pravděpodobnost dokonalého propojení všech částí výztuže

$$\eta = (P/100)$$

Pro:  $\eta_H = \eta_D = \eta_F = \eta_P$ :

$\eta = \eta_H (\eta_D)$	→	$P_1' = P = 100 \cdot \eta$
$\eta^2 = \eta_H \cdot \eta_D$	→	$P_2' = 100(P/100)^2 = 100 \cdot \eta^2$
$\eta^3 = \eta_H \cdot \eta_D \cdot \eta_F$	→	$P_3' = 100(P/100)^3 = 100 \cdot \eta^3$
$\eta^4 = \eta_H \cdot \eta_D \cdot \eta_F \cdot \eta_P$	→	$P_4' = 100(P/100)^4 = 100 \cdot \eta^4$

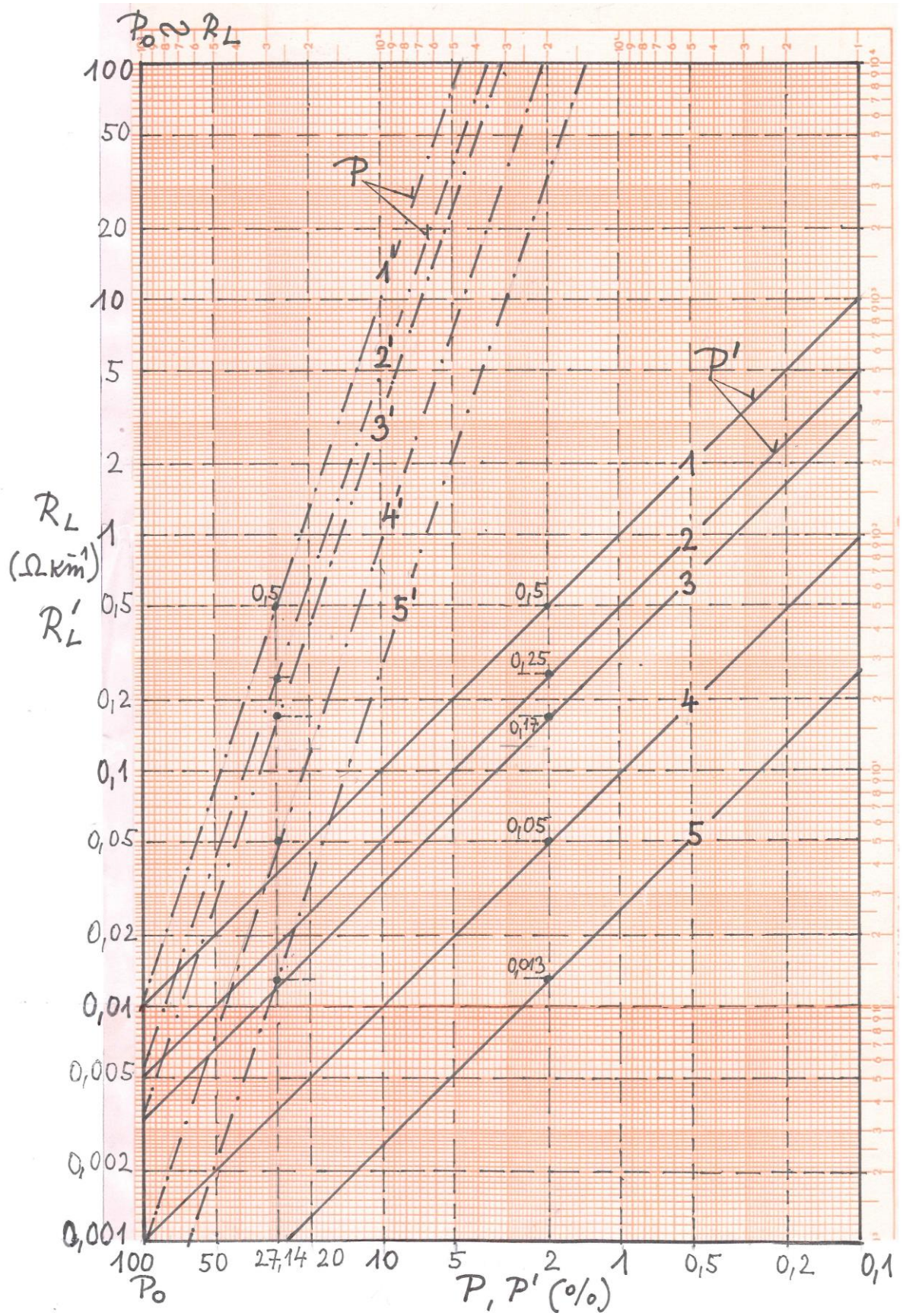
kde:  $\eta_H$  - Galvanická proudová cesta přes horní (vnější) výztuž

$\eta_D$  - Galvanická proudová cesta přes dolní (vnitřní) výztuž

$\eta_F$  - Galvanická proudová cesta přes distanční výztuž

$\eta_P$  - Galvanická proudová cesta přes přesahy podélné výztuže (částečně zahrnuto v  $\eta_H$  a v  $\eta_D$ .)





Obr. 3-2 Hodnota elektrického podélného odporu železobetonové liniové konstrukce v závislosti na rozsahu teoretické a reálné provařenosti výztuže

Legenda k obr. 3.2:

- $R_L$  ( $\Omega\text{km}^{-1}$ ) - Elektrický podélný odpor liniové konstrukce  
 $P$  (%) - Teoretická provařenost výztuže  
 $P'$  (%) - Reálná provařenost všech částí výztuže

Při pravděpodobnosti  $\eta^3$  dokonalého propojení všech částí výztuže (vnější, vnitřní a distanční výztuže):

$$P' = 100(P/100)^3 = P^3/100^2; \quad P = (10^4 \cdot P')^{1/3}$$

Vybrané železobetonové liniové konstrukce:

#### A. Celková hmotnost výztuže na jednotku délky $G$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a poměr hmotnosti výztuže

$n$

1. Kabelový kanál I (Zličín)	$G_1 = 165$ ;	$n = 1$
2. Kabelový kanál II (Smíchov)	$G_2 = 330$ ;	$n = 2$
3. Kolektorová přípojka	$G_3 = 500$ ;	$n = 3$
4. Kolektor ve tvaru tunelu $\Phi 5,3$ m (Brno)	$G_4 = 1650$ ;	$n = 10$
5. Hloubený tunel Blanka (Letná, 3 jízdní pruhy)	$G_5 = 6200$ ;	$n = 37,576$
6. Hloubený tunel Blanka se šesti jízdními pruhy (v km 3,574 až 4,746)	$G_6 = 12\,400$ ;	
7. Ražený tunel Blanka (3 jízdní pruhy)	$G_7 = 1700$ ;	

#### B. Plocha výztuže a podélný odpor liniové konstrukce

Pro: - hustotu oceli (tř.11353):  $s = 7\,850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

- měrný elektr.odpor :  $\rho_o = 0,21 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$  ( $0,21 \Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$ ),

Je: - příčná plocha výztuže:  $S_v = G \cdot s^{-1}$  ( $\text{m}^2$ ;  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ;  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

- podélný odpor výztuže (při  $P = 100\%$ ) na 1 km:

$$R_L = \rho_o \cdot L \cdot 10^3 \cdot S_v^{-1} \quad (\Omega\text{km}^{-1}; \Omega\text{m}; \text{m}; \text{m}^2)$$

- poměr hmotnosti výztuže vztaženo na kabel kanál I (1):

$$n = G_2/G_1 ; G_3/G_1 ; G_4/G_1 ; G_5/G_1.$$

-  $L = 1 \text{ m}$

Tab. 3-1 Elektrické parametry vybraných železobetonových liniových konstrukcí při reálné provařenosti výztuže:  $P' = 100; 27,14; 2,0$  (%)

Liniová konstrukce ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )	Sv ( $\text{m}^2$ )	$P_0 = 100$ % $R_L$ ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )	$P' = 27,14$ % ( $P = 67,74$ %) $R_L' = (P_0/P') \cdot R_L$	$P' = 2,0$ % ( $P = 27,14$ %) $R_L' = (P_0/P') \cdot R_L$
1 (n = 1)	0,021019	$9,99091 \cdot 10^{-3}$	0,036846	0,50023
2 (n = 2)	0,042038	$4,99545 \cdot 10^{-3}$	0,018423	0,25011
3 (n = 3)	0,063694	$3,29704 \cdot 10^{-3}$	0,012282	0,16674
4 (n = 10)	0,210191	$9,99091 \cdot 10^{-4}$	$3,68460 \cdot 10^{-3}$	0,05002
5 (n = 37,576)	0,789809	$2,65887 \cdot 10^{-4}$	$9,80572 \cdot 10^{-4}$	0,01331

### Poznámka:

- Pro  $P = 27,14$  % je  $P' = P^3/10^4 = 2,0$  %.  
Pro  $P' = 27,14$  % je  $P = (10^4 \cdot P')^{1/3} = 64,74$  %
- Pro  $R_L' = 0,1 \Omega\text{km}^{-1}$  a  $P = 1/(R_L' \cdot n)$  je pro liniové konstrukce č.1 až 5 (n=1 až 37,576):  
 $P_1 = 10$  %;  $P_2 = 5$  %;  $P_3 = 3,333$  %;  $P_4 = 1$  %;  $P_5 = 0,266$  % .
- Pro  $R_L = 0,1 \Omega\text{km}^{-1}$  a  $P' = (10^4/n \cdot R_L)^{1/3}$  je pro liniové konstrukce č.1 až 5:  
 $P_1' = 46,41$  %;  $P_2' = 36,84$  %;  $P_3' = 32,18$  %;  $P_4' = 21,54$  %;  $P_5 = 13,86$  %

### Legenda:

- P** - Teoretická provařenost výztuže (%)
- P'** - Reálná provařenost výztuže (%)
- P<sub>0</sub>** - Provařenost výztuže 100 %
- R<sub>L</sub>** - Podélný odpor liniové konstrukce při **P<sub>0</sub> = 100 %** ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )
- R<sub>L</sub>'** - Podélný odpor liniové konstrukce při reálné provařenosti **P'**(%) ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )
- n** - Poměr hmotnosti výztuže u jednotlivých typů liniových konstrukcí podle legendy k obr. 3.2

## 10.4 PŘÍLOHA č. 4 – KATODICKÁ OCHRANA ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

### 1 ÚVOD

Katodická ochrana je antikorozi technika, při které se zpomalení nebo potlačení korozního procesu dosahuje polarizací chráněného kovu posunem potenciálu v negativním směru, až se dosáhne potenciálu rovnováhy při takové koncentraci iontů, která je konvencí považována za kritérium nulové koroze. Základním principem katodické ochrany je tedy vytvoření elektrického obvodu (stejnoseměrného proudu), v němž je v korozním prostředí chráněná konstrukce katodou, přičemž korozní proces řídíme nebo ovládáme tím, že anodickou reakci přeneseme na pomocnou anodu (anodové uzemnění, galvanickou anodu).

U železobetonových konstrukcí lze katodickou ochranu aplikovat polarizací ocelové výztuže vnějším proudem, kde záporný pól zdroje proudu je připojen na výztuž. Beton, zejména roztok v jeho pórech, slouží jako elektrolyt umožňující průchod proudu a s ním spojený pohyb iontů.

Katodická ochrana se zásadně používá u nadzemních konstrukcí vystavených působením atmosféry a v případech znečištění betonu chloridovými ionty buď v modifikaci preventivní u nově navrhovaných konstrukcí nebo u starších konstrukcí se zkorodovanou výztuží, kde je katodická ochrana součástí jejich obnovy, např. u železobetonových mostovek. Z dalších výhodných aplikací lze uvést podlahy hromadných garáží v přímořských oblastech a v přístavištích pak pilíře, chodníky a spodní stavba mostů, konzolové nosníky pilíře, desky balkonů u bytových a kancelářských objektů a další stavby.

V některých případech (např. u mostů situovaných v blízkosti ss elektrizované železnice) lze katodickou ochranu aplikovat ke snížení nepříznivých vlivů bludných proudů.

### 2 HISTORIE KATODICKÉ OCHRANY OCELI V BETONU

První použití katodické ochrany oceli v betonu bylo v roce 1973 u města Sly Park v Kalifornii [46,47] firmou Caltrans (California Department of Transportation). Jednalo se o část mostovky, u které došlo ke korozi výztuže v důsledku použití rozmrazovací soli. Byla aplikována anoda ve formě vodivé vrstvy sestávající ze směsi asfaltu a černouhelného koksu granulace 3-10 mm ve spojení s běžnými fersilitovými elektrodami k tomu účelu upravenými. Tento systém fungoval bez závad více než 20 let.

Další vývoj v této oblasti spočíval v použití dalších modifikací anodových systémů (vodivé nátěry, stříkané zinkové povlaky, vodivé FHWA polymery, anody na bázi poplatinovaného titanu apod.).

Současně pokračoval vývoj nových monitorovacích elektrod pro zjišťování koroze a stupně katodické ochrany, zdrojů ochranného proudu včetně dálkového ovládání.

V současné době je katodická ochrana pouze v USA použita u více než 100 000 mostních konstrukcí.

### 3 SPECIFIKA KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU

#### 3.1 MECHANIZMUS KOROZE OCELI V BETONU

Všeobecně se soudí, že beton poskytuje vysoký stupeň ochrany proti korozi v něm uložené ocelové výztuže v důsledku tenké ochranné vrstvy gama oxidu železitého ( $\gamma$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), který se tvoří na ocelovém povrchu. Tento pasivační film se udržuje na ocelovém povrchu, pokud pH prostředí kolem oceli zůstává v rozmezí 12,5 až 12,8.

K porušení pasivačního povlaku výztuže a následné korozi došlo při obsahu chloridových iontů 0,26 % vztaženo k hmotnosti cementu [5], tedy již při obsahu chloridů 0,8 kg na 1 m<sup>3</sup> betonu. Klasickým příkladem je důsledek použití rozmrazovacích solí na mostovkách, kde u horní výztuže je vyšší koncentrace chloridů než u výztuže dolní.

*Obr. 4.1* ilustruje funkci korozního makročlánku při rozdílném obsahu chloridových iontů v železobetonové konstrukci.

Další příklad korozního makročlánku ukazuje *obr. 4.2* při opravě chloridy znečištěným betonem jeho nahrazením novým betonem. V řadě případů bylo nutno provést další opravu již po 2 letech.

### 3.2 KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE VLIVEM PŘÍTOMNOSTI CHLORIDŮ

Depasivace ocelové výztuže, tedy ztráta ochranných vlastností tenké vrstvy oxidů železa na povrchu oceli, může být způsobena také působením chloridových iontů Cl<sup>-</sup> na povrchu výztuže. To může nastat jako následek vystavení betonu působení chloridů, což se děje například působením mořské vody nebo rozmrazovacích solí, které bývají v zimním období používány na silnicích. Hlavní rozdíl mezi korozi podporovanou působením CO<sub>2</sub> a Cl<sup>-</sup> spočívá v hloubce zkorodované vrstvy. V případě CO<sub>2</sub> má tato vrstva pravidelnou hloubku, zatímco v případě působení Cl<sup>-</sup> je hloubka výrazně nepravidelná, vyskytují se velmi hluboké defekty, známé jako **bodová koroze**.

Stejně jako v případě karbonatace i v přítomnosti chloridů je pro korozi nutná přítomnost vody a kyslíku. Jinými slovy, chloridové ionty působí jako iniciátor koroze, kterou způsobují O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Ty jsou schopny převést ocel do formy rzi, tvořené oxidy železa (3.1). Znamená to, že vyztužená konstrukce permanentně ponořená v mořské vodě nemůže korodovat, chybí k tomu kyslík. Stejně tak nemůže kvůli absenci vody korodovat konstrukce, která je stále v suchém prostředí.

Na druhé straně příboj, nebo střídání přílivu a odlivu změní situaci a dramaticky podporují korozní proces, protože jak kyslík (v suchém období), tak voda (během ponoření konstrukce) mohou být v kontaktu s ocelovou výztuží (*obr. 4.1*). Podobná situace nastává v konstrukcích vystavených působení rozmrazovacích solí, i když je působení chloridů omezeno jen na určité roční období. Penetrace chloridů skrze krytí výztuže může nastat dvěma odlišnými cestami:

- **absorpce vody kapilární elevací** – voda je nosičem solí (a tedy také chloridů), které jsou v ní rozpuštěny;
- **difúze chloridů betonem** – díky vodou nasyceným kapilárním póram – v tomto případě se voda nepohybuje póry, ale pohybují se chloridové ionty ve směru kolmém na povrch betonu.

Experimentálně [4] byla stanovena penetrace chloridů v závislosti na čase podle *obr. 4.4*, kde w/c je vodní součinitel, D – difúzní koeficient (mm<sup>2</sup>/s), který závisí na w/c, na typu cementu a stupni zhutnění čerstvého betonu. Při době ošetřování 28 dní (před ponořením do roztoku CaCl<sub>2</sub>) při vodním součiniteli w/c = 0,55 byla za 365 dní hloubka penetrace až 80 mm [4], v případě podle *obr. 4.4* (3 dny) to bylo 120 mm.

## 4 POSOUZENÍ STAVU KONSTRUKCE A JEJÍ OPRAVA

### 4.1 POSOUZENÍ PORUCH BETONU A JEJICH PŘÍČIN

Poruchy betonových konstrukcí podle [48,49] se mohou objevit v důsledku nevhodného návrhu, specifikace, dozoru, provádění, materiálu, včetně těchto faktorů:

- nepřiměřený strukturální návrh (chyby v projektové dokumentaci)

- nepřiměřená skladba betonu, nedostatečné zhutnění, nedostatečné míchání,
- nedostatečné krytí výztuže,
- nedostatečná nebo vadná vodotěsnost,
- znečištěné, špatné nebo reaktivní kamenivo,
- nedostatečné ošetřování.

Ostatní poruchy se mohou objevit během používání, včetně vlivů:

- koroze betonářské výztuže,
- drsné podnebí, atmosférické znečištění, chloridy, kysličník uhličitý, agresivní chemikálie,
- pohyb základu, pohyb ve spáře v důsledku nárazu, přetížení,
- poškození v důsledku nárazu, rozpínací síly v důsledku požáru,
- eroze, agresivní podzemní voda, seismická činnost,
- elektrické bludné proudy.

Před zahájením opravných prací se musí shromáždit a aktualizovat všechny informace o konstrukci.

Jestliže byly zjištěny poruchy, je nutno provést další zkoušky a provést posouzení ke stanovení příčin a rozsahu poruch a předpoklad budoucího chování.

Stav betonu a betonářské výztuže se musí zjistit a zaznamenat a údaje uchovat.

Typické posouzení by mělo zahrnovat zkoušky tloušťky krycí vrstvy betonu výztuže a hloubku karbonatace vzorku prášku z vrtu ke stanovení obsahu chloridových iontů a přítomnost jiných škodlivých látek a vývrty pro fyzikální, chemické a petrografické rozbory. Elektrochemické zkoušení výztuže (např. technikou měření potenciálu) může být požadováno v určitých případech, kdy byl zjištěn zvýšený obsah chloridových iontů a může být přítomna aktivní skrytá koroze.

#### **4.2 STAVEBNĚ-TECHNICKÝ PRŮZKUM KONSTRUKCE, JEHO STRATEGIE A METODY OPRAVY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ**

Získávání poznatků o stavu hodnocené betonové konstrukce z hlediska spolehlivosti a životnosti spočívá ve třech krocích [1]:

- provedení podrobného stavebně-technického průzkumu konstrukce, ze kterého vyplyne rozsah zkoušek přímo „in situ“ a rozsah nezbytných odběrů vzorků pro hodnocení stavu betonu v laboratoři,
- stanovení údajů přímo na stavbě včetně provedení jádrových vrtů z betonové konstrukce,
- stanovení fyzikálně mechanických a chemických vlastností betonů v laboratoři.

#### **4.3 POTVRZENÍ VHODNOSTI KATODICKÉ OCHRANY**

Posouzení stavu konstrukce podle *odst. 3.1* musí proběhnout před rozhodnutím o použití katodické ochrany. Toto posouzení provádí specialisté z oboru inženýrského stavitelství po konzultaci s pracovníky vyškolenými v oboru katodické ochrany.

Jestliže je katodická ochrana navržena jako způsob (nebo součást způsobu) opravy či ochrany konstrukce, je nezbytné provést další šetření pro:

- a) potvrzení vhodnosti katodické ochrany,
- b) získání vstupních dat pro návrh systému.

Tato šetření musí obsahovat zejména [50]:

- dostupnou dokumentaci

- vizuální prohlídka a průzkum odlupování
- analýza chloridů
- měření hloubky karbonatace
- betonové krytí a poloha výztuže
- vodivé propojení výztuže

Podklady musí obsahovat přinejmenším posouzení dále uvedených bodů na reprezentativním souboru:

- a) vodivé propojení mezi částmi konstrukce uvnitř každé oblasti systému katodické ochrany,
- b) vodivé propojení výztuže uvnitř části konstrukce,
- c) vodivé propojení ostatních kovových částí s výztuží.

Kritériem přijatelnosti pro tuto zkoušku musí být stabilní hodnoty a odpor menší než  $1 \Omega$  nebo rozdíl potenciálů menší než 1 mV.

- Potenciál oceli v betonu

Na reprezentativních místech (jak poškozených, tak zdánlivě nepoškozených) je nutno pomocí přenosných referenčních elektrod prošetřit korozi výztuže. Měří se přednostně v pravoúhlé mřížce na vzdálenostech nejvýše 500 mm. Není nutné zkoumat potenciál ocel-beton po celé konstrukci. Vhodnější je podrobněji prozkoumat ty plochy, kde se počítá s trvalou instalací referenčních elektrod, aby bylo možno umístit tyto elektrody na místech s nejzápornějším samovolným korozním potenciálem. Vodivé propojení výztuže v rámci každé plochy, na níž se měří potenciál ocel-beton, je zcela nezbytné a před měřením tohoto potenciálu se musí přezkoušet.

- Elektrická rezistivita betonu

Je nutno uvážit vliv rozdílů v rezistivitě betonu na systém katodické ochrany. Katodická ochrana je efektivní pouze v případě, že rezistivita uvažované železobetonové plochy pro aktivní ochranu je  $\rho_b \leq 500 \Omega\text{m}$  [47].

## 5 MONITOROVÁNÍ KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU

- Vizuální kontrola a kategorizace vod
- Mechanické a ultrazvukové zkoušky
- Metody zjišťování fyzikálních a chemických vlastností betonu

Jedná se o metody prováděné přímo v terénu. Lze provést řadu zkoušek bez porušení materiálu konstrukce a získat tak informace, z kterých lze sestavit profil poškození. Na základě těchto znalostí se potom odeberou vzorky k laboratornímu vyšetření.

Přímo na konstrukci lze zjistit:

- zda cementový tmel vykazuje dostatečně vysokou hodnotu pH,
- zda jsou přítomny chloridy,
- korozi ocelové výztuže (viz odst. 5.8),
- vlhkost betonu
- pórovitost betonu [51].

V laboratoři se zjišťuje hloubka průsaku tlakové vody na ztuhlém betonu (podle EN ČSN 12390-8). Hloubka průsaku u vodostavebného betonu by měla být max. 50 mm, u betonu C 25/30, kde

permeabilní pórovitost je  $n_p = 8-10 \%$  by hloubka průniku vody měla být max. 80 mm (viz obr. 4.5).

- Lokalizace prutů výztuže a zjišťování jejího stavu
- Detekce trhlin
- Stanovení pevnosti betonu

Pevnost betonu se stanoví na válcových jádrových vývrtech z hodnocené části konstrukce, případně na krychlích, válcích nebo hranolech vyrobených a ošetřovaných současně s hodnocenou konstrukcí. Základním rozměrem těles vyjmutých z konstrukcí je válec průměru 150 mm a výšce 300 mm umožňuje použít i válce o  $d = 100$  mm a výšce  $h = 200$  mm. Je-li štíhlost válce menší než 2, avšak nejméně 1, stanoví se válcová pevnost podle vztahů čl. 2.2.4 ČSN 73 1317, který platí, pokud pevnost leží v rozmezí hodnot 15-45 MPa [52]. V ČSN 73 1317 jsou uvedeny převodní součinitele pro přepočty válcových pevností vývrtů na krychelnou pevnost zkušebních těles.

- Metody stanovení obsahu produktů koroze v betonu a v prostředí
- Metody zjišťování korozního napadení ocelové výztuže

Zjišťování stavu ocelové výztuže prošlo složitým vývojem. V současné době jsou odbornou skupinou RILEM T 154-EMC „Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion in Concrete“ doporučovány tři metody [1]:

- poločlánkové potenciálové měření – zjišťování potenciálových map,
- měření korozní rychlosti polarizačním odporem,
- zabudovaná čidla.

Dále může být uvažováno měření elektrického odporu na konstrukci. U poločlánkové metody je korozní potenciál  $E_{\text{corr}}$  (poločlánek výztuž/beton) měřen jako potenciální rozdíl proti referenční elektrodě (poločlánek). Experimentálně změřený potenciální rozdíl mezi výztuží v betonu a referenční elektrodou závisí na typu užití referenční elektrody na korozních podmínkách koroze výztuže v betonu. Pro měření v terénu se používá měděná elektroda, ponořená do nasyceného roztoku  $\text{CuSO}_4$  (viz obr. 4.6). Tato elektroda je dostatečně odolná proti poškození a je dostatečně přesná. Kalomelová a  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  elektrody jsou užívány v laboratoři. V případě korozního makročlánku a lokalizovaného napadení výztuže, referenční elektroda na povrchu betonu neměří skutečné hodnoty korozních potenciálů, ale smíšené potenciály, závislé na poloze elektrody. Nejzápornější hodnoty potenciálů poločlánku vždy určují místo anody. Absolutní hodnoty změřených potenciálů jsou ovlivněny tloušťkou krycí vrstvy, elektrickým odporem betonu, obsahem chloridů a hodnotou pH. Ekvipotenciálové linie potenciálových map informují o místech korozního napadení výztuže, rozliší místní a plošnou korozi, ale nelze z nich odvodit absolutní hodnoty potenciálů.

#### ■ Měření přenosnou referenční CSE

Měření potenciálu oceli v betonu se provádí přenosnou referenční elektrodou vyhovující ustanovení [8] na reprezentativních plochách pomocí vysokoohmického (digitálního) voltmetru ( $> 10^9 \Omega$ ) a mřížové šablony (pravoúhlé na vzdálenost nejvýše 0,5 m). Používá se stále přenosná  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  referenční elektroda (CSE) s tím, že mezi membránou a povrchem betonu se vkládá navlhčená houba. Obvykle stačí propojení s výztuží v jednom místě desky (mostovky) s dostatečnou přesností, vzhledem k určité elektrické kontinuitě hlavní (horní) výztuže a že výše



uvedeným multimetrem lze měřit potenciály i v případě, že výztuž je spojena pouze přesahem (kontakt) nebo vázacím drátem (příčná rozdělovací – distanční výztuž, případně i dolní výztuž).

#### ■ Vztah mezi jednotlivými referenčními elektrodami

Jelikož ČSN EN 12696 [50] uvádí kritéria korozního ohrožení konstrukce a kritéria ochrany při aplikaci katodické ochrany s použitím permanentní Ag/AgCl/0,5 M KCl gel, uvádíme dále potenciály měřicích a referenčních elektrod vzhledem ke standardní (normální) vodíkové elektrodě (NHE) při teplotě 20 °C [26,2,29].

Tab. 4.1 Potenciály měřicích a referenčních elektrod vzhledem k normální vodíkové elektrodě (NHE) při 20 °C

Název elektrody	Označení	Potenciál vzhledem k NHE (V)	Druh elektrody	Použití
Vodíková, 1 n	Pt/H <sub>2</sub> /HCl	0,000	Referenční	Laboratoř
Kalomelová, SCE	Hg/Hg <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> /KCl	+ 0,245	Referenční	Laboratoř
CSE, nasycená	Cu/CuSO <sub>4</sub>	+ 0,316	Referenční	Přenosná
Argentochloridová nasycená	Ag/AgCl/KCl	+ 0,200	Referenční	Laboratoř
Argentochloridová v mořské vodě	Ag/Ag/Cl	+ 0,250	Referenční	Konstrukce v mořské vodě
Argentochloridová 0,5 mol	Ag/AgCl/0,5 M KCl gel	+ 0,252	Referenční	Permanentní do betonu
Grafitová tyč	C (99,9)	+ 0,116 až 0,222	Měřicí	Permanentní do betonu
Zinek	Zn (99,9)	-0,760 až -0,780	Měřicí	Permanentní do vodných roztoků

#### Poznámka 2:

Rozdíl mezi CSE a permanentní Ag/AgCl/beton je + 0,064 V; jestliže hodnota ochranného potenciálu měřeno CSE je  $E_p = - 0,85$  V měřeno Ag/AgCl/beton je

$$E_p' = -0,786 \sim -0,79 \text{ V.}$$

#### ■ Kritéria korozního ohrožení konstrukce

Korozní potenciál ocelové výztuže, včetně kontinuálního měření (pomocí tzv. Potential Wheel = potenciálové kolo o Ø 150 mm) s grafickým znázorněním potenciálu počítačem, čímž se získá ekvipotenciální vrstevnicová mapa (viz obr. 4.7 a obr. 4.8). Při použití vysokoohmického voltmetru a referenční Cu/CuSO<sub>4</sub> elektrody je při změřených hodnotách  $E_{CORR}$  pravděpodobnost korozního procesu:

$$< - 0,35 \text{ V} \quad > 90 \%$$

$$> - 0,20 \text{ V} \quad < 10 \%$$

$$- 0,20 \text{ až } - 0,35 \text{ V} \quad \text{cca } 50 \%$$

- Vyhodnocení korozního průzkumu a návrh opatření

V případě, že ze stavebně-technického průzkumu u existujících železobetonových konstrukcí, se zřetelem na ekonomické a provozní aspekty, vyplyne možnost použití elektrochemické ochrany, je do koncepční skupiny řešící opravu, přizván i příslušný specialista. V poměrech ČR přichází v úvahu hlavně starší mosty, u kterých mostovka je znečištěna chloridy a konstrukce s přísadou  $\text{CaCl}_2$  v betonu. V některých případech, i když bylo zakázáno používat na mostě sůl pro odstraňování sněhu a náledí v zimním období a údržba sůl údajně nepoužívala, bylo prokázáno, že se sůl na most dostala na pneumatikách vozidel z okolních úseků komunikace.

Jsou známy případy mostů postavených ve spádu, kde by v zimě bez použití rozmrazovací soli bylo nutno most uzavřít pro nesjízdnost. Problém nastává v případě, že nefunguje odvodnění mostu (ucpané guly) a sůl zůstává na povrchu delší dobu, než je nezbytné a dochází ke korozi výztuže. V takovém případě stojíme před rozhodnutím: most nákladně opravit nebo dokonce zbourat nebo použít jeden ze způsobů elektrochemické ochrany a sice:

- katodickou ochranu podle ČSN EN 12696 [50],
- elektrochemickou úpravu železobetonu realkalizací podle ČSN CEN/TS-14038-1 [55]
- elektrochemickou úpravu vyztuženého betonu extrakcí chloridů podle ČSN CEN/TS-14038-2 [54].

## 6 ZÁSADY KATODICKÉ OCHRANY OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU

### 6.1 VŠEOBECNĚ

Každá instalace katodické ochrany musí zahrnovat anodový systém, jehož účelem je přivést ochranný proud z anody přes beton k povrchu ocelové výztuže. Systém katodické ochrany musí dále obsahovat kabely spojující anodu, popř. ocel, s oběma póly zdroje stejnosměrného napětí sloužícího jako zdroj proudu pro katodickou ochranu. Základními prvky systémů katodické ochrany jsou referenční i jiné elektrody a ostatní snímače, které tvoří **monitorovací systém**. Údaje z elektrod a snímačů lze sbírat a zobrazovat na přenosných přístrojích nebo trvale instalovaných přístrojích, které mohou být ovládány automaticky či ručně. Celý systém katodické ochrany musí být navržen, instalován a zkoušen tak, aby byl schopen činnosti v předpokládaném prostředí po stanovenou dobu.

Schéma zapojení katodické ochrany výztuže s usměrňovačem pro různé druhy anod jsou na *obr. 4.9, 4.10, 4.11*.

### 6.2 ZÁSADY KATODICKÉ OCHRANY OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU

Ocel v betonu je obvykle proti korozi chráněna pasivací oceli, k níž dochází působením silně alkalických roztoků obsažených v pórech betonu. Na povrchu oceli se vytváří stabilní vrstva oxidů, která zabraňuje anodickému rozpouštění železa. Další ochranná opatření jsou nezbytná tehdy, jestliže průnik chloridů na rozhraní oceli a betonu nebo karbonatace betonu sníží alkalitu roztoků v pórech na rozhraní oceli a betonu, což způsobí nestabilitu vrstvy oxidů (dojde k depasivaci) [50].

Pokud je beton znečištěn chloridy, způsobí chloridové ionty depasivaci, která vede ke korozi, jestliže ke zbylým pasivním oblastem má přístup kyslík.

Depasivaci a následnou korozi lze popsat zavedením specifické hodnoty potenciálu oceli v betonu, tzv. potenciálu bodové koroze  $E_{\text{pit}}$ . Při kladnějších hodnotách potenciálu než  $E_{\text{pit}}$  prudce roste rychlost rozpouštění železa, což vyvolává vysoké hodnoty rychlosti koroze v malých lokalizovaných oblastech na povrchu oceli, zatímco při potenciálu nižším (tj. zápornějším) než  $E_{\text{pit}}$  rychlost koroze klesá. Cílem katodické ochrany je posunout potenciál oceli v betonu do oblasti, kde vznik koroze nebo pokračování a šíření již vzniklé koroze jsou

natolik potlačeny, že porucha způsobená korozi je po dobu životnosti konstrukce nepravděpodobná.

U železobetonu může porucha způsobená korozi zahrnovat praskání a odlupování betonu v důsledku namáhání vyvolaného objemnými korozními zplodinami. K tomu může dojít již při malém úbytku kovu na povrchu výztuže (50  $\mu\text{m}$ ) [55].

U železobetonových konstrukcí lze katodickou ochranu uskutečnit polarizací výztuže vnějším proudem. Za tímto účelem se na povrch upevňují, natírají nebo dovnitř zabetonovávají anody, které se v případě ochrany vloženým proudem připojují na kladný pól zdroje. Pro beton s nízkou rezistivitou se ukázaly vhodné některé postupy katodické ochrany používající obětovanou anodu. Tyto postupy nevyžadují napájení stejnosměrným proudem, protože proud pro katodickou ochranu je zajištěn korozi obětované anody (obvykle zinkové).

Katodový systém je tvořen ocelovou výztuží. Při použití vloženého proudu je záporný pól zdroje připojen na ocelovou výztuž. Při katodické ochraně obětovanou anodou je tato anoda (obvykle zinková) připojena přímo na ocelovou výztuž.

Beton, zejména roztok v jeho pórech, slouží jako elektrolyt umožňující průchod proudu a s ním spojený pohyb iontů. Změny potenciálu oceli v betonu se zjišťuje pomocí elektrod zapuštěných do betonu nebo umístěných na jeho povrchu. Tyto elektrody se spolu s vhodným přístrojovým vybavením a propojením s výztuží používají k měření potenciálů oceli v betonu vůči elektrodám.

### 6.3 KRITÉRIA OCHRANY

Jestliže během životnosti konstrukce nebo během provozu pravděpodobně nastanou podmínky, které napomáhají vzniku koroze výztuže, je katodická ochrana jedním ze způsobů prevence proti vzniku koroze oceli v betonu. Dostatečná ochrana je poskytnuta tehdy, jsou-li v reprezentativních místech konstrukce splněna specifická kritéria ochrany. Kritéria ochrany uvedená v této normě vycházejí z elektrochemických úvah o korozních procesech a z praktických zkušeností.

V praxi lze rozlišit dva případy. Pokud cílem katodické ochrany je zvýšit korozní odolnost oceli v konstrukcích ze železobetonu a předpjatého betonu, u nichž se během jejich životnosti očekává znečištění chloridy, má se už od počátku jejich provozu použít malá katodická polarizace rozhraní oceli a betonu. Tato polarizace má udržovat potenciál oceli v betonu na hodnotě nižší (zápornější) než  $E_{\text{pit}}$ , aby se zabránilo vzniku koroze. Záporná polarizace také omezuje nebo znemožňuje migraci chloridových iontů do ocelové výztuže, a tak jim brání v depasivaci oceli, pokud je anodový systém instalován na povrchu, přes který nastává znečištění. Tato předběžná ochranná opatření se někdy označují jako „preventivní katodická ochrana“ a používají se u nových konstrukcí nebo u již provozovaných konstrukcí, u kterých chloridové ionty ještě nepronikly k oceli a nedošlo k depasivaci.

U starších konstrukcí se zkorodovanou ocelovou výztuží je katodická ochrana součástí jejich obnovy a jejím cílem je snížit rychlost koroze výztuže z významných hodnot na zanedbatelné. K tomuto účelu se má potenciál oceli v betonu snížit do oblasti ochranného potenciálu  $E_p$ . Korozní potenciál  $E_{\text{corr}}$  i ochranný potenciál  $E_p$  závisí na podmínkách prostředí (obsahu chloridů, pH v místech anod, teplotě, obsahu kyslíku, vlhkosti). Vzhledem ke složitosti spolupůsobení těchto činitelů a k praktickým zkušenostem nelze definovat jedinou typickou hodnotu ochranného potenciálu a pro katodickou ochranu oceli v betonu to ani není nutné.

Toto složité spolupůsobení činitelů způsobuje, že pro hodnocení katodické ochrany oceli v betonu je vždy zapotřebí řada kritérií.

Účinnost katodické ochrany se kontroluje elektrickým měřením, a to buď měřením potenciálu, nebo proudu (zabudované pomocné ocelové elektrody – „Coupon“ nebo proudovou hustotou), změnou potenciálu (měření depolarizace).

### 6.3.1 Potenciálové kritérium

Měření potenciálu beton-výztuž se provádí na reprezentativních místech konstrukce (stanovených korozním průzkumem) při zapojení podle *obr. 4.6* nebo pomocí permanentní referenční elektrody zabudované v betonové konstrukci v blízkosti katodicky chráněné výztuže (v minimální vzdálenosti 1 až 2 cm – viz *obr. 4.9 odkaz 3* – měřicí sonda).

Potenciálová kritéria jsou uvedena v *tab. 4.2*

*Tab. 4.2* Potenciálové kritérium ochrany prosté výztuže v betonu

Referenční Elektroda	Potenciál samovolné koroze $E_n$ (V)	Minimální ochranný potenciál $E_p$ (V)	Mezní kritický potenciál $E_l$ (V)
Přenosná Cu/CuSO <sub>4</sub> (CSE)	-0,100 <sup>(1)</sup> až -0,400	-0,780 <sup>(2)</sup>	-1,160 <sup>(3)</sup>
Permanentní Ag/AgCl/0,5 M KCl gel (AgCl)	-0,040 <sup>1</sup> až -0,340	-0,720	-1,100

(1) Při vysoké koncentraci chloridů  $E_n = + 0,400$  V (+ 0,340 V)

(2) Bez IR-spádu (vypínací potenciál)

(3) V případě předpínací výztuže  $E_l = -0,960$  V (-0,900 V)

#### Poznámka:

Kritéria se týkají železobetonových konstrukcí vystavených působení atmosféry.

### 6.3.2 Depolarizační kritérium

Změna potenciálu směrem ke kladným hodnotám za dobu nepřesahující 24 hodin od vypnutí usměrňovače musí být nejméně 100 mV.

Změna potenciálu za dobu delší než 24 hodin od vypnutí (48 hodin) by měla být nejméně 150 mV.

### 6.3.3 Kritérium hustoty ochranného proudu

Návrhová hodnota pro „preventivní“ katodickou ochranu je od 0,2 mA.m<sup>-2</sup> do 2,0 mA.m<sup>-2</sup> (na plochu povrchu chráněné výztuže).

Pro katodickou ochranu existujících (starších) konstrukcí je pro výztuž bez ochranného povlaku hustota od 2 mA.m<sup>-2</sup> do 20 mA.m<sup>-2</sup>.

## 6.4 VLIV KONCENTRACE CHLORIDŮ NA PARAMETRY OCHRANY

Obr. 4.12 ukazuje zásadní vliv koncentrace chloridů v betonu (resp. hmotnostní podíl v cementu). Z toho důvodu je důležité věnovat velkou pozornost koroznímu průzkumu, aby bylo možno v projektové dokumentaci stanovit parametry katodické ochrany.

## 7 PŘÍKLADY POSTUPU NAVRHOVÁNÍ A VÝHODNÝCH APLIKACÍ KATODICKÉ OCHRANY VÝZTUŽE V BETONU

### 7.1 POSTUP NAVRHOVÁNÍ

#### 7.1.1 Návrh koncepce

Po posouzení proveditelnosti a potvrzení katodické ochrany jako možného způsobu opravy se předběžně stanoví poloha a velikost anodických oblastí. Přitom se vychází z těchto i z dalších faktorů: obsah chloridů v betonu, rezistivita betonu, obsah vlhkosti v betonu, plocha povrchu výztuže, distribuce a odhadnutá velikost proudu, požadovaná životnost, provozní podmínky, hmotnost, postup instalace a omezující podmínky. Podobně se postupuje i při předběžných úvahách o typu anody, vedení kabelů a možném umístění transformátorů s usměrňovači.

#### 7.1.2 Typ anodového systému

Z plochy povrchu výztuže a předpokládané nebo naměřené katodické proudové hustoty pro požadovaný stupeň ochrany se vypočte potřebný ochranný proud a pak provozní anodická proudová hustota pro každou anodu. Tato hodnota se použije k potvrzení typu anody, přičemž se berou v úvahu faktory uvedené v odst. 9.2 a v případě potřeby k volbě materiálu krycí vrstvy.

#### 7.1.3 Uspořádání anodového systému

Naplňuje se velikost a uspořádání anodické oblasti a vypočte se vzdálenost mezi přívody potřebná ke splnění požadavků na ochranný proud a na minimalizaci napěťových rozdílů uvnitř oblasti. Vybere se materiál anodového systému, jeho uspořádání a spojují primární anody s kabelem, aby se zajistila požadovaná redundance (rezerva) a minimalizovaly se úbytky napětí.

#### 7.1.4 Dodávka proudu

Z potřeby ochranného proudu a požadované rezervní kapacity se vypočte celkový dodávaný proud.

Typická potřeba proudu je od 1 mA/m<sup>2</sup> do 20 mA/m<sup>2</sup> (oceli) u oceli v betonu znečištěném chloridy (pro katodickou ochranu) a od 0,2 mA/m<sup>2</sup> do 2 mA/m<sup>2</sup> (oceli) u pasivní oceli v betonu neznečištěném chloridy (pro preventivní katodickou ochranu).

Potřeba proudu pro katodickou ochranu s časem klesá v důsledku polarizace (chemických změn na rozhraní a v okolí rozhraní mezi ocelí a betonem).

Na částech výztuže ležících nejbližší k anodě bude katodická proudová hustota vyšší než na částech vzdálenějších od anody.

### 7.1.5 Připojení výztuže

Navrhne se připojení výztuže jak k proudovým obvodům, tak k monitorovacím obvodům, a vypočte se počet a místa připojení tak, aby se zajistila požadovaná rezerva návrhu a minimalizovaly se úbytky napětí.

### 7.1.6 Kabely

Stanoví se průřezy a vedení kabelů pro připojení obou pólů tak, aby se zajistila požadovaná rezerva a minimalizovaly se napěťové rozdíly. Podobným způsobem se postupuje při stanovení míst všech připojovacích krabic.

### 7.1.7 Transformátor s usměřňovačem

Z potřeby ochranného proudu a příslušné rezervy se s ohledem na odpor obvodu vypočte výstupní napětí transformátoru s usměřňovačem. Rovněž se navrhnu doplnkové transformátory s usměřňovačem potřebné k monitorování atd. a pro zabezpečení, že budou splněny požadavky na dodávku střídavého proudu.

### 7.1.8 Monitorování

Stanoví se typ, počet a umístění snímačů a vhodné přístrojové vybavení pro zajištění požadovaného stupně monitorování a řízení. Rovněž se stanoví požadavky na správu dat.

### 7.1.9 Dokumentace

Návrh, specifikace materiálů a součástí, instalační postupy a uspořádání systému se dokumentují spolu s plánem jakosti podrobně popisujícím zkoušky požadované v jednotlivých fázích práce a postup uvedení do provozu.

## 7.2 PŘÍKLAD DÁLKOVÉHO OVLÁDÁNÍ STANICE KATODICKÉ OCHRANY VÝZTUŽE V BETONU

Kontrola (monitorování) korozního stavu konstrukce nebo stupně katodické ochrany může být prováděna ručně nebo automaticky, na místě nebo dálkově (např. z kanceláře) do vzdálenosti desítek a stovek kilometrů.

Pro dálkové monitorování je m.j. nezbytné zabudovat do konstrukce měřicí elektrody (snímače) jako:

- permanentní referenční elektrody,
- ocelové elektrody jako korozní vzorky (na principu měření elektrického odporu nebo metodou polarizačního odporu pro stanovení korozní rychlosti),
- ocelové elektrody paralelně připojené k chráněné konstrukci pro stanovení stupně katodické ochrany,
- sonda pro měření měrného odporu v daném místě a změně vlhkosti v průběhu času.

Na *obr. 4.13* je vyznačen příklad dálkového monitorování katodické ochrany železobetonových sloupů, u kterých byla zjištěna koroze výztuže v důsledku přítomnosti chloridů ( $\text{CaCl}_2$  – přísady pro urychlení tuhnutí betonu, dále vlivem soli rozptýlené ve vzduchu –  $\text{NaCl}$  při mořském pobřeží) i vlivem kyselých dešťů (oxid síry).

Po opravě odrolených částí betonové konstrukce a po otryskání betonového povrchu se nanese na povrch tzv. vodivý nátěr (na bázi grafitu a chlorkaučuku) v tl. 800 až 2000  $\mu\text{m}$ , přes který se provede krycí nátěr. Na vodivý nátěr jsou připevněny pomocné elektrody (např. z poplatinovaného titanu) pro rozvod ochranného proudu přes vodivý nátěr do chloridy znečištěného betonu k ocelové výztuži, která je tak katodicky chráněna (vodivě propojená výztuž je kabelem připojena k mínus pólu usměrňovače). Kabelové vývody od měřicích elektrod zabudovaných v kritických místech chráněné konstrukce jsou zavedeny do měřicí ústředny.

Malá měřicí ústředna napájená bateriemi a chráněná proti povětrnostním vlivům je situována v blízkosti chráněné konstrukce podobně jako i řízený usměrňovač a jednotka řízená mikroprocesorem. Hodnoty mohou být odečítány buď pracovníkem přes měřicí ústřednu nebo pomocí mikroprocesoru může být systém řízen automaticky. Další způsob je dálkové monitorování, které umožňuje omezit počet měření v místě instalace katodické ochrany. Měřené hodnoty mohou být registrovány v pravidelných intervalech nebo podle potřeby – buď připojením měřicí ústředny přímo k počítači nebo použitím systému MODEM připojeném k počítači umístěném v kanceláři v jiném místě. Počítač je naprogramován tak, že po telefonu je možno vytočit číslo, v jehož blízkosti se nachází instalace, přičemž je možno sledovat zapínací a vypínací potenciál, výstupní napětí a proud usměrňovače. Tyto hodnoty se ukládají do paměti počítače a v případě potřeby mohou být zakresleny do grafu.

Rutinní měření může být např. doplněno metodou polarizačního odporu, které umožňuje přímé měření korozní rychlosti. Při této technice malý proud prochází ocelovou elektrodou umístěnou v betonu. Proud způsobuje změnu potenciálu oceli (měřeno permanentní referenční elektrodou). Vzájemný vztah (korelace) mezi touto změnou a použitým proudem ukazuje na korozní rychlost oceli v tomto místě.

### 7.3 PŘÍKLADY EFEKTIVNÍHO A EKONOMICKÉHO POUŽITÍ KATODICKÉ OCHRANY

První použití katodické ochrany mostovky (koroze v důsledku použití rozmrazovací soli) bylo v roce 1973 v Kalifornii, jak již bylo uvedeno v odst. 2. Jako pomocné anody bylo použito fersilitových elektrod v koksovém hrášku ve vrstvě tl. 50 mm + asfalt obsahující uhlík. Od té doby pokračoval intenzivně výzkum a vývoj nových typů pomocných anod a tzv. vodivých nátěrů (na vertikální plochy, např. zinek nanesený ve vrstvě 0,5 mm, tj. 3,7 kg čistého Zn na 1  $\text{m}^2$ ). Pro katodickou ochranu příčných nosníků se také uplatňuje elektricky vodivá polymerní síťovina s torkretovou krycí vrstvou (viz obr. 4.14).

Pro vodorovné povrchy je možno použít diskrétní anodový systém (s dosahem do 0,6 m od kraje pomocné anody) v kombinaci s vodivým povlakem (např. zinku nebo tzv. vodivým polymerním systémem (viz obr. 4.10) nebo některý z druhů kovových síťovin. Ve Velké Británii byla s úspěchem vyzkoušena síťovina typu Elgard (firmy Eltech System Corporation, Chardon, USA) na bázi vysoce čistého titanu s aktivovaným povrchem tvořeným elektricky vodivým suboxidem titanu (viz obr. 4.11).

Např. typ Elgard 150 Anode Mesh má tyto parametry: dodávka v kotoučích šířky 1 140 mm, délky 76 až 152 m ohmický odpor pásu šířky 1,14 m: 0,085  $\Omega/\text{m}$ .

Při použití tyče z titanu obdélníkového průřezu:  $\delta = 12,7$  mm, tl. 1,0 mm, dl. 3,05 m klesne ohmický odpor na 0,023  $\Omega/\text{m}$  při vzdálenosti tyčí (mříž): 18,3 m / 7,31 m. Měrný odpor povrchové aktivované vrstvy:  $56 \cdot 10^{-6}$  ohm.cm =  $56 \cdot 10^{-8}$   $\Omega\text{m}$ .

Chemické složení elektricky vodivého titanového substrátu:

C – 0,08; Fe – 0,2; N – 0,03; O – 0,18; H – 0,15 max., zbytek Ti.

Orientační hustota ochranného proudu:

$$j_o = 10 \text{ mA.m}^{-2} \text{ podle povrchu výztuže}$$

$$j_o = 20 \text{ mA.m}^{-2} \text{ podle povrchu betonu.}$$

Při návrhu parametrů ochrany se uvažuje na 1 usměřovač 300 až 600 m<sup>2</sup> betonového povrchu **mostovky**. Pomocné anody se připojují ve 4 až 6 paralelních větvích. Hustota ochranného proudu může klesnout až na 2,5 mA.m<sup>-2</sup> je-li aplikována pasivní ochrana (vodotěsné membrány, cementová krycí vrstva o vysoké hustotě na vrchní části vodivého povlaku nebo na anodě z drátěného pletiva). Podle provedených instalací se hustota ochranného proudu pohybovala v rozmezí  $j_o = 5$  až 15 mA.m<sup>-2</sup>. Pořizovací náklady činily 60 Lstg/m<sup>2</sup> (u vodorovných velkých ploch) až 300 Lstg/m<sup>2</sup> (u vertikálních ploch budov, balkonů), průměrně však pro mostovky 100 Lstg/m<sup>2</sup>. Pro srovnání: výměna povrchu mostovky stojí nejméně 200 Lstg/m<sup>2</sup> (ceny v r. 1988).

Výhodná aplikace katodické ochrany je u starších nosných konstrukcí budov, kde k urychlení tuhnutí byl použit chlorid vápenatý (CaCl<sub>2</sub>). Na obr. 4.15 je znázorněn příklad z Holandska [56], kde po 10 letech došlo ke značné korozi výztuže. V rámci korozního průzkumu bylo zjištěno m.j.: při výstavbě byl použit Portlandský cement, krytí výztuže 20 až 30 mm, hloubka karbonatace až 20 mm, obsah chloridů 0,3 až 0,8 % (průměrně 0,6 %) vztaženo k hmotnosti cementu, tedy průměrně:  $0,3 \cdot 300 / 100 = 1,8$  kg na m<sup>3</sup> betonu. Parametry katodické ochrany: výstupní napětí  $U = 1,3$  až 2,5 V (v zimě), průměrná hustota ochranného proudu  $J_o = 8$  mA / m<sup>2</sup> povrchu výztuže, což odpovídá anodické proudové hustotě  $J_A = 35$  mA/m<sup>2</sup>. Pro kontrolu účinnosti ochrany se osvědčilo depolarizační kritérium. Po vypnutí zdroje byl spád napětí  $\Delta U_p = 110$  až 150 mV po 4 hodinách a  $\Delta U_p' = 180$  až 250 mV (po 24 hodinách).

## 7.4 ZÁVĚR

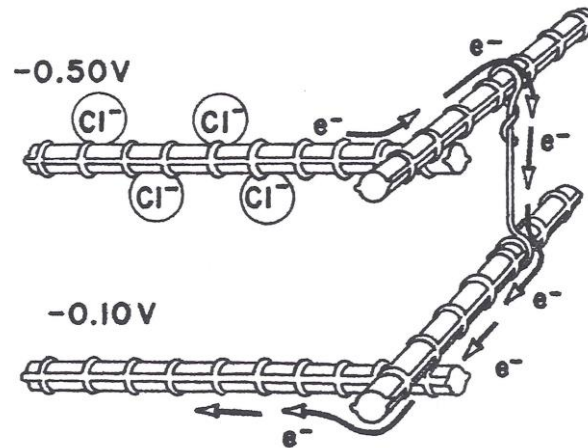
Největší zkušenosti z oprav železobetonových mostovek poškozených chloridy, které se dostaly do ztvrdlého betonu při zimní údržbě solí, mají ve Spojených státech. Důvodem je, že nepoužívali dlouhou dobu vodotěsnou izolaci a řada železobetonových mostovek se tak dostala do velmi špatného stavu. Provedené opravy v USA měly jen částečný úspěch a názory, které technologické postupy oprav zvolit se rozcházejí. Ve Spojeném království je relativně menší zkušenost s takovými poruchami mostů i s ohledem na to, že již nejméně 35 let se na nově budovaných mostech používá vodotěsná izolace [30].

Podle dosavadní praxe nejcennějším šetřením v rámci korozního průzkumu je měření potenciálu povrch betonu – výztuž pomocí přenosné referenční elektrody, které umožňuje odhalit i menší oblasti koroze výztuže. V odůvodněných případech se přikročí k měření elektrické rezistivity a k odvrtávání vzorků a chemické analýze chloridů a případně k dalšímu šetření.

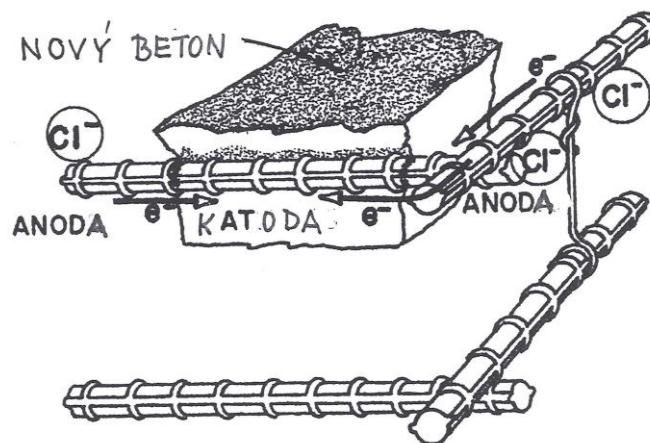
Některé problémy byly vyřešeny tím (u nových konstrukcí), že se pro urychlení tuhnutí betonu již nepoužívá chlorid vápenatý.



## Obrázky k příloze č. 4



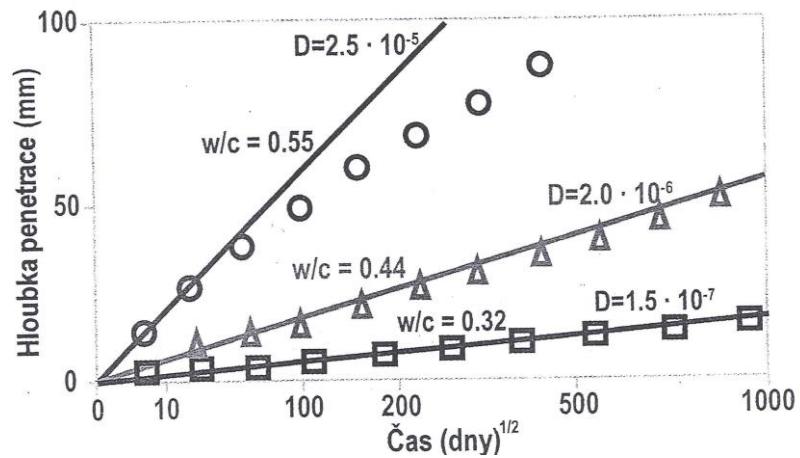
Obr. 4-1 Příklad korozního makročlánku v důsledku rozdílu koncentrace chloridových iontů na mostovce



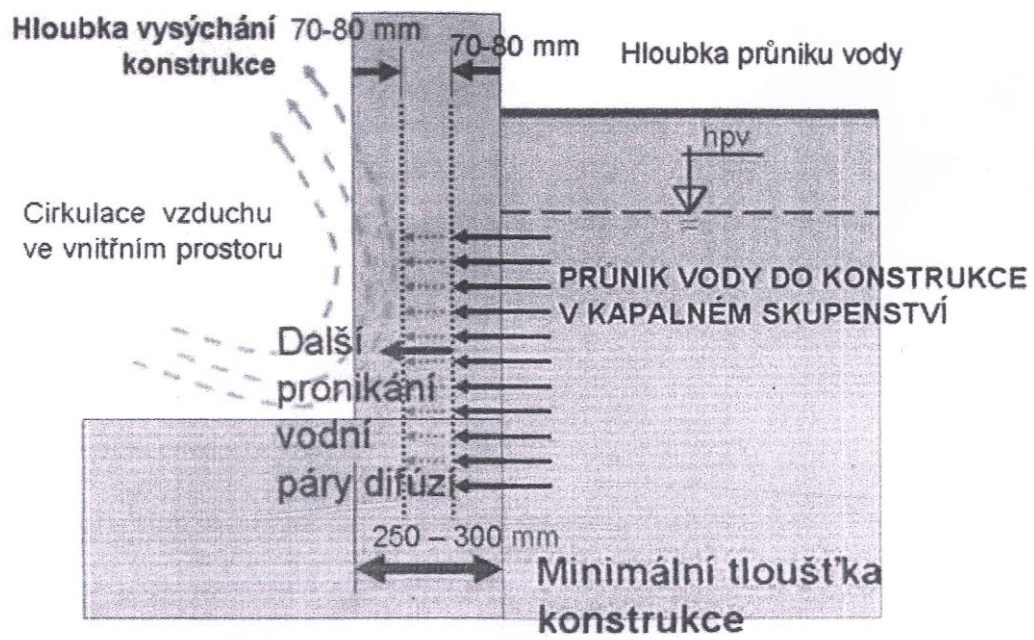
Obr. 4-2 Korozní makročlánek vznikající po aplikaci betonové „záplaty“ v místě odstraněného betonu znečištěného chloridy



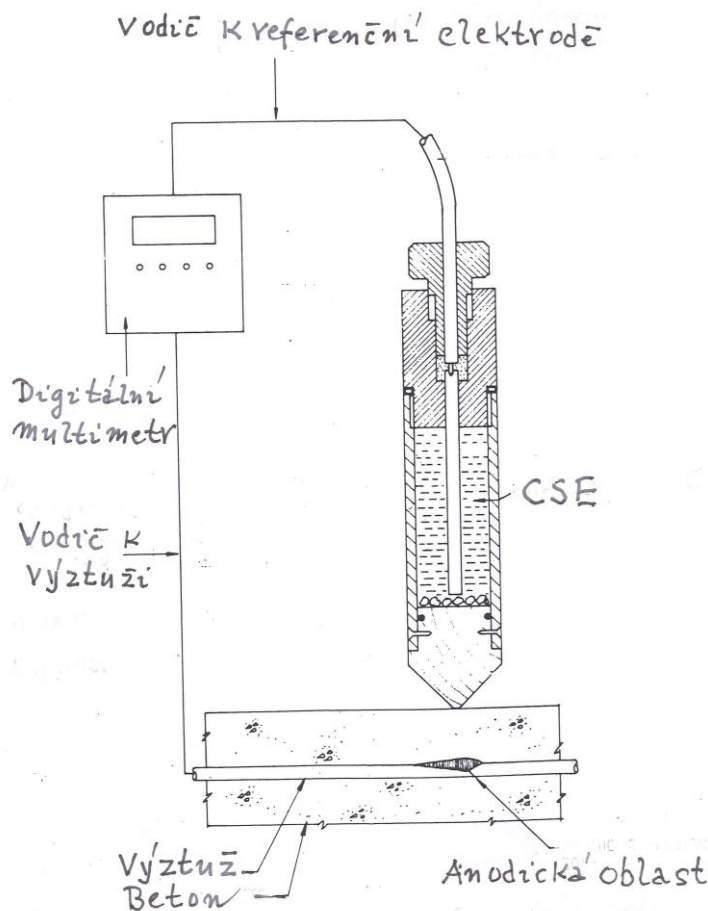
Obr 4-3 Korozí ocelové výztuže přímořských konstrukcí



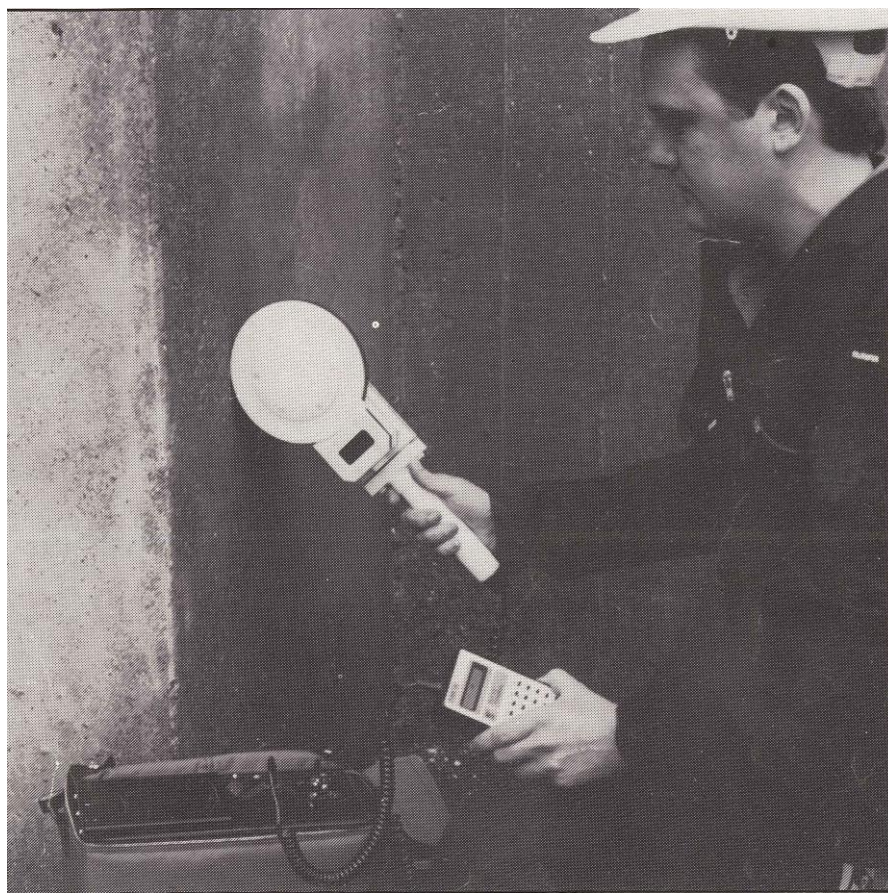
Obr. 4-4 Hloubka penetrace chloridů v závislosti na čase. Popisky v grafu indikují hodnoty difúze  $D$  (mm<sup>2</sup>/s) a vodního součinitele ( $w/c$ ). Doba ošetřování před ponořením do roztoku  $\text{CaCl}_2$ : 3 dny



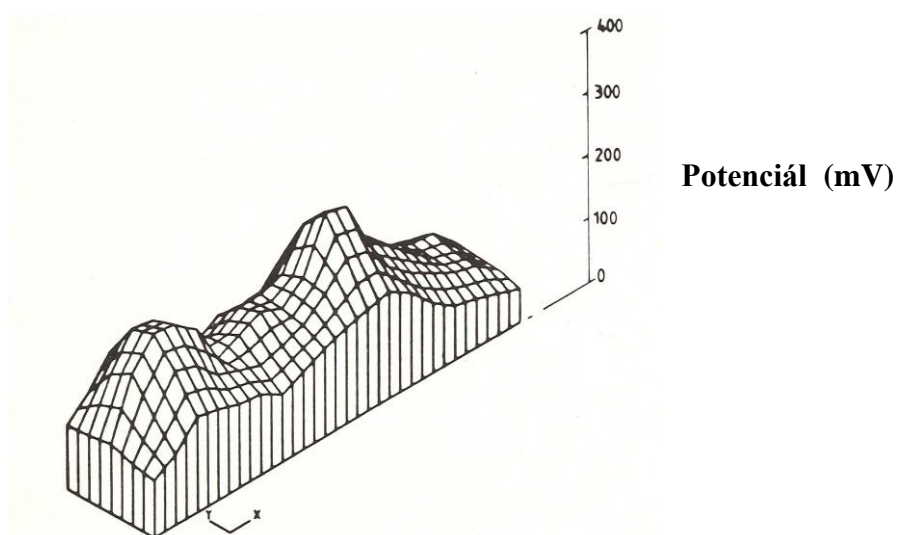
Obr. 4-5 Hloubka průsaku vody do železobetonové konstrukce



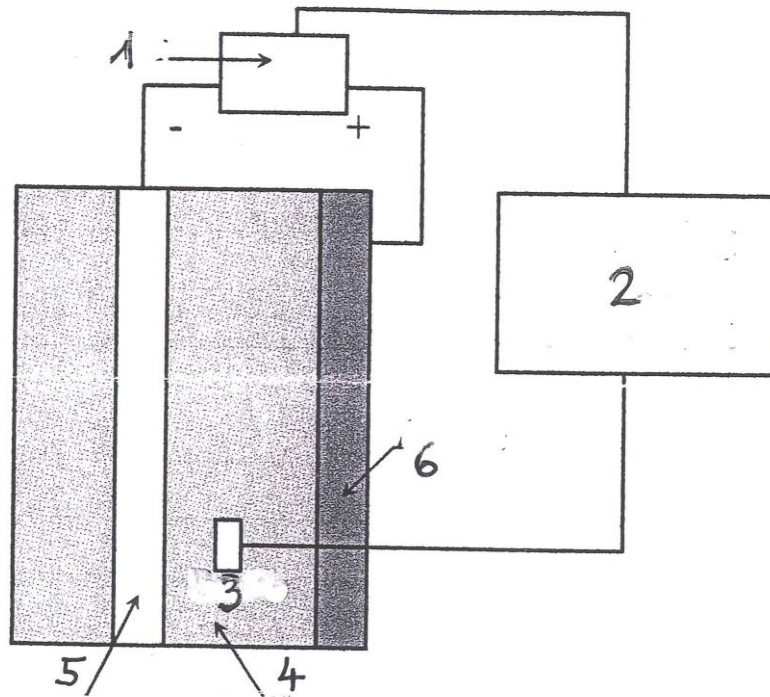
Obr. 4-6 Potenciálová měřicí technika (CSE)



Obr. 4-7 Referenční CSE ve formě potenciálového kola

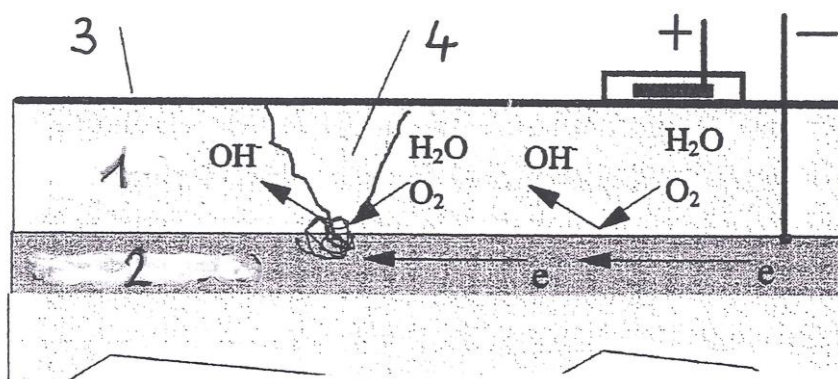


Obr. 4-8 Ekvipotenciálová vrstevnicová mapa



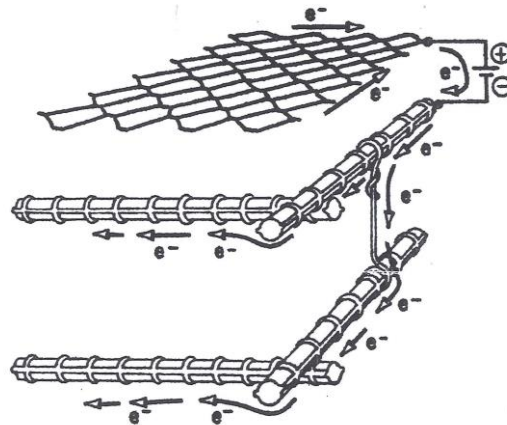
1 – Zdroj ss proudu; 2 – Monitorovací a řídicí jednotka; 3 – Měřicí sonda; 4 – Beton;  
5 – Ocelová výztuž (katoda); 6 – Vodivý povlak (anoda);

Obr. 4-9 Schéma zapojení katodické ochrany s usměřňovačem a s monitorovací jednotkou včetně měřicí sondy

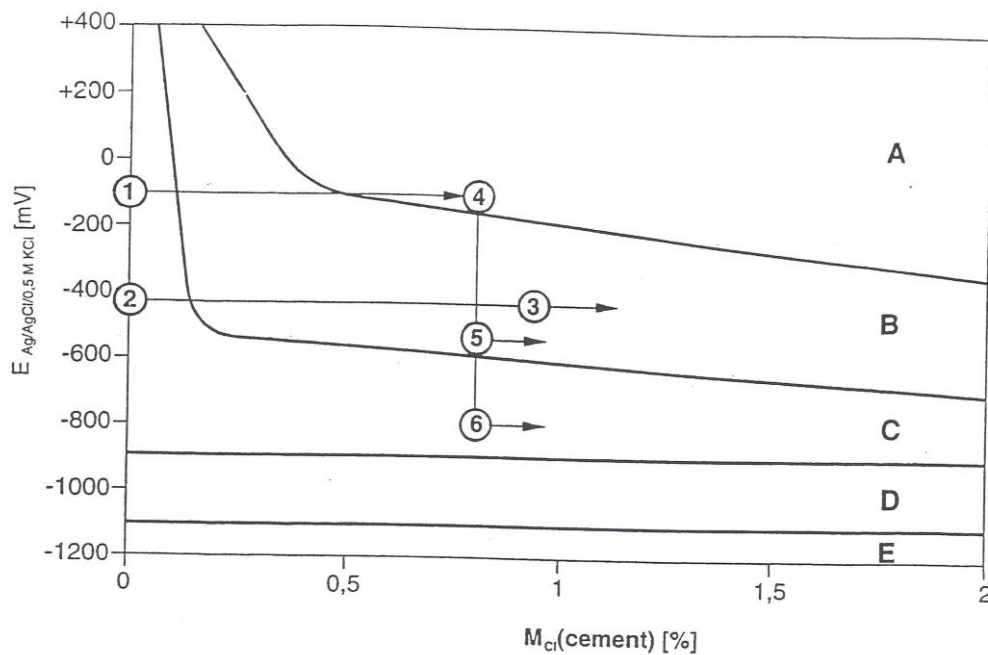


1 – Beton; 2 – Výztuž; 3 – Vodivý povlak (anoda); 4 – Betonová záplata korozně narušeného betonu;

Obr. 4-10 Katodická ochrana s anodou z elektricky vodivého povlaku



Obr. 4-11 Katodická ochrana výztuže s anodou z poplatinovaného titanu ve tvaru mřížky



Schematické znázornění vývoje hodnot potenciálu a obsahu chloridů na povrchu ocelové výztuže během jejího technického života [27].

- oblast A vznik a růst korozních důlků
- oblast B korozní důlky nevznikají, ale rostou
- oblast C korozní důlky nevznikají, ani nerostou
- oblast D nebezpečí vodíkové křehkosti u vysokopevnostních ocelí
- oblast E Zhoršení soudržnosti mezi ocelí a betonem

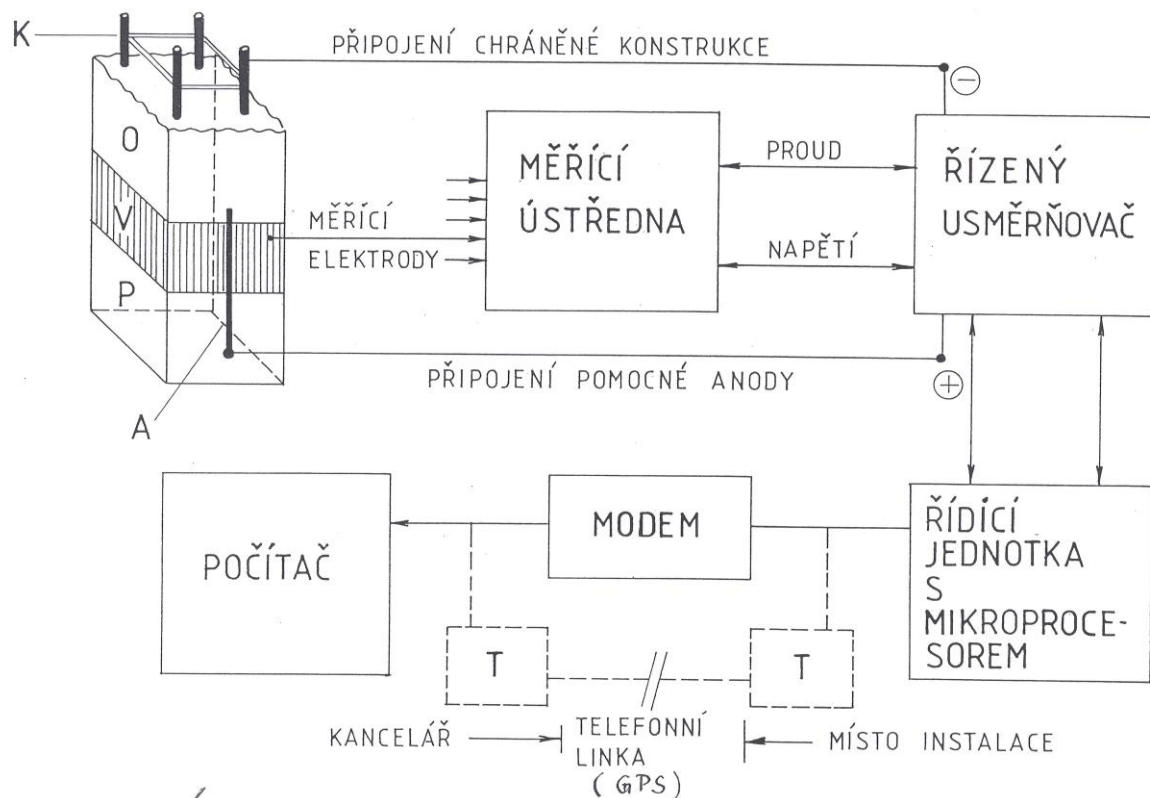
Katodická prevence (1→2→3)

Katodická ochrana obnovující pasivitu (1→4→5)

Katodická ochrana snižující korozní rychlost (1→4→6)

Katodická prevence se aplikuje od bodu 1, katodická ochrana až po vzniku koroze od bodu 4

Obr. 4-12 Závislost potenciálu bodové koroze na obsahu chloridů (hmotnostní podíl v cementu %)

**Legenda:**

K – Ocelová výztuž železobetonové konstrukce, znečištěné chloridy

A – kovová komponenta pomocné anody

O – otryskaný betonový povrch

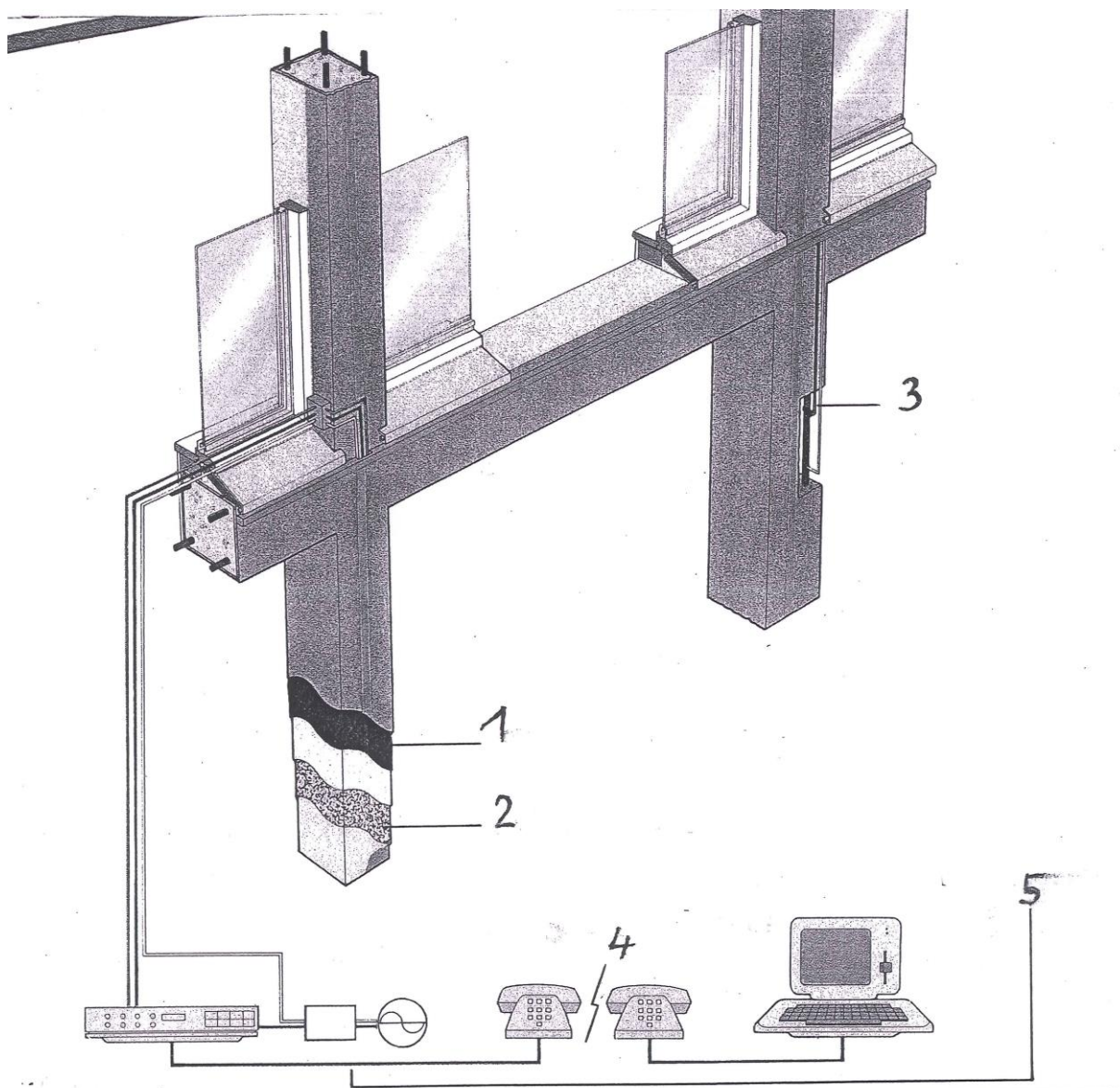
V – Vodivý nátěr (pro rozvod ochranného proudu z kovové elektrody k ocelové výztuži)

P – Povrchový (kosmetický) nátěr

T – telefonní přístroj

Modem – zařízení pro demodulaci a opětovnou modulaci přenášeného signálu (např. pomocí systému GPS)

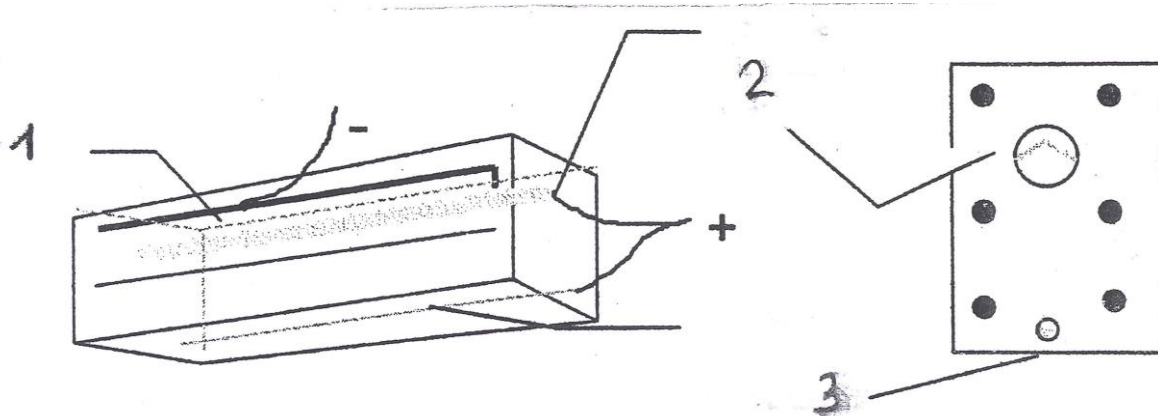
Obr. 4-13 Schéma dálkového monitorování katodické ochrany



**1** – Vodivý povlak; **2** – Betonový povrch po otryskání ocelovým pískem; **3** – Monitorovací sonda; **4** – Napájecí a řídicí jednotka; **5** – Dálkové monitorování;

*Obr. 4-14* Příklad katodické ochrany nosných konstrukcí budov s aplikací vodivého povlaku





**1** – Ocelová výztuž  $\varnothing$  16 mm; **2** – Vrtaná sonda s páskovou titanovou anodou zaplněná cementovou maltou; **3** – Pomocná drátová anoda z poplatinovaného titanu;

*Obr. 4-15* Katodická ochrana konzolového nosníku s anodami z poplatinovaného titanu

## 10.5 PŘÍLOHA č. 5 – VLIV BLUDNÝCH PROUDŮ NA VODIČE ULOŽENÉ V ZEMI

### 1 ÚVOD

Výpočet rozdělení stejnosměrného proudu a potenciálu podél liniové konstrukce v důsledku jeho úniku ze železničních nebo tramvajových kolejnic do země tekoucí směrem k napájecím stanicím, lze provést pouze při zavedení několika zjednodušujících předpokladů [57,58,59,60]:

- po celé délce liniové konstrukce je homogenní horninové prostředí (rezistivita  $\rho$ );
- lineární závislost mezi potenciálem a hustotou proudu;
- liniová konstrukce je uložena v zemi v homogenním poli bludných proudů;
- přechodový odpor mezi liniovou konstrukcí a zemí je stejný po celé sledované délce konstrukce;
- proud protékající liniovou konstrukcí nenaruší u obou konců rovnoměrnost proudového pole;

Ve výpočtu na obrázcích a tabulce je zavedeno toto označení:

LK – liniová (dlouhá) konstrukce o délce  $L$  (km)

NK – neliniová konstrukce o délce  $L' \leq 100\text{m}$

$C_1, C_2$  – integrační konstanty

$K_1, K_2, K_3$  – pomocné konstanty

$L$  – délka liniové konstrukce (LK) (km)

$L'$  - délka neliniové konstrukce (NK) (km, m)

$x$  – vzdálenost místa  $x$  od bodu A (km)

$b$  – šířka speciální NK (m)

$B$  – katodické místo (uzel) konstrukce (-)

$A$  – anodické místo (uzel) konstrukce (-)

$R_B$  – elektrický (zemní) odpor zemniče připojeného v uzlu B ( $\Omega$ )

$R_A$  – elektrický odpor zemniče připojeného v uzlu A ( $\Omega$ )

$R_Z$  – zemní odpor NK ( $\Omega$ )

$R_e$  – efektivní odpor NK ( $\Omega$ )

$R_L$  – podélný odpor LK ( $\Omega\text{km}^{-1}$ )

$R_p$  – přechodový odpor LK – země ( $\Omega\text{km}$ )

$R_{L'}$  - podélný odpor NK ( $\Omega$ )

$J$  – hustota proudu v zemi ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ )

$\rho$  – rezistivita horninového prostředí ( $\Omega\text{m}$ )

$E$  – intenzita elektrického pole ( $\text{V}\cdot\text{km}^{-1}$ ;  $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$ )

$I_p(x)$  – proud v LK ve vzdálenosti  $x$  od uzlu A (výstupu proudu z konstrukce) (A)

$I_z(x)$  – proud v zemi ve vzdálenosti  $x$  od uzlu A (A)

$I_B$  – proud vstupující do zemniče  $R_B$  ze země (A)

$I_A$  – proud vystupující ze zemniče  $R_A$  do země (A)

$U$  – napětí mezi LK a zemí (V)

$U(x)$  – potenciál (napětí) mezi LK a zemí ve vzdálenosti  $x$  od uzlu A (V)

$U_B$  – napětí mezi LK a zemí v uzlu B (V)

$U_A$  – napětí mezi LK a zemí v uzlu A (V)

$U_Z(0)$  – napětí mezi LK a zemí v uzlu A pro  $R_A = 0$ ,  $R_B = 0$  ve vzdálenosti  $L$  od uzlu B (V)

$U_Z(L)$  – napětí mezi LK a zemí v uzlu B pro  $R_A = 0$ ,  $R_B = 0$  v uzlu B

$i_b(x)$  – příčný (bludný) proud mezi LK a zemí v místě  $x$  na jednotku délky ( $\text{A}\cdot\text{km}^{-1}$ )

$\alpha_p$  – konstanta útlumu (proud podél LK) ( $\text{km}^{-1}$ );  $\alpha_p = \left(\frac{R_L}{R_p}\right)^{1/2}$

$Z_p'$  – charakteristický odpor dlouhé LK ( $\Omega$ );  $Z_p' = (R_L \cdot R_p)^{1/2}$

$I_n$  – proud ve speciální NK (A)

## 2 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ PRO LINIOVOU KONSTRUKCI

Pro určování stupně ohrožení liniové konstrukce korozí bludnými proudy je možno odvodit výpočetní vztahy za výše uvedených zjednodušujících předpokladů s využitím výsledků korozního průzkumu (geoelektrické šetření, stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi) s přihlédnutím k inženýrskogeologickému průzkumu a situačnímu uspořádání liniové konstrukce vzhledem ke zdrojům bludných proudů.

Při určování potenciálu liniová konstrukce (dále LK) - země  $U(x)$  a proudu LK  $I_p(x)$  v místě X se vychází z těchto vztahů podle obr. 5-1: Na LK určité délky vzniká úbytek napětí, který lze vyjádřit podle obr. 5-1b z Kirchhoffova zákona:

$$I_p R_L dx - U + U_Z + U + dU - U_Z - I_Z \cdot 0 = 0$$

$$\text{a tedy: } \frac{dU}{dx} = - I_p R_L \quad (1)$$

Pro únik proudu z LK (v anodické oblasti) lze napsat podle obr.5.1c:

$$\frac{dI_p}{dx} = \frac{(U-U_Z)}{R_p} \quad (2)$$

Rovnici (1) derivujeme podle x a dosadíme do ní výraz (2) s tím, že  $\frac{R_L}{R_p} = \alpha^2$ :

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \alpha^2 U = + \alpha^2 U_Z \quad (3)$$

Obecné řešení této diferenciální rovnice má tvar:

$$U = K_1 e^{\alpha x} + K_2 e^{-\alpha x} - U_Z, \text{ respektive} \\ U = C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x - U_Z \quad (4)$$

Z definice podmínek a z obr. 5.1a je zřejmé, že

$$U_Z(x) = j \cdot \rho \cdot x = E \cdot x \quad (5)$$

Rovnici (4) derivujeme podle x:

$$\frac{dU}{dx} = + C_1 \alpha \sin \alpha x + C_2 \alpha \cos \alpha x - E \quad (6)$$

Po dosazení do (1) a se zřetelem na to, že platí:  $\frac{\alpha}{R_L} = \frac{1}{Z'}$ ,

$$\text{lze rovnici přepsat na tvar: } I_p = -\frac{C_1}{Z'} \sin \alpha x - \frac{C_2}{Z'} \cos \alpha x + \frac{E}{R_L} \quad (7)$$

Integrační konstanty spočítáme z okrajových podmínek s tím, že uvažujeme obecný případ podle obr. 5.1 a obr. 5.2, kde je na začátku LK připojen zemnič  $R_B$  a na konci LK zemnič  $R_A$ :

Pro  $x = 0$  (v uzlu A) bude v rovnici (7):  $I_p = -I_A$  (proud vystupuje z LK)

a tedy:

$$-I_A = -\frac{C_2}{Z'} + \frac{E}{R_L}, \text{ z toho}$$

$$C_2 = -I_A Z' + \frac{E}{\alpha} \quad (8)$$

Pro  $x = L$  (v uzlu B) bude v rovnici (7)  $I_p = I_B$ , takže:

$$I_B = -\frac{C_1}{Z'} \sin h \alpha L - \frac{C_2}{Z'} \cos h \alpha L + \frac{E}{R_L} \quad (9)$$

Po dosazení výrazu (8) do (9) po úpravě obdržíme:

$$I_B = -\frac{C_1}{Z'} \sin h \alpha L + I_A \cos h \alpha L - \frac{E}{R_L} (\cos h \alpha L - 1)$$

Po další úpravě:

$$C_1 = -\frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2} + I_A Z' \operatorname{cotg} h \alpha L - I_B Z' \frac{1}{\sin h \alpha L} \quad (10)$$

Po dosazení vztahů (8) a (10) do (7) dostaneme po úpravě obecný výraz pro proud v LK:

$$I_p(x) = \frac{E}{R_L} \left[ 1 - \frac{\cos h \alpha (x - \frac{L}{2})}{\cos h \alpha \frac{L}{2}} \right] - I_A \frac{\sin h \alpha (x-L)}{\sin h \alpha L} + I_B \frac{\sin h \alpha x}{\sin h \alpha L} \quad (11)$$

tj. proud přitékající do uzlu A (má znaménko mínus).

Obecný vztah pro potenciál LK - země lze stanovit z výrazu:

$$U - U_Z = \frac{dI_p}{dx} R_p$$

Jestliže tedy rovnici (11) derivujeme podle  $x$  dostaneme:

$$\frac{dI_p(x)}{dx} = -\frac{E\alpha}{R_L} \frac{\sin h \alpha (x - \frac{L}{2})}{\cos h \alpha \frac{L}{2}} - I_A \alpha \frac{\cos h \alpha (x-L)}{\sin h \alpha L} + I_B \alpha \frac{\cos h \alpha x}{\sin h \alpha L} \quad (12)$$

Po dosazení do (2) a po úpravě:

$$U(x) - U_Z(x) = -\frac{E}{\alpha} \frac{\sin h \alpha (x - \frac{L}{2})}{\cos h \alpha \frac{L}{2}} - I_A Z' \frac{\cos h \alpha (L-x)}{\sin h \alpha L} + I_B Z' \frac{\cos h \alpha x}{\sin h \alpha L} \quad (13)$$

Bludný (příčný) proud  $i_b(x) = \frac{dI_p(x)}{dx}$  je vyčíslen ve vztahu (12):

$$i_b(x) = -\frac{E}{Z'} \frac{\sin h \alpha (x - \frac{L}{2})}{\cos h \alpha \frac{L}{2}} - I_A \alpha \frac{\cos h \alpha (L-x)}{\sin h \alpha L} + I_B \alpha \frac{\cos h \alpha x}{\sin h \alpha L} \quad (14)$$

Z obecného vztahu pro potenciál LK - země (13) platí pro  $x = 0$  ( $U_Z = 0$ ):

$$U_A = \frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2} - I_A Z' \operatorname{cotg} h \alpha L + I_B Z' \frac{1}{\sin h \alpha L} \quad (15)$$

pro  $x = L$  [ $U_Z(L) = EL$ ]:

$$U_B = U - U_Z = -\frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2} - I_A Z' \frac{1}{\sin h \alpha L} + I_B Z' \operatorname{cotg} h \alpha L \quad (16)$$

v rovnicích (15,16) označíme:

$$K_1 = \frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2} \quad (17)$$

$$K_2 = Z' \frac{1}{\sinh \alpha L} \quad (18)$$

$$K_3 = Z' \cotg \alpha L \quad (19)$$

Pro uzel A ( $x = 0$ ) můžeme podle obr. 5.2 s využitím rovnice (15) napsat:

$$I_A R_A = K_1 - I_A K_3 + I_B K_2 \quad \text{z toho:}$$

$$I_A = \frac{I_B K_2 + K_1}{R_A + K_3} \quad (20)$$

Pro uzel B ( $x = L$ ) platí podle obr. 5.2 a podle vztahu (16) (tj. katodická oblast):

$$-I_B R_B = -K_1 - I_A K_2 + I_B K_3 \quad \text{z toho:}$$

$$I_B = \frac{I_A K_2 + K_1}{R_B + K_3} \quad (21)$$

Po dosazení (20) do (21) a po úpravě obdržíme:

$$I_B = \frac{K_1(R_A + K_2 + K_3)}{(R_B + K_3)(R_A + K_3) - K_2^2} \quad (22)$$

Po vyčíslení konstant  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , při znalosti odporů  $R_A$ ,  $R_B$  je možno spočítat proudy  $I_A$ ,  $I_B$ .

V případě, že  $I_A = 0$  rovnice (21) se zjednoduší na tvar:

$$I_B = \frac{K_1}{R_B + K_3} = \frac{\frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2}}{R_B + Z' \cotg \alpha L} \quad (23)$$

Analogicky podle rovnice  $i_b(x) = \frac{dI_K}{dx} = \frac{U}{R_p}$  [57] a (2) platí:

$$U(x) - U_Z(x) = R_p \cdot i_b \quad (24)$$

Pro posouzení rozsahu katodického a anodického úseku LK je třeba stanovit místo X, kde  $U - U_Z = i_b = 0$ . Při použití vztahu (13) za předpokladu, že  $I_A = I_B = 0$  bude:

$$-\frac{E}{\alpha} \frac{\sinh \alpha (x - \frac{L}{2})}{\cosh \alpha \frac{L}{2}} = 0$$

Tato rovnice je splněna pro  $x = \frac{L}{2}$ ; tedy bez připojených zemniců  $R_A$ ,  $R_B$  bude místo nulového potenciálu LK - země uprostřed LK, právě tak, jestliže  $R_A = R_B$ .

Odvozené vzorce jsou přehledně uvedeny v tab. 5.1.

### 3 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ PRO NELINIOVÉ KONSTRUKCE

Podle příslušných předpisů [61,62] jsou jako NK definována zařízení, jejichž povrch má úplný nebo částečný kontakt s horninovým prostředím a jejichž největší rozměry v půdoryse obvykle

nepřesahují 100 m; jsou to např. základy staveb, nádrže, uzemňovací soustavy, krátké tunely atd.

Při odvozování výpočetních vztahů můžeme vyjít z rovnice (20) pro LK s připojenými zemniči  $R_A$ ,  $R_B$  na obou koncích. Zajímá nás především proud, který proteče NK při dané intenzitě elektrického pole  $E = j \cdot \rho$ :

$$I_A = \frac{I_B K_2 + K_1}{R_A + K_3} = \frac{I_B Z' \frac{1}{\sinh \alpha L} + \frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2}}{R_A + Z' \operatorname{ctg} h \alpha L}$$

Pro případ podle *obr. 5.3a*, kdy  $L < 100$  m platí:

$$\operatorname{tg} h \alpha L = \alpha L; \quad \sinh \alpha L = \alpha L$$

$$R_L \rightarrow 0, \text{ tudíž } Z' = (R_L \cdot R_p)^{1/2} = 0$$

Můžeme tedy výše uvedený vztah přepsat na tvar:

$$I_A = \frac{I_B \cdot 0 + \frac{E}{\alpha} \alpha \frac{L}{2}}{R_A + 0} = \frac{E L}{2 R_A} \quad (25)$$

Podle *obr. 5.3a* je možno napsat:

$$I = I_A = I_B = \frac{U_B - U_A}{R_A + R_B}; \quad \text{pro } R_A = R_B: I_A = \frac{U_B - U_A}{2 R_A} \quad (26)$$

což odpovídá vztahu (25).

V případě, že je známý zemní odpor soustavy podle *obr. 5.3a* tj.  $R_Z$  pak

$$R_A + R_B = 4 R_Z = \frac{U_B - U_A}{I}, \text{ neboť proud teče v sérii } R_A \rightarrow R_B \text{ a odpor } R_Z \text{ je}$$

ekvivalentní paralelním odporům  $R_A$ ,  $R_B$ .

**Například:** pro  $R_A = R_B = 2 \Omega$  je  $R_Z = 1 \Omega$  a  $R_A + R_B = 4 \Omega$ .

Analogicky podle *obr. 5.3c* je možno napsat:

$$U = I R_A + I R_B = I (4 R_Z), \quad \text{z toho } I = \frac{U}{4 R_Z} \quad (27)$$

Rovnice (25,26) se týkají poloviny nelineové konstrukce a jsou identické. Jestliže změříme zemní odpor (resp. přechodový odpor koleje - NK) např.  $R_Z = 0,4 \Omega$ , pak v tomto případě je nutno do výpočtových vzorců dosadit:  $R_A = R_B = 2 R_Z = 2 \cdot 0,4 = 0,8 \Omega$ .

Pro případ, že je mezi oba zemniče  $R_A$ ,  $R_B$  vložený odpor  $R_L'$  podle *obr. 5.3b*, platí mezi zemním odporem a uvedenými odpory vztah pro efektivní odpor (viz též *obr. 5*):

$$R_e = R_B + R_L' + R_A \quad (28)$$

$$\text{Pro } R_A = R_B : R_e = R_L' + 2 R_A \quad (29)$$

**Například:** pro  $R_A = 0,8 \Omega$  a  $R_L' = 1,0 \Omega$ ;  $R_e = 0,8 + 1 = 1,8 \Omega$

takže původní hodnota  $R_Z$  se zvětšila o přírůstek odporu NK, tj. o  $1,0 \Omega$ .

$$\text{Tedy } I' = \frac{L \cdot E}{R_L + 2 R_Z} \quad (30)$$

(viz. *obr. 5 odst. 5.2* v základní části textu)

Jak již bylo uvedeno, leží-li krátký vodič, jako je např. železobetonová konstrukce, v zemi v proudovém poli, budou proudnice do tohoto vodiče jedním koncem vstupovat a druhým vystupovat.

Na koncích vodiče délky  $L'$  vznikne napětí (při  $R'_L = 0$ ):

$$U = L \cdot E = L' \cdot \rho \cdot J \quad (31)$$

které vyvolá ve vodiči určitý proud  $I_n$ .

Dosadíme-li rovnici (31) do rovnice (28), obdržíme vztah pro proud ve vodiči:

$$I_n = \frac{L' \cdot \rho \cdot J}{2 \cdot R_Z} = \frac{E \cdot L'}{2 R_Z} \quad (32)$$

Hodnotu  $R_Z$  pro železobetonovou základovou konstrukci obdélníkového půdorysu podle *obr. 5.3d* stanovíme s dostatečnou přesností takto:

Pro kruhovou desku na povrchu země o průměru  $D$  platí exaktní vzorec:

$$R_Z = \frac{\rho}{2D} \quad (\Omega) \quad (33)$$

z obsahu kruhu  $S$  lze určit:

$$D = \left( \frac{4 \cdot S}{\pi} \right)^{1/2} \quad (34)$$

jestliže položíme  $\underline{S} = L \cdot b$  a  $\underline{b} = n \cdot L$  a dosadíme do výrazu (34) po úpravě:

$$D = 1,13 \cdot n^{1/2} \cdot L' \quad (\text{m}) \quad (35)$$

Po dosazení do rovnice (33):

$$R_Z = \frac{0,44}{n^{1/2}} = \frac{\rho}{L'} \quad (\Omega) \quad (36)$$

Např. pro  $L' = 255 \text{ m}$  a  $b = 73 \text{ m}$  je  $n = 73/255 = 0,286$

$$R_Z = \frac{0,44}{0,286^{1/2}} = \frac{\rho}{L'} = 0,82 \frac{\rho}{L'}$$

Jestliže výraz (36) dosadíme do rovnice (32), obdržíme po úpravě vztah pro proud ve vodiči:

$$I_n = \frac{n^{1/2}}{0,88} \cdot L'^2 \cdot J \quad (\text{A}) \quad (37)$$

#### Poznámka:

Analogicky se postupuje pro jakýkoliv krátký vodič v zemi v proudovém poli (žbet. kanál, tunel atd.).

## 4 POUŽITELNOST VZORCŮ PRO LINIOVÉ A NELINIOVÉ KONSTRUKCE

Rovnice č. 23 udává velikost bludného proudu, který vstupuje do katodické části liniové konstrukce o délce  $L$ , když  $-I_K = -I_B$  (viz *obr. 5a* a *obr. 5.2a*). Za předpokladu, že proud, který vstupuje ze země do katodického úseku, se rovná proudu, který vstupuje do země v anodickém úseku, tedy  $-I_B = -I_A$ , dále že  $R_B = R_A = 0$ , můžeme napsat pro bludný proud v anodickém úseku pro liniovou konstrukci (LK)

$$I_A = \frac{\frac{E}{\alpha} \cdot \operatorname{tgh} \alpha \frac{L}{2}}{Z' \operatorname{cotgh} \alpha L} \quad (\text{A}) \quad (38)$$

$$\text{kde konstanta útlumu } \alpha = \left(\frac{R_L}{R_p}\right)^{1/2} \quad (\text{km}^{-1}; \Omega\text{km}^{-1}; \Omega\text{km}) \quad (39)$$

$$\text{charakteristický odpor: } Z' = (R_L \cdot R_p)^{1/2} \quad (\Omega; \Omega\text{km}^{-1}; \Omega\text{km}) \quad (40)$$

V závislosti na podélném odporu LK na jednotce délky ( $R_L$ ) a poměru  $\frac{R_L}{R_p}$ , kde  $R_p$  je přechodový odpor LK na jednotku délky, je možno s určitou odchylkou  $\Delta$  (%) použít jednodušší vzorec pro nelineovou konstrukci (NK), tj. č. 25 pro  $R_A = R_Z$ :

$$I_A = \frac{E \cdot L}{2 \cdot R_Z} \quad (\text{A}; \text{V} \cdot \text{km}^{-1}; \text{km}; \Omega) \quad (41)$$

Za limitní hodnotu lze považovat odchylku  $\Delta \leq 10$  %. Stanovení odpovídající délky  $L$ , kterou lze považovat za hraniční, pokud jde o hodnotu  $R_L$ , bude demonstrováno na příkladech z praxe.

## 5 ROZDĚLENÍ NAPĚTÍ A PROUDU VE SMĚRU KOLMÉM NA LINIOVOU KONSTRUKCI (LK)

### 5.1 STANOVENÍ ZMĚNY ELEKTRICKÉHO POLE V OKOLÍ LINIOVÉ I NELINIOVÉ KONSTRUKCE

Výpočtové vztahy v *odst. 2* (viz též *tab. 5.1.(1)* a *tab. 5.1.(2)*) byly odvozeny pro elektrické parametry podél osy liniové konstrukce. Liniová konstrukce, do které v katodickém úseku vstupuje bludný proud a v anodickém úseku tento proud vystupuje z LK do země (viz. *obr. 5.2*) často kříží nebo je v souběhu s cizími liniovými i některými nelineovými konstrukcemi, které jsou tak korozně ohroženy interferencí. Z toho důvodu se v okolí LK (obvykle tunelové těleso) provádí korozní průzkum a posuzuje se nepříznivý (interferenční) vliv na existující nebo projektované úložné konstrukce (kovové plynovody, vodovody, uzemňovací soustavy bytových a nebytových objektů apod.). Korozní průzkum (na povrchu země) sestává jednak ze stanovení rezistivity horninového prostředí metodou podle Wennera [63], do větších hloubek podle Schlumbergera [65], jednak ve stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi [64] především intenzity elektrického pole na dva nebo více stanovištích v různých vzdálenostech od zdroje bludných proudů. Tato problematika byla projednána v uvedené literatuře [11, 12, 19, 33, 35, 39].

Pro odvození výpočtových vztahů rozdělení napětí a proudu ve směru kolmém na osu liniové konstrukce (zdroje bludných proudů) je použito uspořádání podle *obr. 5.4a*, t.j. rozdělení napětí kolem válcové elektrody o průměru  $D$  a délce  $L$ . Jelikož stanovení intenzity elektrického pole je prakticky možné pouze na povrchu země, je teoretické odvození elektrických parametrů provedeno s dostatečnou přesností pro případ  $h = 0$ , tedy pro povrch země. Podle [2] se intenzita elektrického pole snižuje od liniové konstrukce v hloubce  $h$  směrem k povrchu země podle vztahu

$$E_y = E_h \frac{\rho_z \cdot D}{\rho_h \cdot (2h - D)} \quad (\text{mV} \cdot \text{m}^{-1}; \Omega\text{m}; \text{m}) \quad (42)$$

$E_y$  – intenzita elektrického pole na povrchu země



$E_h$  – intenzita elektrického pole v hloubce  $h$   
 $\rho_h$  – rezistivita horninového prostředí v hloubce  $h$   
 $\rho_z$  – rezistivita horninového prostředí na povrchu země  
 $D$  – průměr LK (tunel metra)  
 $h$  – osa LK pod terénem

### Poznámka:

Odvození vztahu (42) viz. část B, příklad č. 2.

Jestliže je známá hodnota  $E_y$  (viz obr. 5.4.b) na povrchu země, pak hodnotu  $E_h$  v hloubce  $h$  vypočítáme podle vztahu č. 42.

## 5.2 ODVOZENÍ VZTAHŮ PRO NAPĚTÍ A PROUD

Pro výpočet rozdělení napětí se může LK považovat za dlouhou válcovou elektrodu uloženou na povrchu země. Určité radiální vzdálenosti  $y$  od elektrody odpovídá pak stejné napětí  $U_y$ , takže stejné napětí je rozprostřeno na válcových plochách sousých s elektrodou. Povrch půdy protíná každou z těchto válcových ploch ve dvou čarách stejného napětí, plochy stejného napětí jsou souosé válce. Je-li  $y$  vzdálenost od plochy stejného napětí (obr. 5.4.a), je její poloměr  $\frac{1}{2}D$ , a její povrch  $S = \pi L \cdot \frac{1}{2}D \cdot y$ .

Odpor vrstvy půdy mezi sousedními válci:

$$dR = \rho \frac{dy}{\pi \left(\frac{1}{2}D + y\right) \cdot L} \quad (43)$$

a potenciál v bodě Y [2]:

$$\varphi_y = \frac{I}{L} \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{\frac{1}{2}D + y}{\frac{1}{2}D} \quad (44)$$

Vztahem (44) lze určit rozdělení napětí, je-li  $L$  tak velké, že se již neprojevuje vliv konců elektrody (na konci čáry napětí přecházejí z rotačního válce na rotační elipsoid).

Výraz (44) lze přepsat takto:

$$\varphi_y = U_{kz} \frac{\rho}{R_p \cdot \pi} \ln \cdot \frac{\frac{1}{2}D + y}{\frac{1}{2}D} \quad (V) \quad (45)$$

kde  $R_p$  je přechodový odpor LK – země ( $\Omega m$ ).

Úbytek napětí při průchodu proudu  $I_{kz}$  mezi válcovou elektrodou a místem ve vzdálenosti  $y$ , neboli napětí mezi elektrodou a bodem na povrchu země ve vzdálenosti  $y$  od elektrody:

$$U_y = U_{kz} \left( 1 - \frac{\rho}{R_p \cdot \pi} \ln \frac{\frac{1}{2}D + y}{\frac{1}{2}D} \right) \quad (V) \quad (46)$$

kde  $I_{kz}$  je proud mezi LK a zemí (A).

Průběh napětí  $U_y$  je na *obr. 5.4.b*. Místo ve vzdálenosti  $y = \infty$  nemá napětí proti zemi. Mezi zemí a LK je napětí  $U_{zmax} = U_{kz}(z)$ . Napětí v kterémkoliv místě lze též vyjádřit jako část zemní elektrody  $U_{zmax}$ :

$$\frac{U_y}{U_{kz}} = 1 - \frac{\rho}{R_p \cdot \pi} \ln \frac{\frac{1}{2}D+y}{\frac{1}{2}D} \quad (47)$$

Průběh napětí tedy závisí na rezistivitě půdy, přechodovém odporu LK-země a na vzdálenosti od LK. Intenzitu pole na povrchu země určuje vztah [2,8]:

$$E_y = - \frac{d\varphi_y}{d_y} .$$

Po dosazení z (45) a po derivaci:

$$E_y = - U_{kz} \frac{\rho}{R_p \cdot \pi} \frac{1}{\frac{1}{2}D+y} \quad (\text{mV.m}^{-1}; \text{V.km}^{-1}) \quad (48)$$

Hustota proudu v zemi je určena vztahem:

$$J_y = \frac{E_y}{\rho} = - \frac{U_{kz}}{R_p} \frac{1}{\pi(\frac{1}{2}D+y)} \quad (\text{A.m}^{-2}; \mu\text{A.m}^{-2}) \quad (49)$$

Pro určitý bod X na LK platí vztah:

$$J_y = \frac{i_b(X)}{\pi(\frac{1}{2}D+y)} \quad (\text{A.m}^{-2}) \quad (50)$$

kde  $i_b(X)$  je příčný (bludný) proud mezi LK a zemí v místě X na jednotku délky ( $\text{A.km}^{-1}$ ;  $\text{mA.m}^{-1}$ ) podle *tab. 5.1.(2)* vztahů č. 13 až 17. Například pro  $i_b = 10 \text{ A.km}^{-1} = 10 \text{ mA.m}^{-1}$ , pro  $\frac{1}{2}D = 3 \text{ m}$  a  $y = 100 \text{ m}$ :

$$J_y = \frac{10}{\pi \cdot 103} = 0,0309 \text{ mA.m}^{-2} = 31 \mu\text{A.m}^{-2}$$

Průběh  $J = f(y)$  na *obr.5.4.c* znázorňuje rovnoosá hyperbola. Závisí na příčném (bludném) proudu mezi LK a zemí a na vzdálenosti od LK, nikoliv na rezistivitě horninového prostředí. Podle *tab.5.1(2)* pro vztah č. 15, kdy  $I_A = I_B = 0$  a  $x = 0$  (tj. pro bod A podle *obr. 5.2b*):

$$i_b(A) = \frac{E}{Z'} \operatorname{tgh}\alpha \frac{L}{2} = \frac{U_A}{R_p} \quad (51)$$

příčměž potenciál v místě X při  $I_A = I_B = 0$  (viz vztah č. 2 v *tab.5.1.(1)*, viz též *obr. 5.2b*):

$$U_x = \frac{E}{\alpha} \frac{\sinh\alpha(x-\frac{L}{2})}{\cosh\alpha\frac{L}{2}} \quad (\text{V}) \quad (52)$$

$$\text{příčměž } \alpha = \frac{Z'}{R_p} \quad (\text{km}^{-1}; \text{m}^{-1}) \quad (53)$$

kde E je intenzita elektrického pole u kraje LK v místě ve vzdálenosti X od bodu A, L je délka LK.

### 5.3 INTENZITA ELEKTRICKÉHO POLE VE SMĚRU KOLMÉM NA OSU LK

Na *obr.5.4.b* je znázorněn průběh intenzity elektrického pole v závislosti na kolmé vzdálenosti  $y$  na LK. Tato křivka má tvar rovnoosé hyperboly [2,8], u které jsou asymptoty navzájem kolmé. Obecný tvar rovnice je:

$$zy = \frac{a^2}{2} \quad (54)$$

$$\text{resp. } z = \frac{a^2}{2y} \quad (\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}; \text{mV}^{1/2}; \text{m}) \quad (55)$$

Jestliže za  $z$  dosadíme vztah č. 48 ( $E_y = z$ ), pak můžeme spočítat osu hyperboly  $a$  (viz. obr. 5.4.b). Pro  $y \gg D$  lze položit  $D \rightarrow 0$ , takže:

$$a = \left( \frac{U_{kz} \cdot \rho \cdot 0,637}{R_p} \right)^{1/2} \quad (\text{V}^{1/2}; \text{mV}^{1/2}) \quad (56)$$

#### 5.4 PŘÍKLAD VÝPOČTU HODNOTY OSY HYPERBOLY

Hodnota  $a$  se prakticky určí podle hodnot získaných korozním průzkumem [64]. Například pro bod č. 1 v kolmé vzdálenosti od LK (tunel metra) byla ve vzdálenosti  $y_1 = 20$  m zjištěna hodnota  $\phi E_1 = 6,7 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Pro bod č. 2 ve vzdálenosti  $y_2 = 60$  m bylo  $\phi E_2 = 2,2 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Tyto hodnoty byly zjištěny registračním synchronním měřením po dobu nejméně 60 minut. Jelikož  $\phi E_1 > \phi E_2$ , jedná se o anodický úsek (proud vystupuje z LK do země). Ze vztahu č. 54 vychází:

$$\text{Pro bod č. 1 } (\phi E_1 = z_1): \quad a^2 = 2 \cdot \phi E_1 \cdot y_1 = 2 \cdot 6,7 \cdot 20 = 268$$

$$a_1 = 16,4$$

$$\text{Pro bod č. 2 } (\phi E_2 = z_2): \quad a^2 = 2 \cdot 2,2 \cdot 60 = 264$$

$$a_2 = 16,2$$

Průměrná hodnota  $\phi a = 16,3$ ;  $\phi a^2 = 266$

Rovnoosá hyperbola pro daný příklad bude mít tvar:  $z = \frac{266}{2y} \text{ (mV}\cdot\text{m}^{-1}; \text{m})$

Pro případ podle obr.5.4a pro  $y_3 = \frac{D}{2} = 2,75$  m bude:

$$E_y (\text{max}) = z_3 = \frac{266}{2 \cdot 2,75} = 48,4 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1} \quad (57)$$

#### Poznámka:

$E_y$  je v terénu zjištěná hodnota,  $z_y$  je vypočtená hodnota. V ideálním případě

$$E_y = z_y \quad \text{mV}\cdot\text{m}^{-1} \quad (58)$$

#### 5.5 POROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ PRO NAPĚTÍ PODÉL OSY A KOLMO K LINIOVÉ KONSTRUKCI

Spojení výsledků korozního průzkumu (zjištění hodnoty intenzity elektrického pole v okolí LK) a teoreticky odvozených výpočtových vzorců umožňuje získat komplexní pohled na šíření bludných proudů liniovou konstrukcí a stanovit stupeň korozního ohrožení cizích úložných konstrukcí v blízkosti LK.

Předpokládejme, že zájmové území se nachází v okolí bodu X podle obr.5.2a. Kolmo k tomuto bodu se ve vzdálenosti  $y$  nachází bod Y (viz obr.5.4a). Velikost bludných proudů kolísá v průběhu času v závislosti na intenzitě provozu elektrických vlaků, na vzájemné vzdálenosti napájecích stanic, na poloze elektrických vlaků vůči napájecím stanicím a dalších faktorech. Hlavním zdrojem bludných proudů je stejnosměrně elektrizovaná železnice s provozním napětím 3kV. V některých městech je to i tramvajová doprava. Z toho důvodu se mohou katodické a anodické úseky podle obr.5.2b měnit jak pokud jde o velikost napětí a proudu, tak

co se týče polarity. Výsledkem korozního průřezu jsou proto průměrné hodnoty  $\phi$   $E_y$  intenzity elektrického pole pro dané stanoviště a pro definovaný časový úsek.

Jelikož je obtížné určit vzdálenost  $x$  od konce LK (bod A), exaktní vztah č. 52 pro napětí  $U_x$  je prakticky nepoužitelný. Pro praktické potřeby postačí vztáhnout výpočet k bodu A, kde je hodnota napětí  $U_A$  největší (viz *tab.5.1(1)* vztah č. 3 pro  $I_A = -I_B = 0$ ) a pro celý anodický úsek uvažovat průměrnou hodnotu  $\frac{U_A}{2}$ , respektive vypočítat max. proud  $I_A$  podle vztahu č. 38 pro daný úsek LK o délce  $L$  a průměrný bludný proud mezi LK a zemí uvažovat

$$\phi \ i_b = \frac{I_A}{\frac{1}{2}L} \quad (\text{A.km}^{-1}; \text{mA.m}^{-1}) \quad (59)$$

Výsledky korozního průřezu v dané lokalitě lze využít pro výpočet elektrických parametrů LK, především průměrné intenzity elektrického pole v ose LK o délce  $L$  podle *obr.5.1a* v místě  $X$ , kde bylo uskutečněno měření v terénu ve směru  $y$  kolmém na LK podle *obr.5.4b* a podle *odst. 5.3*.

V bodě  $X$  musí platit rovnost potenciálu, tedy  $U_x = U_y$ . Jelikož nelze použít exaktní rovnici č. 52, volíme tento postup: z *tab. 5.1(1)* a *5.1(2)* vztah č. 3 pro potenciál v bodě A (pro  $I_A = -I_B = 0$ ) vydělíme vztahem č. 15, tj. bludný proud pro  $x = 0$  (bod A), za konstantu útlumu  $\alpha$  dosadíme vztah č. 53 a získáme rovnici:

$$i_b(A) = \frac{U_A}{R_p} \quad (\text{Akm}^{-1}; \text{mA.m}^{-1}) \quad (60)$$

Analogicky platí pro bod  $X$ :

$$i_b(X) = \frac{U_X}{R_p} \quad (\text{Akm}^{-1}; \text{mA.m}^{-1}) \quad (61)$$

V rovnici č. 46:  $y = 0$  je  $U_y = U_{KZ}$  (62)

Z rovnic č. 49 a č. 50 pro  $y = 0$  vyplývá vztah:  $E_y = \frac{i_b}{\pi \cdot \frac{1}{2}D} \cdot \rho$

Po dosazení za  $i_b$  ze vztahu č. 59, obdržíme:

$$E_y = \frac{I_A \cdot \rho}{\frac{1}{2}L \cdot \pi \cdot \frac{1}{2}D} = \frac{I_A \cdot \rho}{L \cdot D \cdot 0,7854}$$

z toho  $I_A = \frac{E_y \cdot L \cdot D \cdot 0,7854}{\rho} \quad (\text{mA}; \text{mVm}^{-1}; \text{m}; \Omega\text{m}) \quad (63)$

V rovnici č. 38 dosadíme vztah č. 53 za  $\alpha = \frac{Z'}{R_p}$  a obdržíme vztah:

$$I_A = \frac{E \cdot R_p \cdot \text{tg h } \alpha \frac{L}{2}}{Z'^2 \cotg h \alpha L} \quad (\text{mA}; \text{mVm}^{-1}; \Omega; \text{m}) \quad (64)$$

Rovnice č. 63 a č. 64 se musí sobě rovnat a získáme vztah:

$$E_y \cdot A = E \cdot B, \Rightarrow E = \frac{E_y \cdot A}{B} \quad (\text{mVm}^{-1}; \text{Vkm}^{-1}) \quad (65)$$

kde  $A = \frac{L \cdot D \cdot 0,7854}{\rho} \quad (\text{m}; \Omega\text{m}) \quad (66)$

$$B = \frac{R_p \cdot \operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2}}{Z'^2 \operatorname{cotg} h \alpha L} \quad (\Omega; \text{m}) \quad (67)$$

## 5.6 PŘÍKLAD VÝPOČTU PRŮMĚRNÉ HODNOTY $E$ u LK DÉLKY $L$

Při výpočtu využijeme vztah č. 57 tedy  $E_y = 48,4 \text{ mV m}^{-1}$ . Dále využijeme zjištěné parametry u metra I.C Kačerov (A) – Florenc (B) v délce  $L = 6,6 \text{ km}$ , přičemž bod  $X = 1,8 \text{ km}$  od místa bodu A, tj. zájmové území Pankrác, kde byl proveden korozní průzkum podle *odst. 5.4*, kde byla zjištěna rezistivita půdy  $\phi \rho = 80 \Omega \text{m}$ , průměr LK:  $D = 5,5 \text{ m}$ . Zjištěné elektrické hodnoty u jednoho tunelu metra [11]:  $R_L = 0,02 \Omega \text{km}^{-1}$ ,  $R_p = 0,12 \Omega \text{km} = 120 \Omega \text{m}$ , z toho podle vztahů č. 39 a č. 40:

$$\alpha = 0,40825 \text{ km}^{-1}; Z' = 0,049 \Omega$$

$$\operatorname{tg} h \alpha \frac{L}{2} = \operatorname{tg} h 0,40825 \cdot 3,3 = 0,873397$$

$$\operatorname{cotg} h \alpha L = \operatorname{cotg} h 0,40825 \cdot 6,6 = 1,009176$$

$$A = \frac{6,6 \cdot 5,5 \cdot 0,7854}{80} = 0,35637$$

$$B = \frac{0,12 \cdot 0,873397}{0,049^2 \cdot 1,009176} = 43,25475$$

$$E = \frac{48,4 \cdot 0,35637}{43,25475} = 0,3987 \doteq 0,4 \text{ V}$$

Bludný proud na rozhraní tunel – země:

$$i_b = \frac{E_y \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} D}{\rho} = \frac{48,4 \cdot \pi \cdot 2,75}{80} = 5,23 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-1}$$

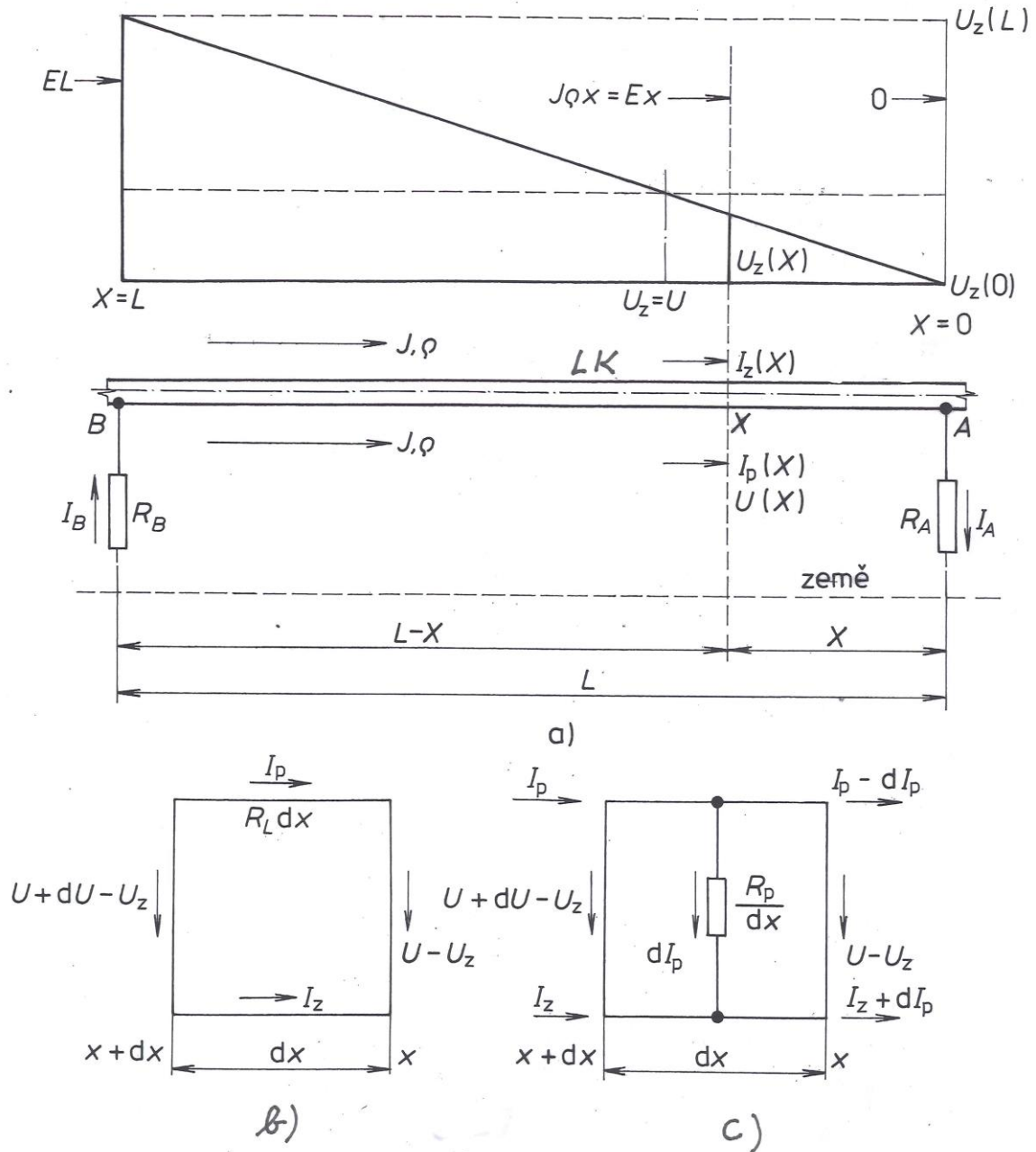
Kontrola s použitím vztahu č. 64:

$$i_b = \frac{I_A}{\frac{1}{2}L} = \frac{0,4 \cdot 0,12 \cdot 0,873397}{0,5 \cdot 6,6 \cdot 0,049^2 \cdot 1,009176} = \frac{0,041923}{0,007996} = 5,24 \text{ Akm}^{-1} = 5,24 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-1}$$

## 5.7 ZÁVĚR

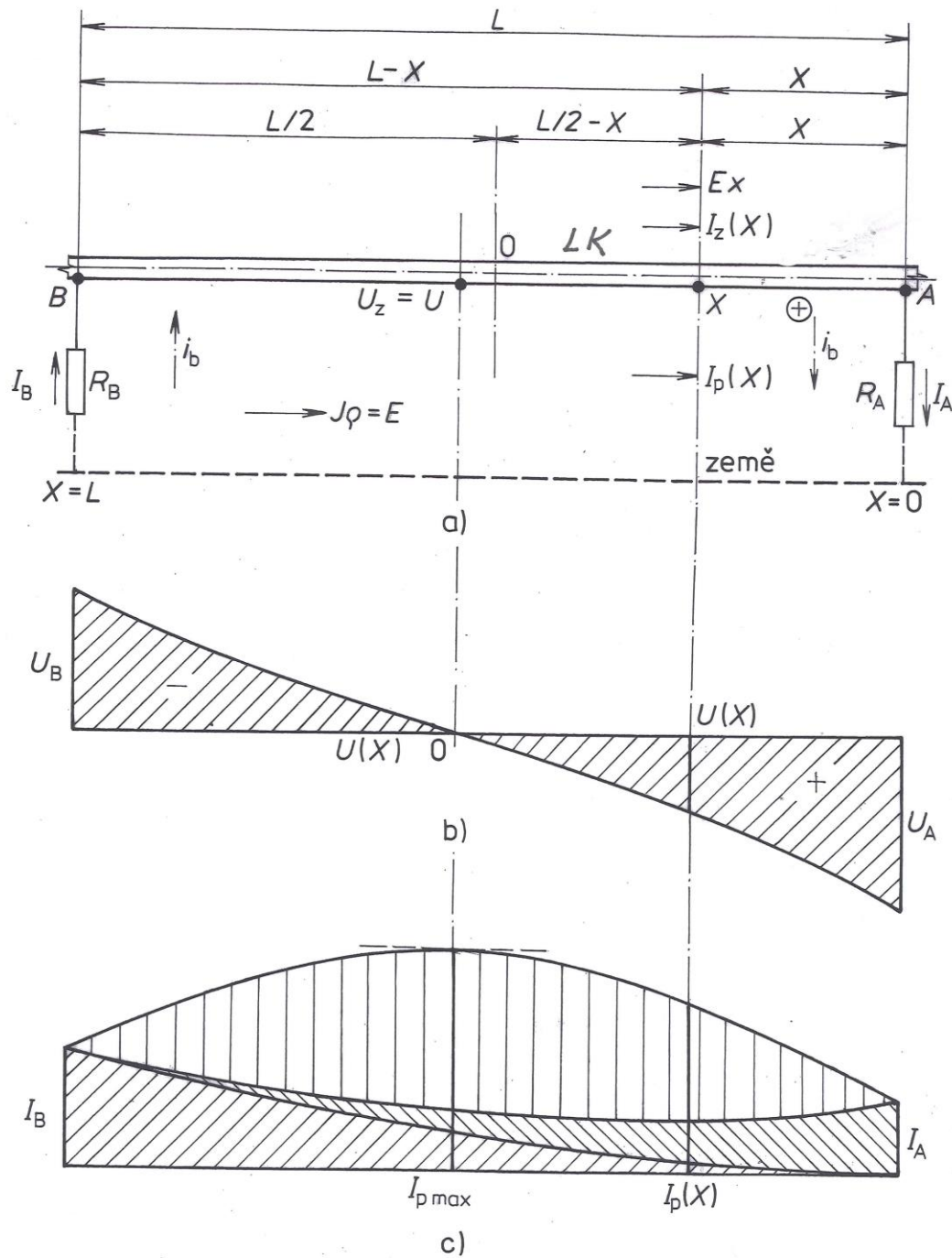
V místě  $X$  je příčný (bludný) proud mezi tunelem metra a zemí  $i_b(X) = 5,24 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-1}$ . Pro dva tunely v souběhu je to  $2 \cdot i_b(X) = 2 \cdot 5,24 = 10,5 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Obrázky a tabulky k příloze č. 5



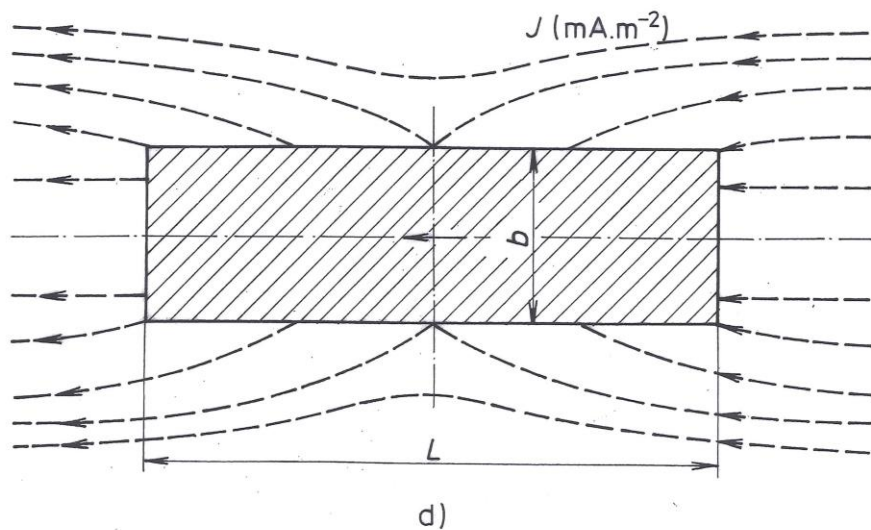
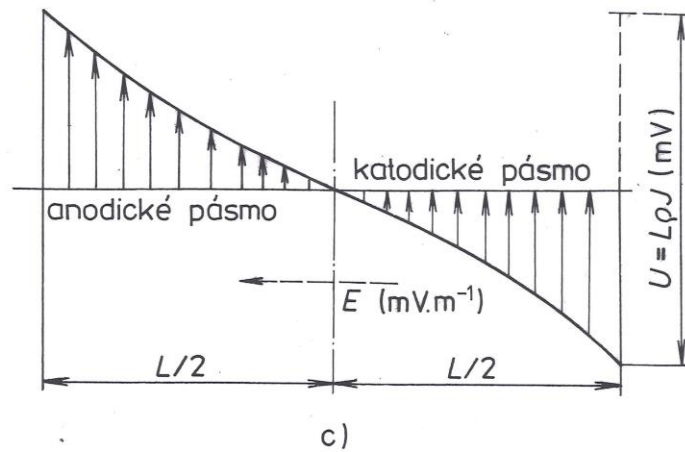
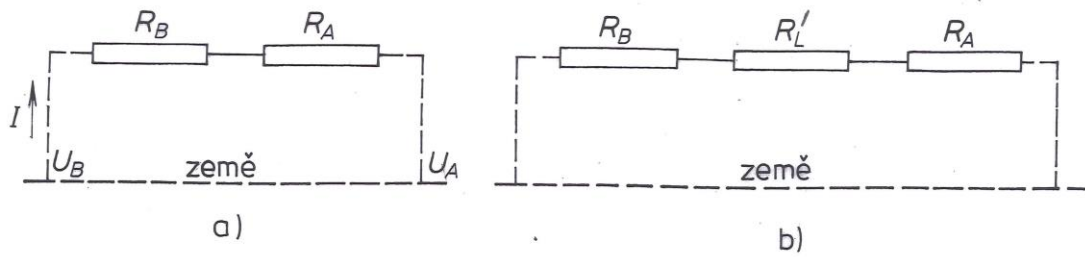
- a) Schéma s vyznačením průběhu napětí proti zemi podél LK
- b) Smyčka elektrického obvodu ve vzdálenosti  $x$  od uzlu A
- c) Obecný elektrický uzel

Obr. 5-1 Dlouhá liniová konstrukce (LK) uložená v zemi v homogenním proudovém poli



- a) Schéma s připojenými zemniči v uzlech A a B
- b) Průběh potenciálu LK – země
- c) Průběh proudu v LK

Obr. 5-2 Rozdělení proudu a napětí proti zemi podél liniové konstrukce (LK) v homogenním poli bludných proudů

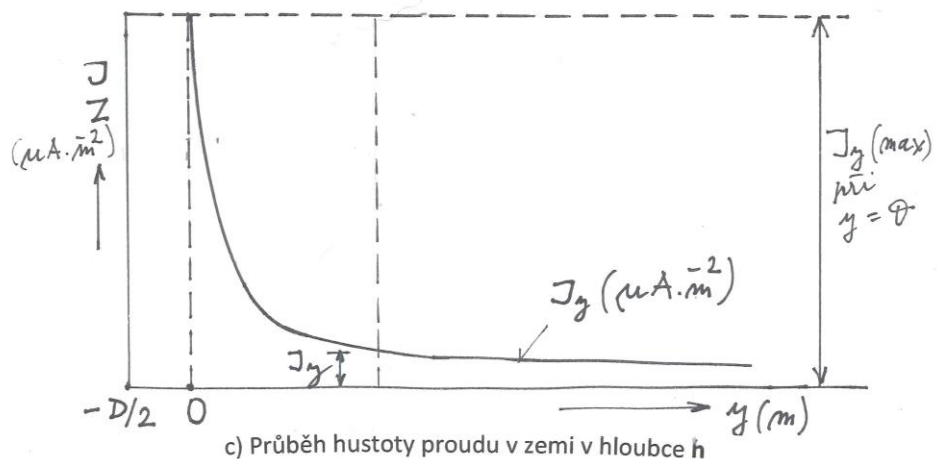
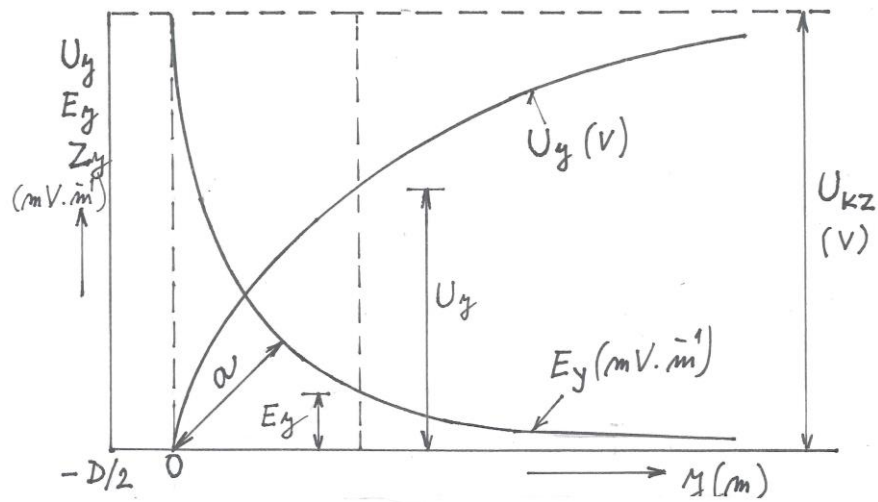
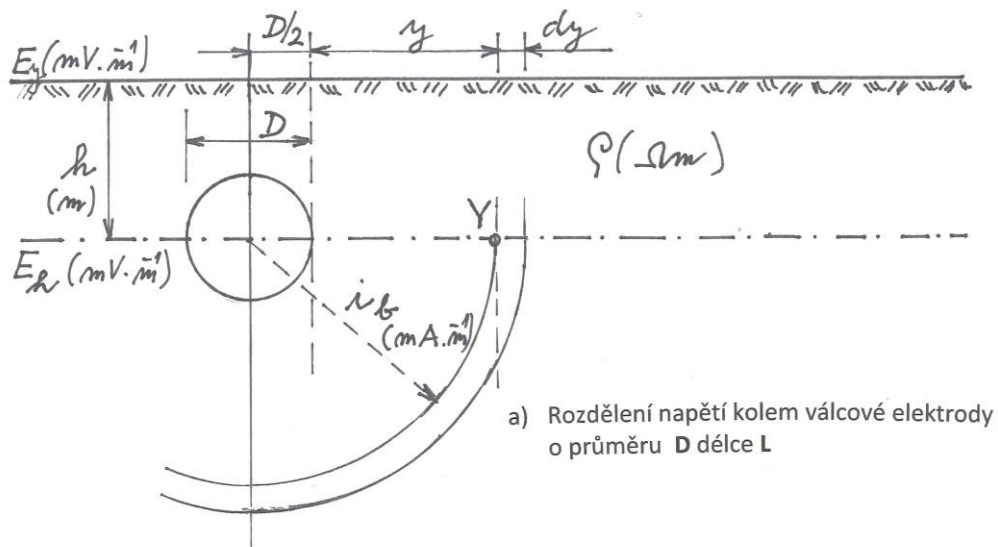


Elektrické schéma navazující na obr. 5-1

- a) Elektrické schéma mostní konstrukce s dilatačním závěrem v mostovce o elektrickém odporu  $R_L'$  ( $\Omega$ )
- b) Průběh napětí u nelineové konstrukce NK
- c) Nelineová konstrukce v elektrickém poli

Obr. 5-3 Nelineová konstrukce (NK) v rovnoměrném poli bludných proudů





Obr. 5-4 Průběh napětí, intenzity elektrického pole a hustoty proudu v zemi ve směru kolmém na liniovou konstrukci (LK) o průměru  $D$

Tab. 5-1 (1) Vzorce pro výpočet soustavy: dlouhá liniová konstrukce (LK) – země v homogenním poli bludných proudů

Číslo	Veličina	Vzorec
1	POTENCIÁL potrubí–země obecný vzorec podle obr. 8.16	$U(x) - U_z(x) = -\frac{E}{\alpha} \frac{\sin h\alpha \left(x - \frac{L}{2}\right)}{\cos h\alpha \frac{L}{2}} - I_A Z' \frac{\cos h\alpha (L - x)}{\sin h\alpha L} + I_B Z' \frac{\cos h\alpha x}{\sin h\alpha L}$
2	POTENCIÁL potrubí–země pro $I_A = 0, I_B = 0$	$U(x) - U_z(x) = -\frac{E}{\alpha} \frac{\sin h\alpha \left(x - \frac{L}{2}\right)}{\cos h\alpha \frac{L}{2}}$
3	POTENCIÁL potrubí–země obecný vzorec pro $x = 0$	$U_A = \frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h\alpha \frac{L}{2} - I_A Z' \operatorname{cotg} h\alpha L + I_B Z' \frac{1}{\sin h\alpha L}$
4	POTENCIÁL potrubí–země obecný vzorec pro $x = L$	$U_B = -\frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h\alpha \frac{L}{2} - I_A Z' \frac{1}{\sin h\alpha L} + I_B Z' \operatorname{cotg} h\alpha L$
5	POTENCIÁL potrubí–země obecný vzorec pro $x = L/2$	$U\left(\frac{L}{2}\right) - U_z\left(\frac{L}{2}\right) = Z' \frac{\cos h\alpha \frac{L}{2}}{\sin h\alpha L} (-I_A + I_B)$
6	PROUD v bodě A ( $x = 0$ ) pro $I_B = 0$	$I_A = \frac{\frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h\alpha \frac{L}{2}}{R_A + Z' \operatorname{cotg} h\alpha L}$
7	PROUD v bodě B ( $x = L$ ) pro $I_A = 0$	$I_B = \frac{\frac{E}{\alpha} \operatorname{tg} h\alpha \frac{L}{2}}{R_B + Z' \operatorname{cotg} h\alpha L}$
8	PROUD v potrubí obecný vzorec podle obr. 8.16	$I_p(x) = \frac{E}{R_L} \left[ 1 - \frac{\cos h\alpha \left(x - \frac{L}{2}\right)}{\cos h\alpha \frac{L}{2}} \right] + I_A \frac{\sin h\alpha (L - x)}{\sin h\alpha L} + I_B \frac{\sin h\alpha x}{\sin h\alpha L}$

Tab. 5-1 (2) Vzorce pro výpočet soustavy: dlouhá liniová konstrukce (LK) – země v homogenním poli bludných proudů

Číslo	Veličina	Vzorec
9	PROUD v potrubí pro $I_A = 0, I_B = 0$	$I_p(x) = \frac{E}{R_L} \left[ 1 - \frac{\cos h\alpha \left(x - \frac{L}{2}\right)}{\cos h\alpha \frac{L}{2}} \right]$
10	PROUD v potrubí obecný vzorec	$I_p = I_A$
11	PROUD v potrubí obecný vzorec pro $x = L$	$I_p = I_B$
12	PROUD v potrubí obecný vzorec pro $x = L/2$	$I_p(x) = \frac{E}{R_L} \left( 1 - \frac{1}{\cos h\alpha \frac{L}{2}} \right) + \frac{\sin h\alpha \frac{L}{2}}{\sin h\alpha L} (I_A + I_B)$
13	BLUDNÝ PROUD mezi potrubím a zemí obecný vztah podle obr. 8.15 a 8.16	$i_b(x) = -\frac{E}{Z'} \frac{\sin h\alpha \left(x - \frac{L}{2}\right)}{\cos h\alpha L} - I_A \alpha \frac{\cos h\alpha (L-x)}{\sin h\alpha L} + I_B \alpha \frac{\cos h\alpha x}{\sin h\alpha L}$
14	BLUDNÝ PROUD mezi potrubím a zemí pro $I_A = 0, I_B = 0$	$i_b(x) = -\frac{E}{Z'} \frac{\sin h\alpha \left(x - \frac{L}{2}\right)}{\cos h\alpha \frac{L}{2}}$
15	BLUDNÝ PROUD obecný vztah pro $x = 0$	$i_b(x) = \frac{E}{Z'} \operatorname{tg} h\alpha \frac{L}{2} - I_A \alpha \operatorname{cotg} h\alpha L + I_B \alpha \frac{1}{\sin h\alpha L}$
16	BLUDNÝ PROUD obecný vztah pro $x = L$	$i_b(x) = -\frac{E}{Z'} \operatorname{tg} h\alpha \frac{L}{2} - I_A \alpha \frac{1}{\sin h\alpha L} + I_B \alpha \operatorname{cotg} h\alpha L$
17	BLUDNÝ PROUD obecný vztah pro $x = L/2$	$i_b(x) = \frac{\cos h\alpha \frac{L}{2}}{\sin h\alpha L} (-I_A + I_B)$

Tab. 5-2 Elektrická rezistivita a hustota některých materiálů

Materiál	Měrný elektrický odpor při 20 °C		Hustota s (g.cm <sup>-3</sup> )
	( $\Omega$ .m)	( $\Omega$ .mm <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup> )	
Ocel nízkouhlíková (11353)	0,18–0,21.10 <sup>-6</sup>	0,18–0,21	7,850
Ocel X52; ocel X80	0,22.10 <sup>-6</sup> ; 0,26.10 <sup>-6</sup>	0,22; 0,26	7,850
Tvárná litina	0,70.10 <sup>-6</sup>	0,70	7,300
Šedá litina	0,4–0,8.10 <sup>-6</sup>	0,4–0,8	7,200
Měď (ČSN 42 3001–77)	1,80.10 <sup>-8</sup>	0,018	8,900
Hliník (ČSN 42 4004–78)	2,90.10 <sup>-8</sup>	0,029	2,700
Titan (TP 18, 70–16–63)	0,50.10 <sup>-6</sup>	0,50	4,500
Niob	0,17.10 <sup>-6</sup>	0,17	8,400
Mosaz: 62 Cu, 38 Zn	0,07–0,09.10 <sup>-6</sup>	0,07–0,09	8,500
Konstantan: 55 Cu, 44 Ni, 1 Mn	0,49.10 <sup>-6</sup>	0,49	8,800
Manganin: 86 Cu, 12 Mn, 2 Ni	0,43.10 <sup>-6</sup>	0,43	8,500
Grafit: 99,9 C	2–3.10 <sup>-6</sup>	2–3	1,700
Ferrosilicum	0,72.10 <sup>-6</sup>	0,72	7,100
Koksový hrášek Ø 2 až 15 mm metalurgický (suchý)	0,20–0,50	0,2–0,5.10 <sup>6</sup>	0,600 až 0,800
Bentonit (vlhký)	1,8–2,0	1,8–2,0.10 <sup>6</sup>	1,100 suchý*)
Krystaly CuSO <sub>4</sub>	0,35–0,40	0,35–0,40.10 <sup>6</sup>	–
Soustava gel-krystaly CuSO <sub>4</sub>	0,60	0,6.10 <sup>6</sup>	měřicí sonda MS-110

\*) Bentonitové obložení není vhodné do půd bez přítomnosti podzemní vody.