

# 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 1–9 ODOLNOST ŽELEZOVÉHO BETONU

### OBSAH

1	ÚVOD .....	3
2	SPECIFIKA KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU.....	3
2.1	MECHANIZMUS KOROZE .....	3
2.2	FAKTORY DEGRADACE VYZTUŽENÝCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	4
2.3	KOROZE ZPŮSOBENÁ KARBONATACÍ .....	4
2.4	KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE VLIVEM PŘÍTOMNOSTI CHLORIDŮ .....	5
3	KVALITATIVNÍ ASPEKTY PŘI POSUZOVÁNÍ KOROZNÍCH JEVŮ .....	6
3.1	OBECNÉ PRINCIPY .....	6
3.2	VLIV PH NA KOROZI OCELI.....	6
3.3	POURBAIXŮV DIAGRAM PRO OCEL VE VLHKÉM BETONU .....	7
4	KVANTITATIVNÍ HODNOCENÍ ODOLNOSTI OCELI V BETONOVÉM OBLOŽENÍ .....	7
4.1	OBECNÉ PRINCIPY .....	7
4.2	VLIV ČÁSTEČNÉHO ELEKTRONICKÉHO SPOJENÍ VÝZTUŽE NA JEJÍ ELEKTRICKÝ ODPOR .....	8
4.3	VÝZNAM OKUJÍ NA OCELOVÉ VÝZTUŽI Z HLEDISKA ODOLNOSTI PROTI BLUDNÝM PROUDŮM .....	10
5	POSOUZENÍ VLIVU BLUDNÝCH PROUDŮ NA ŽELEZOBETONOVOU KONSTRUKCI ULOŽENOU V ZEMI.....	11
5.1	PRINCIP ŠÍŘENÍ BLUDNÝCH PROUDŮ ZEMÍ .....	11
5.2	NELINIOVÁ ÚLOŽNÁ KONSTRUKCE V HOMOGENNÍM POLI BLUDNÝCH PROUDŮ .....	11
5.3	HRANICE ANODICKÉ PROUDOVÉ HUSTOTY, PŘI KTERÉ NENASTÁVÁ KOROZE OCELI V BETONOVÉM OBLOŽENÍ .....	13
6	ELEKTRICKÁ REZISTIVITA JAKO KRITÉRIUM KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU.....	15
6.1	ČINITELÉ ODOLNOSTI BETONU PROTI KOROZI .....	15
6.2	PERMEABILITA A VODOTĚSNOST BETONU .....	16
6.3	ELEKTRICKÁ REZISTIVITA BETONU .....	16
6.4	METODY STANOVENÍ ELEKTRICKÉ REZISTIVITY BETONU .....	16
6.5	ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ REZISTIVITY BETONU A JEHO PERMEABILNÍ PÓROVITOSTI A PEVNOSTÍ V TLAKU NA KOROZNÍM PROSTŘEDÍ – PŘÍKLAD VÝPOČTU .....	18
6.6	VYUŽITÍ ODVOZENÉ METODIKY PRO PRAKTICKÉ VYUŽITÍ.....	21
7	PŘÍKLAD POUŽITÍ SVAŘOVANÉ VÝZTUŽE V BETONU.....	21
7.1	ÚVODEM .....	21
7.2	UZEMŇOVACÍ SOUSTAVA VYTVOŘENÁ Z OCELOVÝCH SÍTÍ V PODKLADNÍM BETONU [39].....	22
7.3	OCHRANNÉ UZEMNĚNÍ S VYUŽITÍM VÝZTUŽE V ZÁKLADOVÉ DESCE [40] .....	23
8	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ .....	27
8.1	VŠEOBECNĚ .....	27
8.2	PRIMÁRNÍ OCHRANA .....	27
8.3	SEKUNDÁRNÍ OCHRANA.....	27
8.4	KONSTRUKČNÍ OPATŘENÍ .....	27
8.5	MĚŘICÍ VÝVODY U LINIOVÝCH STAVEB .....	28
8.6	VYUŽITÍ VÝZTUŽE PRO ÚČELY UZEMŇOVACÍ .....	28
9	OBRÁZKY .....	29

## PŘEDMLUVA

Ochraně stavebního díla proti agresivnímu prostředí, zejména atmosférické korozi, jakož i otázce životnosti železobetonových staveb je věnována velká pozornost a z toho plynoucí vydané odborné publikace, standardy, směrnice, které se týkají této problematiky. Existuje rozsáhlá odborná literatura týkající se ochrany úložných kovových (zejména liniových zařízení, jako je potrubí) proti korozi bludnými proudy. Není však k dispozici odborná literatura, která by komplexně pojednávala o šíření bludných proudů železobetonovými konstrukcemi a o jejich korozních dopadech. Autor pomůcky při řešení této široké mezioborové problematiky vychází z teoretických šetření, ze studia technické literatury i praktických měření jako projektanta, výzkumného pracovníka a soudního znalce. Příklady z praxe, návrh zásad pro projektování a výstavbu vycházejí z více než čtyřicetileté zkušenosti autora.

U železového betonu, jako konstrukce kompozitního charakteru, musí dojít nejdříve k porušení betonu, resp. krycí vrstvy, aby mohl začít korozní proces výztuže. Proto je stručně pojednána i problematika příčin degradace betonu.

Proti uložení v zemi poskytuje beton ocelové výztuži vysoký stupeň ochrany v důsledku existence pasivační vrstvy oxidů železa, které jsou termodynamicky stabilní v rozmezí  $\text{pH} = 12$  až  $13$ , což odpovídá polarizačnímu potenciálu  $E_{\text{CSE}} = -1,03$  až  $-1,09$  V. Tato pasivační vrstva okují (na bázi magnetitu) o tloušťce až  $500 \mu\text{m}$  tvoří elektrochemickou a ohmickou bariéru proti působení bludných proudů, pokud existují podmínky, aby tento proud protékal železobetonovou konstrukcí. Z toho důvodu, podle ověřených šetření, hranice anodické proudové hustoty na povrchu výztuže, při které nedochází ke korozi výztuže, je v rozmezí  $50$  až  $75 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ , průměrně  $J_{\text{kor}} \leq 60 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$  a při vyšších hustotách je korozní rychlost průměrně pětkrát nižší než v případě oceli uložené v zemi.

Důležitým kritériem koroze ocelové výztuže v betonu je jeho elektrická rezistivita. Podle provedených šetření byly sestrojeny grafy závislosti elektrické rezistivity betonu na jeho permeabilní pórovitosti, pevnosti v tlaku a na korozním prostředí. Tyto grafy je možno dále využít při výpočtu zemního odporu ochranného uzemnění tvořeného ocelovým zemničem v betonovém obložení a vypočítat jeho životnost. V tomto příspěvku jsou zahrnuty příklady vhodného použití tohoto způsobu, jakož i nesprávná aplikace u tzv. základových zemničů.

Z provedených šetření vyplývá, že železobetonové konstrukce, včetně liniových, vytvořené standardním způsobem (tj. výztuž je spojována přesahem nebo vázacím drátem), uložené v zemi v elektrickém poli, nejsou prakticky ohroženy korozi bludnými proudy. Koncepce svařované výztuže jako metody ochrany proti bludným proudům včetně navrhování měřicích vývodů nemá technické opodstatnění, prodražuje stavbu a zvyšuje provozní náklady na periodická měření, která mají nulovou vypovídací hodnotu.

I při pouze částečně svařované výztuži (např. ze  $30 \%$ ) se sníží podélný odpor liniové konstrukce a v důsledku toho konstrukce sbírá více proudu z okolního elektrického pole, takže zařízením protéká více bludného proudu s možnými nepříznivými korozními důsledky.

## 1 ÚVOD

Korozní odolnost betonových a železobetonových konstrukcí, jejich životnost a spolehlivost je jedním ze základních problémů téměř všech oborů stavitelství za posledních více než 130 let, kdy je beton vyráběn. Problémy vyvstávají zvláště u konstrukcí, které mají kompozitní charakter, což je případ vyztuženého a předpjatého betonu, kde dochází k degradaci každého jednotlivého staviva, snížení spolupůsobení betonu a ocelové výztuže, a z toho vyplývajících vad a poruch [1]. Při hodnocení trvanlivosti těchto konstrukcí jde do značné míry o mezioborovou problematiku, která se mj. dotýká i elektrochemických procesů na rozhraní ocel/beton/korozní prostředí. Stavebně inženýrská praxe se tedy nemůže vyhnout sledování příčin narušení železobetonových konstrukcí zvláště u nadzemních staveb, kde jsou výsledky koroze nejhorší. Korozní proces je umožňován vlhkým vzduchem obsahujícím kyslík, vodu a CO<sub>2</sub> (v půdě), tedy složkami, které jsou potřebné pro přeměnu oceli v oxidy a posléze v nesourodé hydroxidy železa (rzi).

U železobetonových konstrukcí uložených v zemi se může vedle agresivity horninového prostředí vyskytnout koroze působením bludných a interferenčních proudů v lokalitách se stejnosměrně elektrizovanou kolejovou dopravou a v blízkosti anodových uzemňovacích stanic katodické ochrany. Vliv bludných proudů na železobetonové, zejména liniové konstrukce, je rozdílný podle toho, jestli je výztuž spojována přesahem nebo vázacím drátem nebo jestli je nutno výztuž z různých důvodů svařovat v ucelené systémy.

Pro hodnocení korozních jevů je třeba posoudit kritérium kvalitativní (termodynamickou stabilitu železa, zejména jeho oxidů v daném prostředí), jakož i kritérium kvantitativní (korozní rychlost výztuže v betonu v daných podmínkách).

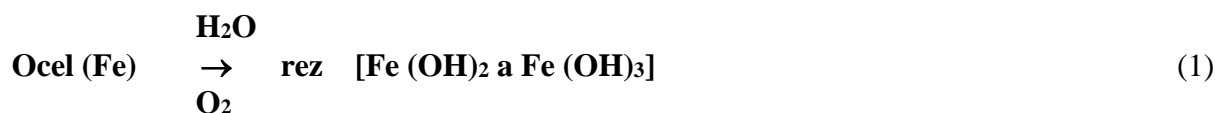
## 2 SPECIFIKA KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU

### 2.1 MECHANIZMUS KOROZE

Všeobecně se soudí, že beton poskytuje vysoký stupeň ochrany proti korozi v něm uložené ocelové výztuže v důsledku tenké ochranné vrstvy oxidů železa vytvořených na ocelovém povrchu samovolnou (atmosférickou) korozí. Tento pasivační film se udržuje na ocelovém povrchu, pokud pH prostředí kolem oceli zůstává zhruba v rozmezí 12,0 až 13,0, což odpovídá polarizačnímu potenciálu  $E_{CSE} = -1,03$  až  $-1,09$  V [2].

Depasivace ocelové výztuže, tedy ztráta ochranných vlastností vrstvy oxidů železa, podle zkušeností z praxe, nastává při poklesu  $pH < 9$ , kdy dochází k přeměně  $Ca(OH)_2$  na  $CaCO_3$  [3]. K porušení pasivačního povlaku výztuže může docházet působením chloridových iontů (působení mořské nebo brakické vody nebo rozmrazovacích solí u mostovek). Chloridové ionty působí jako iniciátor koroze, kterou způsobuje O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Aby došlo k porušení vyztužené betonové konstrukce musí být současně splněny tři podmínky, jak je znázorněno na obr. 1, tj. musí v konstrukci být spojitě (permeabilní) póry, musí být přítomna voda a v obklopujícím prostředí musí být přítomny agresivní látky.

Mechanismus koroze výztuže v trhlinách betonu je ukázán na obr. 2. Pokud jeden z činitelů podle obr. 1 nepůsobí, je porušení nepravděpodobné. Podstatou koroze výztuže je tedy přeměna oceli v oxidy a hydroxidy železa podle rovnice:



Tím se snižuje účinný průřez ocelového prutu alespoň o 20  $\mu\text{m}/\text{rok}$  [4]. Navíc je koroze podporována jedním z následujících procesů: karbonatací betonu nebo pronikáním chloridů do konstrukce.

Vyztužená konstrukce permanentně ponořená ve vodě (i mořské) nemůže korodovat, chybí k tomu kyslík. Stejně tak nemůže kvůli absenci vody korodovat konstrukce, která je stále v suchém prostředí.

## 2.2 FAKTORY DEGRADACE VYZTUŽENÝCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

V důsledku koroze betonu se zhorší charakteristiky a vlastnosti jako důsledek rozpouštění a vyluhování jeho rozpustných složek (tzv. koroze prvního druhu), tvorby zplodin koroze, které nemají vazné vlastnosti (koroze druhého druhu) a nashromáždění málo rozpustných solí, které krystalizují při zvětšení objemu její tuhé fáze (koroze třetího druhu).

Příčiny narušení železobetonových konstrukcí jsou zejména [4]:

- koroze výztuže,
- síranová koroze cementové matrice,
- tvorba ledu jak v cementové pastě, tak v kamenivu,
- napadení povrchu betonu agresivními vodami,
- vývoj trhlin jako následek vlhkostních a teplotních změn a zatížení,
- abraze a eroze povrchu betonu,
- alkalicko-křemičitá reakce.

Pro degradaci betonových konstrukcí je nutná koexistence tří následujících prvků, jak je uvedeno v *odst. 2.1* (viz *obr. 1*):

- spojitá pórovitost betonu,
- působení agresivních činidel,
- přítomnost vody.

## 2.3 KOROZE ZPŮSOBENÁ KARBONATACÍ

V betonu je ocelová výztuž chráněná před korozí díky několika desítkám až stovkám mikrometrů silné vrstvičky, tvořené speciálními oxidy železa (zde je označíme  $\text{FeOOH}$ ). Tento produkt je tak nepropustný, že kyslík a voda jím nemohou penetrovat a přicházet do kontaktu s vlastní ocelí, takže ke korozi, vyjádřené rovnicí (1), nedochází. Tato ochranná vrstvička je stabilní v zásaditém prostředí s pH více než 11,5. Díky vzniku  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v průběhu hydratace, je pH kapalné fáze, vyplňující kapiláry a póry v cementové pastě vyšší než 13, takže toto prostředí je schopno ochránit výztuž před korozí. Tato vlastnost se označuje jako **pasivace** (viz *obr. 3*).

Ovšem situace se může změnit následkem pronikání  $\text{CO}_2$  z okolního prostředí přes krycí betonovou vrstvu, přičemž dochází k reakci (2), známé jako karbonatace, tedy přeměna  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na uhličitán vápenatý  $\text{CaCO}_3$ :



Čím poréznější je beton ve vrstvě krytí, tím vyšší je rychlost karbonatace a tím kratší je čas, potřebný k neutralizaci  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v krytí. Pokud k tomu dojde, klesne pH na kontaktu s výztuží pod hodnotu 9, a to je hodnota nižší, než jaká je potřebná pro pasivaci.

Díky tomuto procesu, známému jako depasivace, je odstraněna ochranná vrstva FeOOH. Proto na té straně, na které nastala karbonatace, reaguje ocelová výztuž podle rovnice (1) a tvoří se rez. To je provázáno zvýšením specifického objemu, oxidy, které jsou produkty koroze, mají objem 6–7krát vyšší než železo. Betonová krycí vrstva praská (*obr. 2*), dochází k přímému kontaktu ocelové výztuže se vzduchem a koroze se ještě zhoršuje.

Sama o sobě není karbonatace nebezpečná, protože nezpůsobuje korozi ani betonu, ani výztuže. Skutečnými agresivními médii pro korozi výztuže jsou voda a kyslík (vlhký vzduch), poněvadž pouze ty vystupují v rovnici (1), která popisuje korozi. Jinými slovy, ani vysoký obsah CO<sub>2</sub> v okolním prostředí nevyvolá korozi, pokud je okolní vzduch suchý, protože není přítomna voda – jedna ze dvou ingrediencí, znázorněných na *obr. 1*. Stejně tak koroze karbonatací nenastane v betonové konstrukci, která je neustále pod vodou, protože se tam nevyskytuje kyslík a plyn nemůže pronikat vodou, která vyplňuje kapilární póry, jak bylo uvedeno v *odst. 2.1*. Hloubka karbonatace nepřekračuje obvykle 20 až 30 mm [4].

## 2.4 KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE VLIVEM PŘÍTOMNOSTI CHLORIDŮ

Pasivační ochrannou vrstvu výztuže rozrušují i chloridové ionty (za přítomnosti kyslíku a vlhkosti). Tvořící se korozní produkty mají asi dvakrát větší objem než původní kov, což má za následek praskání betonu v důsledku jeho nízké pevnosti v tahu. Korozivní chemikálie pak mohou těmito trhlinami snáze pronikat k ocelové výztuži a působit intenzivní korozi.

Zavedení chloridových iontů do betonu (vnikání mořské vody do železobetonových konstrukcí, aplikace rozmrazovací soli, vyluhování chloridů z přísad do betonu, jako je CaCl<sub>2</sub>), tedy má za následek vznik korozních produktů relativně velkého objemu, namáhajících beton v tahu, takže vznikají vnitřní trhliny s následným drolením betonu (viz *obr. 2*).

Při tvoření korozních zplodin oceli vzniká značný tlak na okolní beton. Tento tlak dosahuje až 70 MPa. Jelikož pevnost v tahu je u betonu pouze asi 3,5 MPa mohou korozní produkty porušit krycí betonovou vrstvu velmi snadno.

Koroze výztuže v betonu je způsobena jak mikročlánky (samovolnou korozi), tak makročlánky. Tyto makročlánky vznikají v důsledku rozdílné koncentrace kyslíku a chloridů, jakož i různého pH na různých místech ocelové výztuže. Zatím však není známo, jak se oba mechanismy podílejí na průběhu korozního procesu, podobně jako není znám mechanismus narůstání a narušení ochranného filmu na ocelové výztuži v betonu.

Beton je poškozován, jestliže pronikající voda obsahuje chloridy, sírany a dusičnany koncentrace 0,1 až 4 % (hmotnostní). Pro odolný beton je nutno dodržet tyto zásady:

obsah cementu v betonu nejméně 10 až 16 % (hmotnostní), obsah vody 4 až 8 %, poměr voda/cement (w/c) by měl být v rozmezí 0,4 až 0,5 [5].

V chloridovém prostředí vlivem anodických reakcí vzniká směs kyseliny solné a chlorné, což dále zhoršuje kvalitu betonu. Je dobře známo, že betonové mostovky předčasně stárnou, používá-li se na nich k odstraňování sněhu soli a jsou-li vystaveny těžkému provozu. Odlupování betonu je způsobeno špatnou kvalitou betonu a důsledky mrznutí a rozmrzávání betonu. Vydrolování vede k obnažení ocelové armatury a k její rychlé korozi. Příčinou tohoto odloupávání povrchové vrstvy betonu a jejího rozdrolení je koroze ocelové armatury vyvolaná pronikáním soli nebo chloridových iontů, jestliže koncentrace chloridů na úrovni přilehlé vrstvy ocelové výztuže dosáhne 1,2 kg na 1 m<sup>3</sup> betonu, tj. 0,4 % vztaženo k hmotnosti cementu (300 kg/m<sup>3</sup>).

K porušení pasivačního povlaku výztuže a následné korozi došlo při obsahu chloridových iontů 0,26 % vztaženo k hmotnosti cementu, 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.

Penetrace chloridů skrze krytí výztuže může nastat dvěma odlišnými cestami:

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

Hloubka penetrace může být až 80 mm [4] i více podle třídy betonu a je výrazně nepravidelná (jde o tzv. bodovou korozi).

### 3 KVALITATIVNÍ ASPEKTY PŘI POSUZOVÁNÍ KOROZNÍCH JEVŮ

#### 3.1 OBECNÉ PRINCIPY

Anodická reakce rozpouštění kovu je vždy doprovázena současnou redukcí nějaké složky prostředí (katodickou depolarizační reakcí). Při různé dostupnosti depolarizátoru (nejčastěji kyslíku) dochází ke vzniku tzv. článku s různou aerací (ovzdušněním). Článek s různou (diferenciální) aerací může vznikat jak na povrchu jediného kovu, tak na dvou oddělených elektrodách ze stejného materiálu spolu vodivě spojených, které jsou ponořeny do roztoku elektrolytu lišícího se pouze koncentrací rozpuštěného kyslíku.

Na korozi oceli v betonu má zásadní vliv hodnota pH. Vzhledem k existenci pasivačního povlaku [6] na povrchu ocelové výztuže (viz *obr. 3*) je důležité zjistit závislost termodynamické stability oxidů železa a sice maghemitu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a magnetitu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a dalších složek v roztoku (v betonovém obložení) na pH a elektrodovém potenciálu.

#### 3.2 VLIV PH NA KOROZI OCELI

Diagramy potenciál/pH (Pourbaixovy) znázorňují všechny fáze daného kovu, které mohou existovat ve vodném prostředí v závislosti na oxidační schopnosti prostředí (potenciálu) a pH. Rovnice přímek ohraničujících oblasti stability fází vycházejí z Nernstovy rovnice např. pro systém Fe –  $\text{H}_2\text{O}$  (viz *obr. 3* a *obr. 4*).

Poloha přímek je závislá na aktivitě iontů v roztoku, která se volí libovolně a pro všechny iontově rozpuštěné látky stejně velká (nejčastěji se volí  $10^{-6}$ ).

V diagramu je vyznačena také oblast stability vody, která je ohraničena dvěma přímkami. Spodní přímka představuje rozklad vody na vodík (v neutrálním nebo alkalickém prostředí) podle rovnice



kteří v kyselém prostředí odpovídá reakce



Pod touto přímkou (s klesajícím potenciálem) bude docházet k rozkladu vody a vývoji vodíku. Nad touto přímkou je voda stabilní, a veškerý přítomný vodík bude oxidován na  $\text{H}^+$  nebo na  $\text{H}_2\text{O}$ . Vrchní přímka představuje redukcí kyslíku obsaženého ve vodě podle rovnic



pro kyselé prostředí, a



pro neutrální a alkalické prostředí. Pod touto přímkou je veškerý přítomný kyslík redukován na  $H_2O$  resp. na  $OH^-$ , nad touto přímkou je voda nestabilní a oxiduje se na kyslík. Oblast stability vody umožňuje určit, zda bude koroze provázána vývojem vodíku (vodíkovou depolarizací) nebo redukcí kyslíku (kyslíkovou depolarizací).

Pourbaixovy diagramy znázorňují všechny reakce a reakční produkty, které se nacházejí v systému po ustavení rovnováhy. V oblastech, kde jsou stabilní rozpustné ionty příslušného kovu, kov aktivně koroduje (oblasti koroze). Kov se může pasivovat v oblastech stability nerozpustného oxidu nebo hydroxidu (oblasti pasivity). Oblasti, kde je stabilní kov jako takový, není koroze termodynamicky možná (oblast imunity).

Základ E-pH diagramů položil v roce 1938 v Belgii Marcel Pourbaix. Základní forma Pourbaixových diagramů je sestavena pro vodné roztoky iontů kovu s  $10^{-6}$  M koncentrací při teplotě  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku  $101,325\text{ kPa}$ . Je sestaven pro většinu kovů a pro některé slitiny (např. Fe-Ni). Diagram je významný z hlediska předvídání korozního chování kovu v roztoku, odhadu složení vzniklých korozních produktů a návrhu změn prostředí, které by předcházely nebo snižovaly korozní napadení.

Pourbaixovy diagramy jsou konstruovány pouze pomocí termodynamických veličin, nelze tedy žádným způsobem usuzovat na korozní rychlost, na rychlost, s jakou se tvoří pasivní film, případně jak rychle bude koroze probíhat po proběhlé pasivaci. V této souvislosti je též nutné zdůraznit, že vzniklý oxid nebo hydroxid nemusí mít ochranné vlastnosti.

### 3.3 POURBAIXŮV DIAGRAM PRO OCEL VE VLHKÉM BETONU

Byla zjišťována [7] závislost termodynamické stability oxidů železa a dalších složek v roztoku na pH a elektrodovém potenciálu  $E$  vůči standardní vodíkové elektrodě  $E_{SHE}$  pro maghemit ( $Fe_2O_3$ ) a magnetit ( $Fe_3O_4$ ) tedy základní složky pasivačního povlaku na ocelové výztuži betonu. Vrstva nejbližší k povrchu oceli, tj. wüstit ( $FeO$ ) podle *obr. 3* nekoroduje, tudíž není v diagramu v *obr. 4* zahrnuta.

Z rovnic přímků ohraničujících oblasti stability fází železa na podkladě Nernstovy rovnice (viz *obr. 3*) vychází pro  $Fe_2O_3$  stabilita při  $pH = 7,3$ , čemuž odpovídá  $E_{SHE} = -0,19\text{ V}$  ( $E_{CSE} = -0,51\text{ V}$ ) a pro  $Fe_3O_4$  je to pro  $pH > 9$ , čemuž podle *obr. 4* odpovídá  $E_{SHE} = -0,60\text{ V}$

( $E_{CSE} = -0,92\text{ V}$ ).

Z diagramu dále vyplývá, že alkalická reakce pro stabilitu  $Fe_3O_4$  je  $pH = 13,8$ , čemuž odpovídá  $E_{SHE} = -0,87\text{ V}$  ( $E_{CSE} = -1,19\text{ V}$ ).

Zkušenosti z praxe potvrzují [2], že k depasivaci (a ke tvorbě) rzi dochází při poklesu  $pH < 9$  ( $E_{CSE} = -0,92\text{ V}$ ), kdy nastává přeměna  $Ca(OH)_2$  na  $CaCO_3$ , tedy dochází ke karbonataci (viz rovnice č. 2).

## 4 KVANTITATIVNÍ HODNOCENÍ ODOLNOSTI OCELI V BETONOVÉM OBLOŽENÍ

### 4.1 OBECNÉ PRINCIPY

Elektrochemická koroze vzniká v důsledku existence heterogenit na rozhraní ocel – betonové obložení – vnější prostředí. V makročlancích elektrolytickou proudovou cestou, tj. vlhkým betonem, protéká proud (uplatňují se zde ionty) zatím co galvanickou (elektronovou)

proudovou cestu tvoří ocelová výztuž. Pokud korodující ocelovou výztuží prochází vnější stejnosměrný proud, jedná se o korozi bludnými proudy. Aby k tomuto typu koroze došlo, musí být splněny některé podmínky, především elektrická spojitost ocelové výztuže.

## 4.2 VLIV ČÁSTEČNÉHO ELEKTRONICKÉHO SPOJENÍ VÝZTUŽE NA JEJÍ ELEKTRICKÝ ODPOR

### 4.2.1 Teoretická šetření

Uspořádání ocelové výztuže v železobetonové konstrukci je z hlediska vzájemných kontaktů jednotlivých pruhů ovlivněno stochastickými tedy náhodnými jevy. Pro zjištění elektrické vodivosti tohoto systému je nutno zkoumat jaká je pravděpodobnost, že dva nebo tři na sobě nezávislé jevy nastanou současně. Za účelem zjištění příslušných elektrických hodnot pro případy kontaktů při křížení prutů vnější (horní) výztuže, resp. vnitřní (dolní) výztuže i distanční výztuže je třeba vzít v úvahu, že pouze určitý počet je v přímém galvanickém kontaktu. Obdobná situace nastává při přesahu (stykování) výztuže a při použití vázacího drátu.

V praxi u standardních konstrukcí se vyskytuje pouze částečně provařená výztuž z konstrukčních a montážních důvodů. Pro účely uzemňování se používají kari sítě, v betonovém obložení (s výhodou v podkladním betonu), které musí být elektricky spojitě, tudíž spojené svařováním nebo ocelové pásy v betonovém obložení u obvodového zemniče.

Pro zjištění počtu prutů (např. v základové desce), které jsou v přímém galvanickém kontaktu využijeme principy statistiky [8], kde:

$P(\%)$  – Teoretická provařenost výztuže

$P'(\%)$  – Reálná provařenost všech částí výztuže

$\eta(\% \cdot 10^{-2})$  – Pravděpodobnost dokonalého propojení všech částí výztuže (vnější, vnitřní, distanční)

$$P' = 100 (P / 100)^3 = P^3 / 100^2 \quad \text{respektive} \quad (7)$$

$$P = (10^4 \cdot P')^{1/3} \quad (8)$$

### 4.2.2 Praktický příklad stanovení parametrů u liniové konstrukce

V případě kabelového tunelu v hloubce cca 30 m (pro 24 ks kabelů 22 kV, 2 ks kabelů 110 kV a 12 ks sdělovacích kabelů) [9] o vnějším obvodu  $0 = 13$  m (o náhradním kruhovém průměru  $d = 3,9$  m je celková tl. železobetonové konstrukce 0,5 m, při jejím průřezu

$S_b = 7,1$  m<sup>2</sup>. Na 1 bm tunelu tedy připadá  $V_b = 7,1$  m<sup>3</sup> betonu. Hmotnost výztuže je 807 kg/bm, tj.  $807 / 7,1 = 114$  kg/m<sup>3</sup> betonu.

Ocelová výztuž sestává z definitivní konstrukce (ostění), kde stykování je provedeno přesahem (pruty  $\varnothing 10$  až 25 mm) a částečně vázacími dráty o celkové hmotnosti 503 kg/bm a je uložena v betonu o tl. 0,25 m. Provizorní železobetonová konstrukce ze stříkaného betonu o tl. 0,25 m je vytvořena z kari sítě 8/150/150, a z montovaných příhradových nosníků o celkové hmotnosti ocelových konstrukcí 304 kg/bm, přičemž svařené sítě činí 190 kg/m z celkové hmotnosti, tj.  $(190/807) \cdot 100 = 23,5$  %.

V praxi se tedy vyskytuje částečně provařená výztuž koroze z konstrukčních a montážních důvodů.



Reálná provařenost výztuže podle vztahu č. 7 bude:

$$\underline{P'} = P^3 \cdot 100^{-2} = 23,5^3 \cdot 100^{-2} = \underline{1,3 \%}.$$

**Pro  $G = 807 \text{ kg/bm}$  je průřezová plocha výztuže:**

$$S_v = G / 7850 \text{ kg.m}^{-3} = \underline{0,1028 \text{ m}^2} \quad (9)$$

Při elektrické rezistivitě oceli  $\rho_o = 0,21 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$

je při  $P = 100 \%$  podélný odpor na 1 km:  $R_L = \rho_o \cdot L \cdot S_v^{-1}$  ( $\Omega\text{km}^{-1}$ ;  $\Omega\text{m}$ ; m;  $\text{m}^2$ )

Po dosazení:

$$R'_L = 0,21 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \cdot 0,1028^{-1} = 2,0428 \cdot 10^{-3} = \underline{0,002 \Omega\text{km}^{-1}} \quad (10)$$

**Reálný podélný odpor KT (výztuže)**

Pro  $P' = 1,3 \%$  resp. pro  $P = 23,5 \%$  je

$$R_L'' = (100 / 1,3) \cdot 0,002 = \underline{0,1538 \Omega\text{km}^{-1}} \quad (11)$$

**Poznámka 1:**

Porovnání průřezu a ocelové výztuže:

$$S_b : S_v = 7,1 : 0,1028 = 69 : 1$$

**Poznámka 2:**

Podle autorem provedených šetření je podélný elektrický odpor KT s ocelovou výztuží spojovanou pouze přesahem a při použití vázacího drátu pro železobetonovou konstrukci o hmotnosti výztuže  $65,1 \text{ kg.m}^{-3}$ : byl zjištěn počet kontaktů (křížení + přesah) 3540 ks na  $1 \text{ m}^3$  betonu.

Pro složený elektrický obvod se složitým sérioparalelním zapojením včetně zapojení odporů do trojúhelníku (pro distanční výztuž) byla zjištěna hodnota  $R_L = 96,3 \Omega\text{km}^{-1} = 100 \Omega\text{km}^{-1}$ .

Při přepočtu na hmotnost výztuže  $114 \text{ kg.m}^{-3}$  bude podélný odpor nižší  $114 / 65,1 = 1,75\text{x}$ , tedy bude  $\underline{R_L} = 96,3 / 1,73 = \underline{55 \Omega\text{km}^{-1}}$  (12)

Tato hodnota je podstatně vyšší než  $R'_L = 0,1538 \Omega\text{m}^{-1}$ , (vztah k č. 11)

tedy  $R_L / R'_L = 55,0 / 0,1538 = 357,6 \text{ x}$ , takže ji s chybou  $0,28 \%$  můžeme zanedbat.

**Poznámka 3:**

U definitivního ostění je aplikován vodostavebný beton C 30/37 XA2 s hydroizolační krystalizační přísadou (Xypex v množství  $5 \text{ kg.m}^{-3}$  betonové směsi) s max. průsakem 50 mm. Pro permeabilní pórovitost max.  $n_p = 1,7 \%$  vychází podle obr. 10 elektrická rezistivita betonu  $\rho_b = 600 \Omega\text{m}$ .

Podélný elektrický odpor betonu:

$$R_{LB} = \rho_b \cdot L / S_b = 600 \cdot 1000 / 7,1 = \underline{84507 \Omega \text{ km}^{-1}} \quad (13)$$

Tuto hodnotu můžeme zanedbat, jelikož je  $5,5 \cdot 10^5$  krát vyšší než reálný elektrický odpor částečně svařené výztuže.

### 4.3 VÝZNAM OKUJÍ NA OCELOVÉ VÝZTUŽI Z HLEDISKA ODOLNOSTI PROTI BLUDNÝM PROUDŮM

#### 4.3.1 Všeobecně

Průtok korozního proudu (vlivem makročlánků nebo bludných proudů) mezi výztuží a vlhkým betonem omezuje elektrochemická bariéra (podle obr. 3 je průměrný potenciál pasivačního povlaku při  $\text{pH} = 12,8$   $E_{\text{CSE}} = -1,13$  V, v úrovni úplné katodické ochrany). Omezení průtoku způsobuje i ohmická bariéra, tj. vrstva okují, sestávající hlavně ze dvou složek a sice  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (60–64 %) a  $\text{FeO}$  (28–32 %), souhrnně  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  resp.  $\text{Fe}(\text{FeO}_2)_2$ , což je oxid železno-železitý, který obsahuje až 72,4 % Fe. Tato skutečnost má zásadní význam pro elektrickou rezistivitu magnetitu, která je o několik řádů vyšší než Fe (uhlíkové oceli). Autor tohoto příspěvku provedl laboratorní a teoretická šetření za účelem kvantifikace šíření bludných proudů železobetonovými konstrukcemi, zejména liniovými jako jsou tunely, kolektory, kabelové kanály a za účelem zjištění důležitých konstant pro výpočet životnosti uvedených konstrukcí (odst. 4.3.3, 4.3.4).

#### 4.3.2 Elektrická rezistivita magnetitu

Z hlediska velikosti přechodového odporu na kontaktu ocelových prutů (křížení, přesah) 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 magnetitu velikosti 15/8/75 mm složení:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (53,4 %),  $\text{FeO}$  (44,22 %),  $\text{SiO}_2$  (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) s výsledkem  $R = 6,25 \Omega$ .

Při atomovém poměru 2 ( $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ ) se hodnota elektrického odporu ustálila, takže výsledná hodnota elektrické rezistivity magnetitu  $\rho_m = 1,0 \Omega\text{cm} = 0,01 \Omega\text{m} = 10^4 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .

#### Poznámka:

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

#### Poměr:

$$\rho_m / \rho_o = 47\,619 = \underline{5 \cdot 10^4}$$

#### 4.3.3 Přechodový elektrický odpor při křížení a přesahu výztuže

Popis laboratorních měření, úprava vybraných vzorků výztuže při suchém a při vlhkém stavu, metodika měření jsou obsaženy ve zvláštní studii, zatím nepublikované. Na tomto místě uvedeme pouze relevantní výsledky měření [43].

Pro různé profily (R14 mimo hřebínek, R14 hladký povrch,  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 10$ ) byl zjištěn přechodový odpor  $R_K = 300 \Omega$  (vlhký povrch) až  $3000 \Omega$  (suchý povrch u R8  $\varnothing 10$  mimo hřebínek).

**Průměrná hodnota kontaktu při křížení výztuže byla  $\varnothing R_K = 900 \Omega$ .**

U kontaktu přesahem výztuže (v délce až 1,2 m) byly zjištěny hodnoty v rozmezí  $R_p = 150$  až  $400 \Omega$ , průměrně  $\bar{R}_p = 250 \Omega$ .

Při měření s aplikací **vázacího drátu  $\varnothing 1,2$  mm** u R18/R8 v dl. 12,2 m byly zjištěny hodnoty  $9 \Omega$  (vlhký povrch) až  $150 \Omega$  (suchý povrch), průměrně  $\bar{R}_V = 40 \Omega$ .

#### Poznámka:

S využitím výše uvedených hodnot byl proveden výpočet uvedený v *odst. 4.2.2* – viz Poznámka 2.

#### 4.3.4 Stanovení tloušťky vrstvy okují a jejich korozní odolnost

S využitím hodnot podle *odst. 4.3.2* a *4.3.3* byl proveden orientační výpočet tloušťky vrstvy magnetitu. Při hodnotě  $\bar{R}_K = 650 \Omega$  a kontaktu dvou válcových ploch o průměru 14 mm byla spočítána tloušťka  $t = 500 \mu\text{m}$ , což je významné pro korozní odolnost, neboť podle [2] u magnetitových anod při anodické proudové hustotě  $100 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  je úbytek materiálu  $3 \text{ g}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ , tedy 3000krát méně než u železa (uhlíkové oceli).

## 5 POSOUZENÍ VLIVU BLUDNÝCH PROUDŮ NA ŽELEZOBETONOVOU KONSTRUKCI ULOŽENOU V ZEMI

### 5.1 PRINCIP ŠÍŘENÍ BLUDNÝCH PROUDŮ ZEMÍ

Zdrojem bludných proudů jsou stejnosměrné trakční soustavy, u nás především železnice s trakčním napětím 3 kV. V tomto případě část zpětného proudu teče od kolejí v místě elektrického vlaku půdou směrem k napájecí stanici (měničárně). Na této paralelní iontové cestě proud využívá úseky podzemních kovových a železobetonových konstrukcí v případech, kdy elektrická vodivost těchto zařízení je vyšší než vodivost půdy. To se týká především liniových konstrukcí s relativně malým podélným odporem a nízkou hodnotou přechodového odporu konstrukce / půda, jako jsou tunely metra v Praze s průměrnými parametry  $r_L = 0,05 \Omega\text{km}^{-1}$ ,  $r_p = 0,2 \Omega\text{km}$ . Podle [9,11] je průměrná hodnota vstupujícího a vystupujícího proudu (v anodické oblasti) pro dva tunely metra  $j_M = 6$  až  $10 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-1}$ . Při šíření bludných proudů se výrazně uplatňují uzemňovací soustavy bytových i jiných objektů přes nulové vodiče přípojek NN z trafostanice a přípojky horkovodů, kdy dále přes trafostanice a výměňkové stanice jsou galvanicky propojeny zemniče v okruhu 1 km i více. Uzemnění stáhne do sebe proudnice (v katodické oblasti bludných proudů), resp. se zvýší intenzita stávajícího elektrického pole (v anodické oblasti) v prostoru až do vzdálenosti 100 m podle typu ochranného uzemnění [12].

Pokud se v elektrickém poli bludných proudů nacházejí neliniové úložné konstrukce, které nejsou galvanicky připojeny k okolním objektům (např. úseky tunelů, kolektorů, opěrné zdi) šíření bludných proudů těmito konstrukcemi se podstatně snižuje v závislosti na podélném a přechodovém odporu a délce těchto zařízení.

### 5.2 NELINIOVÁ ÚLOŽNÁ KONSTRUKCE V HOMOGENNÍM POLI BLUDNÝCH PROUDŮ

#### 5.2.1 Teoretická šetření

Leží-li neliniová úložná konstrukce v elektrickém poli ve směru proudnic (viz *obr. 5a*), jsou hladiny potenciálu v zemi a ve vodiči identické a v obou je též intenzita elektrického pole [11].

Proudnicе do konstrukce budou jedním koncem vstupovat (bod B), druhým vystupovat (bod A). Na koncích vodiče vznikne napětí ( $U_B$  a  $U_A$ ), které v úložné konstrukci vyvolá proud I. Označíme-li podélný odpor konstrukce  $R_L$  přechodový odpor v uzlu B:  $R_B$  a v uzlu A:  $R_A$ , můžeme napsat pro zapojení v sérii (viz obr. 5b) pro efektivní odpor konstrukce proti zemi:

$$R_e = R_B + R_L + R_A \quad (\Omega) \quad (14)$$

$$\text{Pro } R_B = R_A = R_Z \quad \text{bude} \quad R_e = R_L + 2R_Z \quad (15)$$

$$\text{kde } R_Z = (\rho / 2\pi L) [\ln(L^2 / dh)] \quad (\Omega; \Omega m; m) \quad (16)$$

Pro náhradní průměr úložné konstrukce  $d$  v hloubce  $h$ , a délce  $L$  na konci konstrukce (A) délky  $L$  vznikne napětí:

$$-U_B + U_A = U = L \cdot E_i = L \cdot \rho \cdot J \quad (V; V \cdot m^{-1}; m; \Omega m; A \cdot m^{-2}) \quad (17)$$

Proud v konstrukci:

$$I = L \cdot E_i / R_e = L \cdot E_i / (R_L + 2R_Z) \quad (A; m; V \cdot m^{-1}; \Omega) \quad (18)$$

## 5.2.2 Dílčí závěr 1

Proud I v konstrukci bude nižší, jestliže bude hodnota  $R_L$  co největší. Jinými slovy: Ocelová výztuž spojovaná svařením bude z okolního elektrického pole sbírat více proudu než v případě standardního provedení (spojování výztuže přesahem a vázacím drátem).

## 5.2.3 Příklad výpočtu proudu při variantním provedení ocelové výztuže kabelového tunelu

Pro kabelový tunel podle odst. 4.2.2., tj.  $d = 3,9$  m,  $h = 30$  m,  $L = 200$  m (izolovaný úsek mezi dvěma pracovními, resp. dilatačními spárami);

$$\rho = 110 \Omega m; E_i = 6,2 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} = 0,0062 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \quad [9]$$

Zemní odpor podle vztahu č. 16 bude:

$$R_Z = (110 / 2\pi \cdot 200) [\ln(200^2 / 3,9 \cdot 30)] = 0,0875352 \cdot 5,873446 = 0,51 \Omega$$

a) Varianta a: Výztuž spojovaná přesahem a vázacím drátem:

$$\text{Podle vztahu č. 12: } R_L = 55 \Omega \text{km}^{-1} \cdot 0,2 = 11,0 \Omega$$

$$\text{Podle vztahu č. 18: } I = 200 \cdot 0,0062 / (11 + 2 \cdot 0,51) = 1,24 / 12,02 = \mathbf{0,1032 \text{ A}} \quad (19)$$

b) Varianta b: Teoretický případ – výztuž svařena na 100 %:

$$\text{Podle vztahu č. 10: } R'_L = 0,002 \Omega \text{km}^{-1} \cdot 0,2 = 0,0004 \Omega$$

$$I = 1,24 / (0,0004 + 1,02) = 1,24 / 1,0204 = \mathbf{1,2152 \text{ A}} \quad (20)$$

c) Varianta c: Pro případ provařenosti  $P' = 1,3 \%$

$$\text{Podle vztahu č. 11: } R''_Z = 0,1538 \Omega \text{km}^{-1} \cdot 0,2 = 0,03076 \Omega$$

$$I'' = 1,24 / (0,03076 + 1,02) = 1,24 / 1,05076 = \mathbf{1,180 \text{ A}} \quad (21)$$

### 5.2.4 Dílčí závěr 2

V případě standardního provedení stavby (bez spojování výztuže částečným svařováním) teče úložnou konstrukcí:  $1,18 / 0,1032 = 11,43x$  méně proudu, což je významné.

## 5.3 HRANICE ANODICKÉ PROUDOVÉ HUSTOTY, PŘI KTERÉ NENASTÁVÁ KOROZE OCELI V BETONOVÉM OBLOŽENÍ

### 5.3.1 Všeobecně

Nejdůležitějším kritériem ohrožení korozí je hustota korozního proudu na jednotku plochy kovu. Pouze znalost této hustoty anodického (korozního) proudu umožňuje dát odpověď na otázku, jaký je úbytek kovu na jednotku plochy za danou dobu nebo jaká je rychlost pronikání koroze u konstrukce v průběhu času.

Z hlediska odolnosti železobetonu proti bludným proudům a stanovení životnosti ocelových zemničů je významný poznatek, že závislost koroze oceli na čase je parabolická [13].

$$\delta_k^2 = C\tau, \text{ respektive} \quad \delta_k = (C \cdot \tau)^{0,5} \quad (22)$$

kde  $\delta_k$  – je tloušťka zkorodované vrstvy (okují) podle obr. 3 a šetření podle odst. 4.3.4)

$\tau$  = doba, po kterou je ocel vystavena koroznímu procesu

$C$  = konstanta závislá na koncentraci kyslíku v korozním prostředí

Ze vztahu č. 22 vyplývá, že v průběhu času se korozní rychlost zmenšuje.

Například jestliže bude pro  $C = 1$ .

pro $\tau = 1$ rok	předpokládáme	$\delta_k = 0,15$ mm
pro $\tau = 10$ let	bude	$\delta_k = 0,47$ mm
pro $\tau = 40$ let	bude	$\delta_k = 0,95$ mm

jinými slovy:

v intervalu	0 – 1 roků	je korozní rychlost $K = 0,15 \text{ mm.a}^{-1}$
	1 – 10 roků	je korozní rychlost $K = 0,032 \text{ mm.a}^{-1}$
	10 – 40 roků	je korozní rychlost $K = 0,016 \text{ mm.a}^{-1}$

Za 40 let bude průměrná korozní rychlost  $K = 0,95 / 40 = 0,0237 \text{ mm.a}^{-1}$ , tedy pouze  $0,95 / 0,15 = 6,30x$  větší než za první rok.

### 5.3.2 Údaje z literatury

Podle mnoholetých šetření řady autorů a provozních zkušeností u železobetonových konstrukcí bylo přijato kritérium hustoty proudu na povrchu výztuže

$$J_{kor} \leq 60 \text{ mA.m}^{-2}, \quad (23)$$

při kterém prakticky nedochází ke korozi ocelové výztuže [14,15]. Několik šetření bylo věnováno vlivu stejnosměrného proudu vystupujícího z výztuže přes betonové obložení do

elektrolytu. Dramatický pokles soudržnosti (bond strength) na rozhraní ocel/beton byl zaznamenán po několika měsících až při proudových hustotách vyšších než  $1100 \text{ mA.m}^{-2}$ . Naopak bylo zjištěno u vzorků vystavených proudové hustotě  $J = 54 \text{ mA.m}^{-2}$ , že ani po 4 letech testování nedošlo k poklesu adheze mezi ocelovou výztuží a betonem [16].

### 5.3.3 Šetření provedená v tuzemsku

V roce 1986 byly v tehdejší Východní ústavu inženýrských staveb (VÚIS) Bratislava provedeny laboratorní zkoušky za účelem zjištění korozních úbytků oceli v betonu při různých hodnotách krycí vrstvy betonu pro různé typy betonů (v MPa) a současně při slepém pokusu (ponoření vzorku do vody bez proudového zatížení) a u vzorků bez betonového obložení [17]. Výsledky šetření byly zpracovány do grafu závislosti korozních úbytků v závislosti na hustotě korozního proudu a tloušťce krycí výztuže betonem [18], jak ukazuje *obr. 6* pro účely použití u zemničů v betonovém obložení C 16/20.

Z obrázku je patrné, že při hustotě korozního proudu  $J_{\text{kor}} = 60 \text{ mA.m}^{-2}$  dokonce již při tloušťce krycí vrstvy  $t = 20 \text{ mm}$  je korozní rychlost  $K = 0,01 \text{ mm.a}^{-1}$ , ( $79 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) což je uzanční hodnota pro nulovou korozi. Pro tl. 50 mm je  $K = 0,004 \text{ mm.a}^{-1}$ . Z důvodu destruktivních procesů u betonového obložení (karbonatace apod.) je nutno pro účely uzemňování volit tl. betonového obložení 50 mm.

### 5.3.4 Hustota korozního proudu na ocelové výztuži u kabelového tunelu

U kabelového tunelu podle *odst. 4.2.2* je u teoretické varianty b (viz *odst. 5.2.3*) korozní proud  $I' = 1,2152 \text{ A}$  (vztah č. 20). Při průměrné hmotnosti výztuže  $807 \text{ kg.m}^{-1}$  je průměrný povrch výztuže  $33,3 \text{ m}^2/\text{bm}$ . Celková plocha povrchu výztuže v anodickém úseku (v délce  $L/2 = 100 \text{ m}$ ) je  $S_v = 3330 \text{ m}^2$ . S ohledem na nerovnoměrné rozložení hustoty bludného proudu podél délky tunelu je maximální hodnota na konci úseku (v bodě A podle *obr. 5*).

Podle [12] je ve vzdálenosti  $L/20$  od okraje elektrody proudová hustota asi 6x vyšší než průměrná hodnota. Z toho důvodu se provozní bezpečnost konstrukce posuzuje na **úseku v délce 0,05 L**, tj.  $0,05 \cdot 200 = 10 \text{ m}$  (anodické části konstrukce).

$$J_{\text{kor}} = I_{\text{kor}} \cdot 0,05 L / S_v = 1\,215 \cdot 10 / 3330 = 3,65 \text{ mA.m}^{-2}.$$

Tato hodnota je  $60 / 3,65 = 16,4\text{x}$  nižší než tolerovaná hodnota podle vztahu č. 22.

#### Poznámka:

V případě železobetonové opěrné stěny v délce  $L = 300 \text{ m}$  rovnoběžně s kolejemi ve vzdálenosti 15 m od nejbližší ss elektrizované koleje [19], která je vytvořena ze svařených mikropilot, armokošů a zemních kotev, kterou protéká průměrně  $I_{\text{kor}} = 29,12 \text{ A}$  je celková plocha povrchu ocelových prvků v anodickém úseku  $S_v = 2498 \text{ m}^2$ . Průměrná hustota bludného proudu činí  $J_{\text{kor}} = 29120 / 2498 = 11,65 \text{ mA.m}^{-2}$ . V případě, že tuto hustotu vztáhneme na konec anodického úseku

$L' = 0,5 L = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ m}$  (10 %) bude:

$$J'_{\text{kor}} = 29120 \cdot 150 / 2498 \cdot 15 = 116,57 \text{ mA.m}^{-2}.$$

Korozní rychlost  $K = 0,70 \cdot 116,57 = 81,6 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} = 0,01 \text{ mm.a}^{-1}$ , což lze u dané konstrukce tolerovat.

### 5.3.5 Dílčí závěr 3

Spočítané hodnoty hustoty korozního proudu nemohou ani dlouhodobě ohrozit stabilitu příslušné železobetonové konstrukce i za předpokladu, že by byla vzájemně svařena veškerá výztuž v konstrukci, tj. u kabelového tunelu (KT) v délce 200 m podle *odst. 4.2.2*, což představuje statisíce svarů.

Na první pohled je zřejmé, že se jedná pouze o teoretický příklad. To ukazuje na absurditu používat jako ochranu proti bludným proudům princip svařování, byť částečného, výztuže. Provádět tisíce svarů na stavenišťe jednak zvyšuje pořizovací náklady, jednak často nejsou k dispozici svářeči k realizaci zbytečných svarů. Navíc je výztuž chráněna elektrochemickou a ohmickou bariérou podle *odst. 4.3* a uplatňuje se jev podle vztahu č. 22.

## 6 ELEKTRICKÁ REZISTIVITA JAKO KRITÉRIUM KOROZE OCELOVÉ VÝZTUŽE V BETONU

### 6.1 ČINITELE ODOLNOSTI BETONU PROTI KOROZI

Mezi činitele odolnosti betonu zahrnujeme činitele uplatňujícími se při výrobě betonu. Schopnost agresivního média proniknout k ocelové výztuži souvisí se strukturálními vlastnostmi betonu, především jeho vodotěsnosti, nasákavosti, pórovitosti a vzlínivosti. Odolnost cementového kamene proti působícímu agresivnímu médiu závisí na druhu a vlastnostech hydratačních produktů a celkového fázového složení. To je v převážné míře určené dávkou použitého cementu, obsahem přísad a příměsí, případně inhibitorů koroze ocelové výztuže. Z dalších činitelů rychlosti koroze ocelové výztuže rozhoduje zejména tloušťka krytí výztuže betonem a odolnost betonové konstrukce proti vzniku trhlin. I při jinak odolném betonu právě trhliny mohou umožnit přístup agresivního média až přímo k výztuži.

K zabránění přístupu agresivního prostředí k ocelové výztuži je třeba zabezpečit vodotěsnost betonu a jeho odolnost proti vzniku trhlin i jeho chemickou odolnost.

Mezní šířka trhlin se určuje podle konstrukčních, provozních a vzhledových požadavků, se zřetelem na trvanlivost konstrukce. V agresivním prostředí je mezní šířka trhlin 0,1 mm, ve vlhké půdě (mimo pásma proměnné hladiny podzemní vody) 0,2 mm. U pilot 0,3 mm a v suchém prostředí 0,3 až 0,4 mm [20].

Pro snížení koroze agresivitou prostředí a vlivem bludných proudů má zásadní vliv volba tloušťky krycí vrstvy výztuže, která by měla být 40-50 mm a třída betonu. Podle [21] čl. 42 nejnižší přípustná třída betonu, který má být odolný proti korozi je B20 (C 16/20), podle téže normy (i když neplatné, je zde využita jako literatura) je nejvyšší přípustný vodní součinitel pro beton odolný proti korozi  $w/c = 0,65$  a minimální množství cementu

$300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  betonu. V případě betonového obložení zemničů se osvědčil beton C 16/20, který má na jedné straně vhodnou permeabilní pórovitost ( $v \%$ ) a tomu odpovídající elektrickou rezistivitu  $\rho_b$  ( $v \Omega\text{m}$ ) a na straně druhé jeho odolnost v daném korozním prostředí, s přihlédnutím k technickoekonomickým parametrům, je optimální. Jelikož elektrická rezistivita betonu je v přímém vztahu s pevností betonu ( $v \text{MPa}$  resp.  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ) je účelné kvantifikovat tuto závislost i v rámci korozního průzkumu.

## 6.2 PERMEABILITA A VODOTĚSNOST BETONU

Permeabilita (propustnost) betonu je důležitá především z hlediska zajištění trvanlivosti a tím i dlouhé životnosti konstrukce. Závisí na ni pohyb vody při střídavém vysušování a nasakování, rychlost pronikání vody, která může obsahovat agresivní média. Vodotěsnost je zvrtnou hodnotou permeability pórovitým prostředím. Pro odolnost betonu proti působení vody je rozhodující kapilární pórovitost spojená s kapilárami většími než  $10^{-7}$  m, kterými prochází voda působením tlakového gradientu.

Objem těchto kapilárních pórů narůstá výrazně při vodním součiniteli  $w / c > 0,42$  [22,23], přičemž důležitější než póry jsou trhliny (praskliny) způsobené smršťováním cementového tmelu mezi zrna kameniva. V praxi je beton, který nepropouští vodu označován jako vodotěsný nebo vodostavebný beton. Podle [29] je materiál vodotěsný, pokud do něj nemůže proniknout žádná voda. Jako nepropustný materiál je označován materiál, do kterého pronikne tlaková voda pouze do určité hloubky, ale dále neprosakuje (viz obr. 7). Maximální hloubka průsaku u vodonepropustného betonu je stanovena na 50-70 mm.

## 6.3 ELEKTRICKÁ REZISTIVITA BETONU

Stanovení elektrické rezistivity betonu je nedestruktivní způsob stanovení korozního ohrožení výztuže v betonu. Póry v betonu mohou obsahovat vodu s rozpuštěnými solemi, takže beton se stává elektricky vodivým. Při znalosti elektrické rezistivity betonu můžeme činit důležité závěry, pokud jde o korozi výztuže v betonu [25]. Rychlost korozního procesu je funkcí několika parametrů, z nichž nejdůležitější je spojená kapilární pórovitost (*odst.* 6.2).

Z hlediska budoucích elektrických parametrů betonu jsou důležité charakteristiky jako je karbonatace a trhliny v betonu. Ke snížení tvorby trhlin v raném stádiu smršťování se používají různé přísady. Dále se používají přísady regulující rychlost tuhnutí a tvrdnutí betonu. Činitelé, které ovlivňují smršťování, jsou dále: dávka cementu, vodní součinitel, hutnost betonu. Pro oblasti s bludnými proudy je žádoucí zvýšit vodonepropustnost betonu, což se projeví ve zvýšení hodnoty jeho rezistivity (měrného elektrického odporu).

U betonu z portlandského cementu (při pevnosti v tlaku v rozsahu 16 až 40 MPa) je u suchého betonu pórovitost v rozmezí 20 až 14 %. Suchý beton je prakticky izolant ( $\rho_b = 2000 \Omega\text{m}$ ). Na druhé straně u podkladního betonu C 16/20 v kontaktu s vlhkým horninovým prostředím je  $\rho_b = 50$  až  $60 \Omega\text{m}$  [26].

Vodostavebný beton podle ČSN EN 206-1: XA2, C 30/37 v tl. 0,3 m s hydroizolační krystalickou přísadou (např. Xypex v množství 4 až 6 kg/m<sup>3</sup> betonové směsi), třídy V8, v kontaktu s vlhkým horninovým prostředím má rezistivitu minimálně  $\rho_b = 750 \Omega\text{m}$  (pro srovnání ocelová výztuž má  $\rho_o = 0,21 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ ). V daném případě je nutno zabezpečit dokonalé ztuhnutí betonové směsi použitím účinné vibrační techniky, např. ponorných vibrátorů.

## 6.4 METODY STANOVENÍ ELEKTRICKÉ REZISTIVITY BETONU

Jak bylo uvedeno v *odst.* 6.3 elektrická rezistivita má velkou vypovídající hodnotu o korozním stavu konstrukce i pro potenciální využití ochrany. U vybraných mostovek znečištěných chloridovými ionty v důsledku používání rozmrazovacích solí [27,28]. Hodnota rezistivity indikuje obsah vlhkosti v pórech, jejich velikost a druh a je silně ovlivněna kvalitou betonu, tj. obsahem cementu, vodním součinitelem ( $w/c$ ), technologií zpracování a obsahem



krystalizačních přísad. Zjišťování rezistivity lze provádět buď v laboratoři nebo na místě stavby.

## 6.4.1 Laboratorní metody

### 6.4.1.1 Metoda dvou elektrod

Elektrický odpor zkušební vzorku betonu (např. válce nebo krychle) se zjišťuje přiložením dvou elektrod ke koncům definovaných ploch vzorku. Elektrická rezistivita se spočítá se známého vztahu:

$$R = \rho L / S \Rightarrow \rho = R \cdot S / L \quad (\Omega m) \quad (24)$$

kde R – je elektrický odpor vzorku měřený ohmmetrem ( $\Omega$ )

S – příčná plocha měřeného vzorku ( $m^2$ )

L – délka vzorku (m)

Mezi elektrody a plochu betonového vzorku je třeba vložit textilní podložku navlhčenou vodou, nebo vodivý gel (viz *obr. 7*).

### 6.4.1.2 Metoda čtyř elektrod

Jedná se o obdobu Wennerovy metody v laboratorních podmínkách. Vnějšími dvěma elektrodami protéká proud a mezi dvěma vnitřními elektrodami je měřeno napětí.

### 6.4.1.3 Metoda použití transformátoru

Jedná se o metodu, která nevyžaduje přímý kontakt se vzorkem. Střídavý proud ve vzorku je detekován z cívky transformátoru.

## 6.4.2 Měření na místě stavby

V praxi se používají dvě metody a sice: metoda čtyřelektrodová a metoda dvou elektrod.

### 6.4.2.1 Metoda čtyřelektrodová (podle Wennera)

Při zapojení podle *obr. 8* a pro případ, že vzdálenosti A-M, M-N, N-B jsou stejné a tuto vzdálenost označíme a bude elektrická rezistivita:

$$\rho = 2\pi a U / I = 2\pi a R \quad (\Omega m) \quad (25)$$

kde a – vzdálenost elektrod (m)

U – napětí mezi elektrodami M-N ( $V$ )

I – velikost proudu mezi elektrodami A-B ( $A$ )

Obvykle hodnota U/I je měřena ohmmetrem (např. při použití střídavého napětí o frekvenci 135 Hz), takže měříme přímo elektrický odpor R ( $\Omega$ ).

V případě měřiče rezistivity podle *obr. 9* pro hodnotu a = 8 cm (měříme betonovou vrstvu do hloubky t = 6 až 8 cm) pro změřenou hodnotu R = 140  $\Omega$  vychází rezistivita:

$$\rho = 2\pi \cdot 0,08 \cdot 140 = 70 \Omega m$$

### 6.4.2.2 Metoda dvouelektrodová

Metoda spočívá v použití výztuže jako referenční elektrody (jako nízkohmického zemniče) a přenosné kovové elektrody ve tvaru kruhové desky o průměru  $D$  přiloženou k betonovému povrchu (přes vodivý gel). Ohmmetrem měříme elektrický odpor mezi deskovou elektrodou a ocelovou výztuží, Změřenou hodnotu  $R$  dosadíme do známého vzorce pro zemní odpor kruhové desky na povrchu země:

$$R = \rho / 2D \rightarrow \rho = R \cdot 2 \cdot D \quad [\Omega\text{m}; \Omega; \text{m}] \quad (26)$$

Např. pro desku o průměru  $D = 0,113 \text{ m}$  ( $S = 100 \text{ cm}^2$ ) a pro změřenou hodnotu  $R = 354 \Omega$  vychází

$$\rho = 354 \cdot 2 \cdot 0,113 = \underline{80 \Omega\text{m}}$$

### 6.4.3 Elektrická rezistivita jako kritérium koroze ocelové výztuže v betonu

Měření elektrické rezistivity je používáno jako jedno z důležitých kritérií korozního ohrožení ocelové výztuže betonu. S využitím podkladů [25,26,29,30] lze sestavit *tab. 1*.

*Tab. 1* Použití hodnot rezistivity betonu při určování možné koroze výztuže

Elektrická rezistivita betonu [ $\Omega\text{m}$ ]	Koroze
> 120	obvykle nevýznamná
50 – 120	pravděpodobná
< 50	téměř jistá

## 6.5 ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ REZISTIVITY BETONU A JEHO PERMEABILNÍ PÓROVITOSTI A PEVNOSTÍ V TLAKU NA KOROZNÍM PROSTŘEDÍ – PŘÍKLAD VÝPOČTU

Ke zjištění výše uvedených vztahů bylo využito zkušebních betonových krychlí podle *obr. 7*, které prioritně slouží pro stanovení pevnosti v tlaku podle [31]. Šetření bude demonstrováno na zkušebních krychlích, které byly poskytnuty firmou Feal Milan při výstavbě budovy tehdejšího Motokovu v r. 1976 [32]. Způsob měření v kanceláři je patrný z *obr. 7*.

### 6.5.1 Změřené hodnoty ohmmetrem

Elektrický odpor suchého vzorku uloženého v místnosti při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu 70 % po 50 dnech od vyrobení (mimo dobu 28 dní po dobu ošetřování) z cementu 32,5 II  $260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $w / c = 0,65$ :

$$R_s = 16\,000 \Omega$$

Elektrický odpor vzorku po třech dnech uložení ve vodovodní vodě (měřeno po 24 hodinách po vyjmutí vzorku z vody):

$$R_v = 400 \Omega$$

### 6.5.2 Hodnota elektrické rezistivity vody v pórech betonového vzorku

Podle laboratorních šetření provedených F. Hunkelerem a K. Holtzhauerem ve Švýcarsku [34,35] byly zjištěny hodnoty  $\rho_p = 10$  až  $20 \Omega\text{m}$  pro nové konstrukce a  $\rho_p = 20$  až  $30 \Omega\text{m}$

pro staré betonové konstrukce. Jestliže u dalších výpočtů použijeme hodnotu  $\rho_p = 10 \Omega m$ , vystihuje to situaci, že se jedná o zkušební krychle pro stanovení krychelné tlakové pevnosti betonu podle ČSN EN 206-1 (*odst. 5.5.1.1*) a dále, že bude stanovena hodnota minimální permeabilní pórovitosti vzorku betonu.

### 6.5.3 Výpočet permeabilní pórovitosti vzorku betonu

Platí vztah:  $R = \rho \cdot L / S$  ( $\Omega$ ;  $\Omega m$ ; m;  $m^2$ )

Z toho se spočítá plocha měřeného povrchu vzorku:  $S = \rho \cdot L / R$  ( $m^2$ )

Pro permeabilní pórovitost platí vztah:

kde  $n_p = (V_p / V_c) \cdot 100 = (S_p / S_c) \cdot 100$  (%;  $m^3$ ;  $m^2$ )  
 $V_p$  – objem pórů v betonovém vzorku ( $m^3$ )  
 $V_c$  – celkový objem zkušební krychle ( $m^3$ )  
 $S_p$  – povrch pórů ve stěně zkušební krychle (průměrná hodnota) ( $m^2$ )  
 $S_c$  – povrch stěny zkušební krychle ( $m^2$ ).

Dále platí vztah:

kde  $n_p = (V_{pt} / V_c) \cdot 100 = (\rho_p / \rho_t) \cdot 100$  (%;  $m^3$ ;  $m^2$ )  
 $V_{pt}$  – objem pórů nasycených vodou ( $m^3$ )  
 $V_t$  – objem části objemu krychle, jejíž póry jsou nasyceny vodou ( $m^3$ )  
 $\rho_p$  – rezistivita vody v pórech (10  $\Omega m$ )  
 $\rho_t$  – rezistivita betonového vzorku objemu  $V_t$  ( $\Omega m$ )

Pro elektrický odpor  $R_s = 16\,000 \Omega$ , hranu krychle  $a = 0,15$  m a rezistivitu

$\rho_p = 10 \Omega m$ : je průřez náhradního elektrolytického vodiče ve vzorku:

$$S_s = 10 \cdot 0,15 / 16\,000 = 9,375 \cdot 10^{-5} \quad (m^2)$$

Obdobně pro elektrický odpor vzorku  $R_v = 400 \Omega$  po vyjmutí z vody (s dostatečnou přesností) je tento průřez:

$$S_t = 10 \cdot 0,15 / 400 = 3,75 \cdot 10^{-3} \quad (m^2)$$

Jelikož elektrická konduktivita (rezistivita) betonu je způsobena pouze přítomností vody ve spojitých pórech, platí pro hodnotu pórovitosti u suchého vzorku:

$$n_{ps} = (S_{ps} / S_c) \cdot 100 = (S_s / a^2) \cdot 100 = (9,375 \cdot 10^{-5} / 0,15^2) \cdot 100 = 0,416 \%$$

Obdobně u části objemu krychle, jejíž póry jsou zaplněny vodou:

$$n_{pt} = (S_{pt} / a^2) \cdot 100 = (S_t / a^2) \cdot 100 = (3,75 \cdot 10^{-3} / 0,0225) \cdot 100 = 16,47 \%$$

### 6.5.4 Výpočet hloubky průniku vody do betonového vzorku

$$t = (a - a') / 2 \quad (m)$$

kde  $a$  – hrana zkušební betonové krychle ( $m$ )

$a'$  – hrana vnitřní části vzorku, která zůstala suchá po vyjmutí vzorku z vody (předpokládáme homogenní stav: tedy ve tvaru krychle).

$$a' = (a - 2t)^{1/3} \quad (m; m^3)$$

Objem pórů u suchého vzorku:

$$V_{ps} = (n_{ps} \cdot V_c) / 100 = (0,416 \cdot 0,15^3) / 100 = 1,404 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m}^3)$$

Objem pórů nasycených vodou:

$$V_{pt} = (n_{pt} \cdot V_c) / 100 = (16,67 \cdot 3,375 \cdot 10^{-3}) / 100 = 5,626125 \cdot 10^{-4} \quad (\text{m}^3)$$

Celkový objem pórů v betonovém vzorku:

$$V_{pc} = (V_{ps} + V_{pt}) = 1,404 \cdot 10^{-5} + 5,626125 \cdot 10^{-4} = 5,7666525 \cdot 10^{-4} \quad (\text{m}^3)$$

Pro další výpočet je nutno stanovit poměr celkového objemu zkušební krychle k celkovému objemu pórů ve vzorku:

$$K_1 = V_c / V_{pc} = 3,375 \cdot 10^{-3} / 5,7666525 \cdot 10^{-4} = 5,852615 \quad (-)$$

Spočítáme příslušný objem části krychle suché části a části nasycené vodou:

$$V_s = K_1 \cdot V_{ps} = 5,852615 \cdot 1,404 \cdot 10^{-5} = 8,217071 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m}^3)$$

$$V_t = K_1 \cdot V_{pt} = 5,852615 \cdot 5,626125 \cdot 10^{-4} = 3,2927543 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}^3)$$

$$\text{Kontrola:} \quad V_c = 3,375 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}^3)$$

Výpočet vnitřní hrany krychle (suché části):

$$a' = (8,217071 \cdot 10^{-5})^{1/3} = 0,434 \text{ m}$$

$$t = (0,15 - 0,0434) / 2 = 0,0533 \text{ m}$$

### Dílčí závěr:

Hloubka pronikání vody do betonové krychle  $t \geq 50 \text{ mm}$ , což je požadavek na správnou funkci (krytí) ochranného zemniče v betonovém obložení.

### 6.5.5 Výpočet elektrické rezistivity betonu

Pro suchý vzorek platí vztah:

$$\rho_s = R \cdot S / L = 16\,000 \cdot 0,15^2 / 0,15 = 2400 \, \Omega\text{m}$$

Pro část objemu krychle, jejíž póry jsou nasyceny vodou spočítáme hodnotu rezistivity z poměru:

$$\rho_s : \rho_t = V_t : V_s \rightarrow \rho_t = \rho_s \cdot V_s / V_t = 2\,400 \cdot 8,217071 \cdot 10^{-5} / 3,2927543 \cdot 10^{-3} = \underline{59,8 \, \Omega\text{m}}$$

### 6.5.6 Kontrola

Výpočet délky hrany náhradní krychle s obsahem vody v pórech:

$$a'' = (3,2927543 \cdot 10^{-3})^{1/3} = 0,14877 \text{ m}$$

Elektrický odpor této krychle:

$$R_t = \rho_t / a'' = 59,8 / 0,14877 = 402 \, \Omega$$

Elektrický odpor vnitřní suché krychle po ponoření vzorku do vody:

$$R_s = \rho_s / a' = 2400 / 0,0434 = 55\,300 \, \Omega$$

Kontrola elektrických odporů podle Kirchhoffova zákona:

$$1/R_v = 1/R_t + 1/R_s' \rightarrow \underline{R}_v = R_t + R_s' / (R_t + R_s') = 4,2 \cdot 55\,300 / (402 + 55\,300) = \underline{399\ \Omega}$$

### Poznámka:

Jedná se o dobrou shodu s měřenou hodnotou  $R_v = 400\ \Omega$

## 6.6 VYUŽITÍ ODVOZENÉ METODIKY PRO PRAKTICKÉ VYUŽITÍ

Při posuzování vlivu bludných proudů na podzemní železobetonové konstrukce byly zjišťovány i hodnoty elektrické rezistivity betonu i u dalších staveb např.: při výstavbě hotelu Forum (dnes Corinthia) [33], hotelu Těšnov (dnes Hilton) [36] a dalších staveb [44]. Výsledky byly zpracovány do *obr. 10*, který ukazuje závislost elektrické rezistivity betonu na permeabilní pórovitosti a na korozním prostředí (betonový vzorek vystavený působení vody až po vysušený vzorek při teplotě 110 °C). U krajních hodnot grafu, tj. rezistivity vody v pórech a maximální rezistivity vysušeného vzorku byly využity výsledky zkoumání švýcarských odborníků [34,35]. U *obr. 11* byly využity především hodnoty ze šetření podle [32,33,36]. Vztah mezi pevností betonu v tlaku, elektrickou rezistivitou a permeabilní pórovostí se týká betonových konstrukcí uložených v zemi a budou upřesněny při dohodnuté spolupráci se s.r.o. TPG Metrostav, Praha 8. Týká se to zejména betonu použitého u mostovky Trojského mostu, kde pevnost v tlaku byla 80 MPa (podle *obr. 10* tomu odpovídá  $\rho_b = 2000\ \Omega\text{m}$  při  $n_p = 0,14\ \%$ ).

Podle [37] je vyráběn beton s velmi vysokou pevností a odolností válcovou pevností přes 150 MPa a krychelnou pevností přes 180 MPa. Extrapolací v *obr. 10* tomu odpovídá  $\rho_b > 10^5\ \Omega\text{m}$  při  $n_p < 0,01\ \%$ , což je ekvivalentní elektrické rezistivitě neztvrdlého čediče. Beton má životnost přes 200 let a používá se na extrémně staticky a dynamicky namáhané prvky, na tenkostěnné konstrukce a za účelem snížení hmotnosti nebo ochranné vrstvy běžných betonů umístěných v náročných klimatických podmínkách.

Při sestrování grafů podle *obr. 10* a *obr. 11* bylo též využito poznatků podle [38]. Při použití Wennerovy metody podle *odst. 6.4.2.1* na stavbě paláce Těšnov v Karlíně byla zjišťována hodnota elektrické rezistivity betonu od doby betonáže po dobu jednoho roku. Z grafů vyplývá, že původně vysoké hodnoty rezistivity ( $\rho_b = 380\ \Omega\text{m}$ , resp.  $\rho_b = 750\ \Omega\text{m}$ ) se ustálily po 4 měsících na prakticky konstantní hodnotě ( $\rho_b = 100\ \Omega\text{m}$  pro podkladní beton a  $\rho_b = 350\ \Omega\text{m}$  pro konstrukční beton s krystalizační přísadou. Bližší specifikace betonu není uvedena.

## 7 PŘÍKLAD POUŽITÍ SVAŘOVANÉ VÝZTUŽE V BETONU

### 7.1 ÚVODEM

Různé způsoby provedení uzemňovacích soustav v prostředí působení bludných proudů byly analyzovány v r. 2003 [18]. Bylo ukázáno, že zemniče na bázi pozinkovaného pásu FeZn, na bázi mědi i chromniklové oceli jsou pro toto prostředí nevhodná, zejména z hlediska trvanlivosti. V podmínkách působení bludných proudů vychází jako nejvýhodnější použití betonářské oceli nebo ocelového pásu v betonovém obložení C 16/20. Dosahovaná životnost je  $\tau = 50$  i více let z důvodů popsaných výše, podle způsobu provedení. Také z hlediska výše pořizovacích nákladů je toto řešení nejvýhodnější. Nejlépe vychází obvodový zemnič za použití pásové oceli např. 60/5 mm v betonovém obložení C 16/20 v hloubce 1 m.

Pro ilustraci této koncepce uzemňování je dále uveden příklad praktické aplikace a sice ve dvou variantách tzv. základového zemniče v případech, kdy obvodový zemnič nelze použít.

První varianta předpokládá umístit ocelovou výztuž v modifikaci rohoží z kari sítě 8/150/150 mm, v podkladním betonu zde lze s výhodou uplatnit odporové svařování v dílně, čímž se snižuje počet svarů provedených na stavbě o 95 % (k zajištění elektrické spojitosti ocelových prvků v betonu).

Druhá varianta uvažuje jako základový zemnič použít výztuž základové desky bez ohledu na to, že se jedná o vodostavebný beton. I při částečném svařování výztuže by bylo nutno provést na stavbě 16 000 svarů, což je z hlediska zhotovitele velmi obtížné a drahé.

## 7.2 UZEMŇOVACÍ SOUSTAVA VYTVOŘENÁ Z OCELOVÝCH SÍTÍ V PODKLADNÍM BETONU [39]

### 7.2.1 Výpočet zemního odporu uzemnění

Pro výpočet zemního odporu se použije průměrná hodnota rezistivity horninového prostředí  $\rho = 80 \Omega\text{m}$ . K výpočtu vlivu bludných proudů na uzemňovací soustavu bude využita hodnota intenzity elektrického pole  $E = 5,0 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Výpočet životnosti uzemnění jednotlivých objektů bude spočítán podle příslušné hmotnosti, jak vyplývá z celkových ploch:

$$G = S \cdot 5,73 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} \text{ (kg; m}^2\text{)}.$$

$$S = 901 \text{ m}^2$$

$$D = (4 S / \pi)^{0,5} = (4 \cdot 901 / \pi)^{0,5} = 33,9 \text{ m}$$

**Zemní odpor** kruhové desky na povrchu země (což odpovídá uložení pod prakticky elektricky nevodivou konstrukcí (bílá vana), pod základovou deskou  $\alpha = 1,0$ ; ve velké hloubce je  $\alpha = 0,5$ . V hloubce  $h = 2 \text{ m}$  je  $\alpha = 0,98$ .

$$\underline{R_z} = \alpha \rho / 2 D = 0,98 \cdot 80 / 2 \cdot 33,9 = \underline{1,16 \Omega}$$

**Návrh vyhovuje:  $R_z < 2,0 \Omega$ .**

### 7.2.2 Výpočet vlivu bludných proudů podle výsledků korozního průzkumu

Obvod zemniče  $L = 180 \text{ m}$ . Koeficient šíření bludných proudů galvanickou cestou  $x = 5,0$ ;  $L' = 5 \cdot 180 = 900 \text{ m}$ .

$$\rho = 80 \Omega\text{m}; E = 5,0 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$$

$$\underline{I} = E \cdot L' / 2 \cdot R_z = 5,0 \cdot 900 / 2 \cdot 1,16 = 1939 \text{ mA} = \underline{2,0 \text{ A}}$$

### 7.2.3 Výpočet životnosti uzemnění

$$S = 901 \text{ m}^2; G = 901 \cdot 5,73 = 5162 \text{ kg}$$

Pokud by uzemnění bylo uloženo v zemi (bez betonového obložení) došlo by za rok ke koroznímu úbytku celkem:

$$K = I \cdot m = 2,0 \cdot 9,3 \text{ kg}\cdot\text{A}^{-1} = 18,6 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$$

kde  $m$  je korozní úbytek oceli v zemi podle Faradayova zákona.

Při uložení ocelové sítě do betonového obložení (min. pevnost tlaku 20 MPa) se rychlost koroze sníží min. 2x. Při požadavku životnosti uzemnění 80 let (při nezměněných provozních parametrech  $R < 2,0 \Omega$ ) návrh vyhovuje, což lze doložit kontrolním výpočtem:

$$K' = \varnothing I_1 \cdot m' = 2 \cdot 9,3 / 2 = 9,3 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$$

Při využitelnosti uzemňovací soustavy  $\eta = 0,2$  by byla životnost:

$$\tau = G \cdot \eta / K' = 5162 \cdot 0,2 / 9,3 = \underline{111 \text{ roků}}$$

Při uložení v půdě by byla životnost pouze:

$$\tau = G \cdot \eta / K = 5162 \cdot 0,2 / 9,3 = \underline{55 \text{ roků}}$$

#### 7.2.4 Závěr

Uzemnění vyhovuje jak z hlediska hodnoty  $R_z \leq 2 \Omega$  zemního odporu, tak požadované doby životnosti  $\tau' > 80$  roků.

### 7.3 OCHRANNÉ UZEMNĚNÍ S VYUŽITÍM VÝZTUŽE V ZÁKLADOVÉ DESCE [40]

#### 7.3.1 Koncepce ochranného uzemnění

Navrhuje se elektronické spojení („provaření“) u horní a u dolní výztuže v základové desce u vybraných prutů, případně doplnění svařením příčné (distanční) výztuže:

Cílem provaření je vytvořit společnou plochu výztuže uvedenou na jeden potenciál – tj. propojení vodičů I. třídy (propojení kovových vodičů), které budou schopny na velké ploše distribuovat a přijímat bludný proud bez porušení pasivačních vrstev, protože hustota bludných proudů bude minimální. Provaření bude provedeno do úrovně  $\pm 0,0$  (do úrovně terénu [40]).

Spodní stavba je navržena jako „bílá vana“. Nová stavba bude vybavena zemnicí soustavou využívající základové zemniče – provaření výztuže v základové desce stavby.

Zemnicí soustavu bude tvořit vybraná provařená výztuž. Žádné strojené zemniče – pod deskou ani obvodové zemniče mimo stavbu **nesmí být navrhovány**.

V místě vývodu budou čtyři pruty vzájemně svařeny, pruty budou označeny sprejem. Kvalitu zemnicí soustavy je nutno ověřit měřeními.

Na základě měření vlivu bludných proudů po dokončení stavby bude rozhodnuto, zda budou dodatečně doplňována ochranná opatření, či nikoli, tj. aktivní ochrana proti účinkům bludných proudů.

Pro stavbu je stanoven stupeň ochranných opatření dle TP 124 č. 4, [41], tj. „sací“ efekt stavby  $K_5 = 5$ . Výsledná proudová hustota:  $J = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 1680 \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Propojení zemnicích soustav PRE Di a staveb se předpokládá v přípojkové skříní (v jednom bodě).

#### 7.3.2 Komentář ke koncepci a k obr. 14

Návrh částečně elektronicky propojit výztuž v podzemní železobetonové konstrukci jako „způsob řešení pasivní ochrany železobetonových konstrukcí“ [35] proti účinkům bludných proudů svědčí o nepochopení způsobu šíření stejnosměrných bludných proudů zemí a úložnými kovovými a železobetonovými konstrukcemi.

Jestliže v daném území se vyskytují zdroje bludných proudů v obvodu: napájecí stanice (měničnice) – trolej – elektrický vlak – koleje – měničnice a vedle toho paralelní cesta zemí: elektrický vlak – koleje – země – koleje – měničnice, nemůžeme tyto elektrické obvody zásadně změnit novou výstavbou lokálních stavebních objektů (bytové domy, kanceláře apod.).

Úkolem projektanta je volit takové postupy, aby bludný proud tekla zemí a aby navrhovaný stavební objekt se nestal vodičem uloženým v zemi, kterým bludný proud protéká. U železobetonových konstrukcí se tudíž vyžaduje, aby byly voleny klasické způsoby spojování výztuže (přesahem, vázacím drátem), takže z těchto konstrukcí se nestanou vodiče bludných proudů.

Jiná je otázka uzemňovacích soustav, které jsou elektronicky (přes nulové vodiče a Cu-stínění kabelů VN u trafostanic) propojeny s uzemněními v okolí až do vzdálenosti 1 km. Je proto žádoucí elektricky oddělit uzemnění od nosných železobetonových konstrukcí a navrhovat buď obvodové zemniče v betonovém obložení nebo uzemnění v podkladním betonu tak, aby byla garantována funkčnost (např. zemní odpor  $R_z < 2,0 \Omega$ ) po celou dobu plánované životnosti objektu (např. 50 nebo 80 let).

Rozsáhlejší provažování výztuže vede ke zvýšení šíření bludných proudů a ke zhoršení korozní situace v lokalitě.

Ze strany projektanta došlo k opomenutí skutečnosti, že podkladový beton C 16/20 má po uložení v půdě rezistivitu 50 až 60  $\Omega\text{m}$ , zatímco vodostavebný beton C30/37 s krystalizačními přísadami má rezistivitu 3000  $\Omega\text{m}$ , tedy téměř o dva řády vyšší. Při velmi nízké permeabilní pórovitosti betonu podle obr. 10 ( $n_p = 0,34 \%$ ) a tedy zanedbatelném obsahu vody v pórech (při přípustném průniku vody do konstrukce v tl. 20 až 40 mm) se jedná prakticky o izolant. Z toho vyplývá, že svařená ocelová výztuž v betonu bude mít větší zemní odpor než požadovaných  $\max R_z = 2 \Omega$ , což je dále doloženo výpočtem. Jinými slovy: jedná se o chybný návrh uzemňovací soustavy.

Dále z [40] vyplývá, že je porušena zásada, že nesmí být zavlékány bludné proudy do objektu. Navrhované „uzemnění“ bude dále přes nulový vodič přípojky NN 2x AYKY 3x185+96 mm<sup>2</sup> propojeno s uzemněním trafa a tím i dalšími uzemňovacími soustavami, v okolí, což může vést k rušení elektronických zařízení v objektu, jelikož na SS bludný proud jsou superponovány harmonické kmitočty 100 Hz a další frekvence – jedná se o tzv. elektromagnetickou interferenci.

Citovaný předpis TP 124 se týká nadzemních betonových konstrukcí vystavených zejména agresivnímu působení atmosféry, jak vyplývá již ze samotného názvu (mostní objekty a pozemní komunikace) a nemůže být závazný na území ČR ve smyslu ČSN EN 50162 (!) a už vůbec ne pro **podzemní** železobetonové konstrukce.

V tomto předpisu stanovená kritéria nejsou technicky zdůvodnitelná. „Sací“ efekt

$K_s = 5$  pro hustotu proudu v zemi vede k tomu, že intenzita elektrického pole

$\varnothing E = 101 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$  (pro  $J = 1680 \mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$  a  $\rho = 60 \Omega\text{m}$ ) je nedosažitelná ani ve vzdálenosti 3-5 m od ss elektrizovaných kolejí (tato hodnota je max.  $E = 40 - 50 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Zmíněné kritérium je tudíž chybné.

### 7.3.3 Kontrolní výpočty

#### 7.3.3.1 Vyhodnocení podkladů

Podle sdělení a.s. Pragis bude základová deska převážně v tl. 0,6 m provedena z vodostavebního betonu C 30/37, XA1 s přísadou XYPEX (cca 10 kg/m<sup>3</sup>) proti smršťovacím



trhlinám do 0,35 mm. Celkový objem betonu 657 m<sup>3</sup>. Bude použita výztuž vázaná z oceli 10505 (R) R16 (horní a dolní výztuž), Ø 10 mm pro distanční výztuž. Celková hmotnost výztuže: 81 tun.

Přepoččet na m<sup>3</sup>: 81000 / 657 = 123,3 kg/m<sup>3</sup>.

Podkladní beton v tl. 0,15 m bude z betonu C 16/20 v celkovém objemu 166,3 m<sup>3</sup>,

S = 1100 m<sup>2</sup>. Navržené Kari sítě 150/150/8 mm při zpevnění podkl. betonu (nesvařené!) o hmotnosti 6,58 tun, tj. 6580 / 166,3 = 39,6 kg/m<sup>3</sup>, tj. 6580 / 1100 = 6,0 kg/m<sup>2</sup>.

### 7.3.3.2 Výchozí údaje

Celková plocha základové desky S<sub>D</sub> = 1100 m<sup>2</sup>

Počet svarů ocelové výztuže podle [40] 16 000 ks, tj. 15 svarů na m<sup>2</sup> desky.

Při hmotnosti R16: 1,58 kg.m<sup>-1</sup> a při celkové hmotnosti oceli v základové desce

G = 81000 kg vychází celková délka této výztuže L<sub>V</sub> = 81000 / 1,58 = 51265 m.

Přepočteno na povrch výztuže

$$S_V = \pi \cdot 0,016 \cdot 51265 = \underline{2577 \text{ m}^2}$$

Přepoččet hmotnosti výztuže na tloušťku desky:

$$\underline{t} = G / (S_D \cdot 7850) = 81000 / (1100 \cdot 7850) = \underline{9,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

Podíl výztuže R 16 na celkové hmotnosti je cca 93 %, zbytek 7 % je distanční výztuž Ø 10 mm.

Počet všech křížení a přesahů výztuže:

$$n = 140 \text{ ks/m}^3$$

$$n' = 55 \text{ ks/m}^2$$

Přepočteno na plochu S<sub>D</sub> = 1100 m<sup>2</sup> je to  $\underline{n_D} = 1100 \cdot 55 = \underline{60\,500 \text{ ks}}$

Počet navrhovaných svarů výztuže podle [40] n<sub>S</sub> = 16 000 ks.

Poměr svařených kontaktů ku celkovému počtu kontaktů:

$$\underline{k} = n_S / n_D = 16000 / 60500 = \underline{0,264}$$

Podle *odst.* 7.3.3.2 z poměru k = 0,264 vyplývá, že teoretická provařenost výztuže

$$P = 0,264 \cdot 100 = 26,4 \text{ \%}.$$

Podle vztahu č. 7 je reálná provařenost všech částí výztuže:

$$\underline{P'} = P^3 / 100^2 = 26,4^3 / 100^2 = 1,84 \sim \underline{2,0 \text{ \%}}$$

To prakticky znamená, že z celkové plochy povrchu výztuže  $S_V = 2577 \text{ m}^2$  se efektivně uplatňuje  $P' = 2,0 \%$ , tj.

$$\underline{S_{V'}} = 2577 \cdot 2 / 100 = \mathbf{51,5 \text{ m}^2}$$

Vzhledem k tomu, že se jedná o plošné uspořádání konstrukce a dále, že přechodový odpor kontaktů dvou suchých povrchů s okujeným povrchem je průměrně  $R_K = 3000 \Omega$ , je třeba připočítat plochu, která funguje jako zemnič pro výboje a zkratový proud, kdy vedle svařených prutů se uplatňuje i proudová cesta přes přechodové odpory  $R_K$ . Pro daný případ možno uvažovat pouze s dolní výztuží vytvořenou pruty R 16.

Redukovaný počet křížení (spojení přesahem a vázacím drátem) podle *odst. 7.3.3.2*.

$$n_o' = 60\,500 \cdot 0,93 \cdot 0,5 = 28\,130 \text{ ks}$$

Při pravděpodobnosti úplného dotyku  $\eta = 30 \%$  bude počet efektivních kontaktů

$$n_e = 28\,130 \cdot 0,3 = 8439 \text{ ks}$$

Z celkové plochy výztuže  $S_V = 2577 \text{ m}^2$  se uplatní plocha

$$\underline{S_{V''}} = (8439 / 60500) \cdot 2577 = \underline{359,5 \text{ m}^2}$$

#### **Poznámka:**

Ohmický odpor při činiteli stínění 0,5 bude pro toto uspořádání:

$$R_K = 3000 / (8439 \cdot 0,5) = 0,71 \Omega$$

Celková efektivní plocha výztuže jako zemniče:

$$S_{ve} = 51,5 + 359,5 = 411 \text{ m}^2$$

#### **7.3.3.3 Výpočet zemního odporu základové desky při částečně svařené výztuži ve vodostavebném betonu**

Podle [2] platí pro zemní odpor zemniče ve tvaru kruhové desky v betonovém obložení vztah:

$$R_Z = \rho_Z / 2 D_S + (\rho_b / \rho_Z) [\ln (D_S / D_o)] \quad (\Omega\text{m}; \text{m})$$

$$\rho_Z = 80 \Omega\text{m}$$

$$\rho_b = 3000 \Omega\text{m}$$

Pro  $S_D = 1100 \text{ m}^2$  je  $D_S = (1100 \cdot 4 / \pi)^{0,5} = 37,4 \text{ m}$

Podle *odst. 7.3.3.2* je  $S_{ve} = 411 \text{ m}^2$  z toho  $D_o = (411 \cdot 4 / \pi)^{0,5} = 22,9 \text{ m}$

$$\underline{R_Z} = 80 / (2 \cdot 37,4) + (3000 / 80) \cdot [\ln (37,4 / 22,9)] = 1,0695 + 37,5 \cdot \ln 1,6332 =$$

$$1,0695 + 19,395 = 19,46 \Omega \sim 20,0 \Omega$$

### 7.3.4 Dílčí závěr

„Základový zemnič“ navržený podle PD [40] by měl minimálně zemní odpor  $R_Z = 20 \Omega$ , což je 10x více než je požadováno ( $R_Z < 2,0 \Omega$ ). Pokud by byla částečně provařená výztuž uložena v betonu C 16/20, s hodnotou permeabilní pórovitostí podle *obr. 11*.

$n_p = 16 - 17 \%$  a elektrickou rezistivitou v zemi  $\rho_Z = 60 \Omega\text{m}$ , tento zemnič by měl vyhovující parametry což ovšem ze stavebně-konstrukčního hlediska není možné.

Jelikož vodostavebný beton má pórovitost  $n_p = 0,3$  až  $0,4 \%$  a elektrickou rezistivitu

$\rho_b = 3000$  až  $5000 \Omega\text{m}$ , navržené uspořádání jako uzemnění fungovat nemůže, jak bylo doloženo výpočtem.

Návrh je v rozporu i s [42].

#### Poznámka:

V betonovém obložení místo korozivzdorné oceli V 4A, 30/4 mm materiál 1.4571 postačí pás z uhlíkové oceli 60/5 mm.

Při atmosférickém a jiném přepětí (zkratové proudy) by přes NN kabely (pokud by nedošlo k jejich poškození) přešel proud do okolních uzemnění, především trať, což je nepřijatelné.

## 8 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

### 8.1 VŠEOBECNĚ

Návrhy a postupy vedoucí k omezení šíření bludných proudů úložnými konstrukcemi a ke snížení korozních dopadů spočívají principiálně ve snížení části zpětného trakčního proudu v obvodu: trolej – elektrický vlak – koleje – země – koleje – měnič – trolej, což však není v kompetenci provozovatelů úložných, zejména liniových, konstrukcí. Pokud však již zpětný proud protéká elektrolytickou (iontovou) proudovou cestou (zemí) je třeba učinit opatření, aby tento bludný proud na své cestě k měnič (při kladné polaritě troleje) pokud možno nevyužíval úložné konstrukce jako paralelní proudovou cestu k zemi. To je možno docílit těmito způsoby: primární ochranou konstrukce, sekundární ochranou (izolací) a konstrukčními opatřeními.

### 8.2 PRIMÁRNÍ OCHRANA

Spočívá ve zvýšení odolnosti betonu proti agresivitě prostředí (mj. ve zvýšení jeho elektrické rezistivity nejméně o jeden řád) úpravou jeho složení a struktury před zhotovením konstrukce nebo v průběhu betonáže (např. použití vodostavebného betonu).

### 8.3 SEKUNDÁRNÍ OCHRANA

Je založena na omezení nebo vyloučení působení agresivního prostředí i bludných proudů na železobetonovou konstrukci aplikací vodonepropustných a elektricky izolačních materiálů za účelem zvýšení přechodového odporu na rozhraní beton – země až o několik řádů.

### 8.4 KONSTRUKČNÍ OPATŘENÍ

Jedná se především o omezení elektricky spojitých konstrukcí, které umožňují šíření bludných proudů. Prakticky to znamená vyloučit svařovanou výztuž u všech železobetonových

konstrukcí až na případy dané statickými a konstrukčními důvody (např. kari sítě při vnějším ostění tunelů), v případě plánovaného použití katodické ochrany železobetonových mostovek a při použití ocelové výztuže pro účely uzemňování (u svařené kari sítě v podkladním betonu).

Jestliže je navrženo třeba i částečné svaření výztuže jako metoda ochrany proti bludným proudům, dosáhne se tím pravého opaku. U liniových úložných konstrukcí v důsledku nižšího podélného odporu železobetonová konstrukce sbírá více proudu z okolního elektrického pole, takže konstrukcí protéká více bludného proudu s možnými nepříznivými korozními důsledky.

## 8.5 MĚŘICÍ VÝVODY U LINIOVÝCH STAVEB

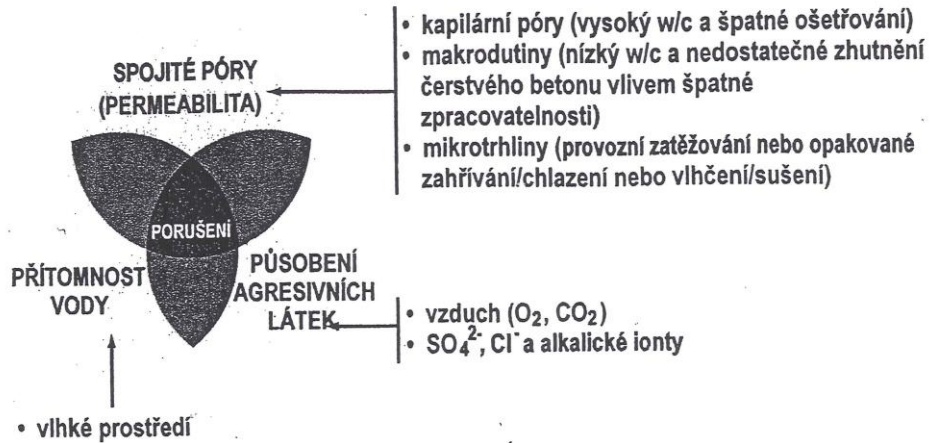
Měřicí vývody zřizované u konstrukcí s výztuží spojovanou přesahem, vázacím drátem nebo i u úseků s částečně svařenou výztuží nemají technický význam a prodražují stavbu. Změřené elektrické hodnoty (v mikrovoltech a v mikroampérech) mají nulovou vypovídací hodnotu. Vlastní periodická měření (v tunelech, kolektorech) nepřináší efekt příslušným organizacím, výsledky měření (často registrační s dálkovým přenosem) nelze jakkoliv smysluplně a ekonomicky využít při provozování a údržbě železobetonové především liniové konstrukce.

## 8.6 VYUŽITÍ VÝZTUŽE PRO ÚČELY UZEMŇOVACÍ

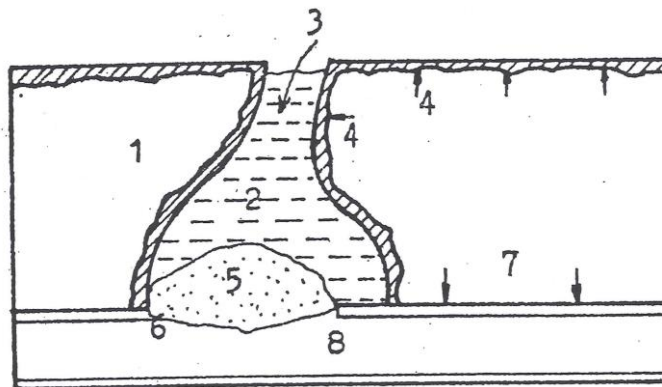
Při návrhu ochranného uzemnění je třeba dávat přednost zemničům vytvořeným za definovaných podmínek v provedení podle podmínek stavby (obvodový zemnič – ocelový pás v betonovém obložení, ocelové rohože – kari sítě např. 8/150/150 v podkladním betonu, oddělená od základové železobetonové desky). Výjimečně lze použít výztuž jako náhodný zemnič (např. u pilot nebo výztuž v tunelu). Je třeba mít na paměti, a že zemní odpor jedné piloty je kolem  $1 \Omega$  a že není žádoucí, aby zemní odpor uzemnění stavby byl nižší než nezbytných  $R_Z = 1 \Omega$  z důvodů omezení šíření bludných proudů. V zastavěných oblastech jsou uzemňovací soustavy mezi sebou galvanicky propojeny nulovými vodiči přípojek NN přes trafo nebo i potrubími horkovodů přes výměňkové stanice, takže se zhoršuje korozní situace v celé oblasti v okruhu 1 km i více.

## 9 OBRÁZKY KE KAPITOLÁM 1–8

### PORUŠENÍ VYZTUŽENÉ BETONOVÉ KONSTRUKCE



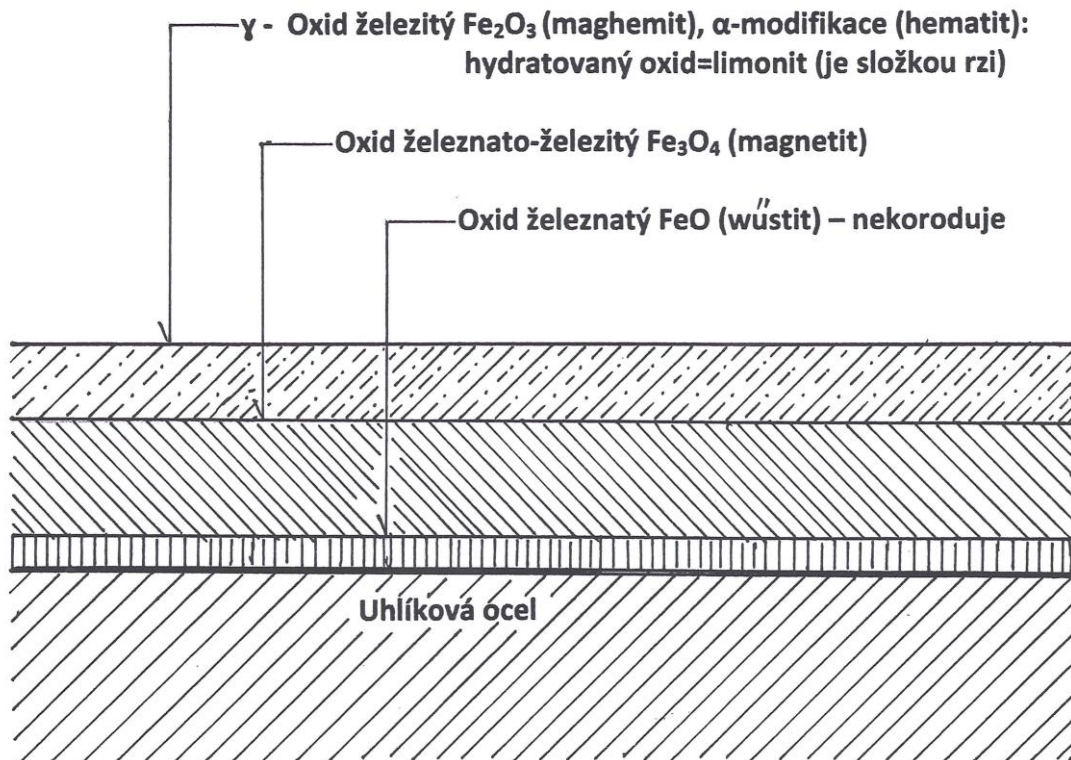
Obr. 1 Ternární znázornění poškození vyztužených betonových konstrukcí



#### LEGENDA:

- 1 - Betonové krytí
- 2 - Elektrolyt pH ≤ 11,5
- 3 - Přístup vzduchu: O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>
- 4 - Přeměna betonu se sníženým pH ≤ 11,5
- 5 - Vytvořená rez: 2 FeO(OH) + H<sub>2</sub>O
- 6 - Anodická plocha o malém povrchu: pH ≤ 11,5; Fe → Fe<sup>2+</sup> + 2e
- 7 - Katodická plocha o velkém povrchu: pasivační vrstva při 11,5 ≤ pH ≤ 13,8:  
2e + ½ O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → OH<sup>-</sup>
- 8 - Ocelová výztuž

Obr. 2 Mechanismus koroze výztuže v trhlinách betonu

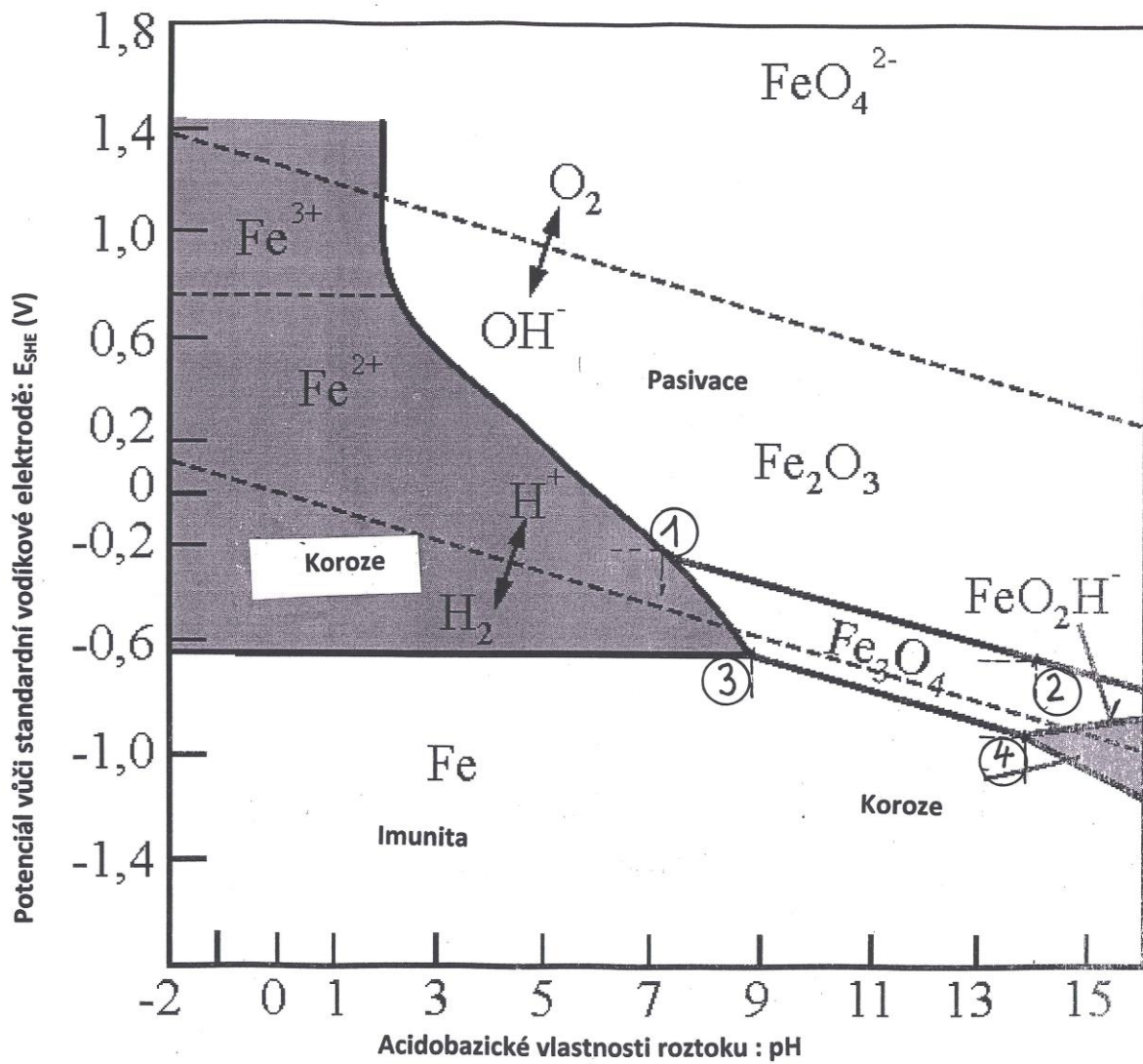


$\text{Fe}_2\text{O}_3$  :  $- E_{\text{SHE}} = +0,216 - 0,0562 \text{ pH}$  (V; -)  
 Platnost v intervalu  $\text{pH} = 7,3$  až  $14,00$

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  :  $- E_{\text{SHE}} = -0,098 - 0,0562 \text{ pH}$  (V; -)  
 Platnost v intervalu  $\text{pH} = 9,0$  až  $13,8$

$$E_{\text{CSE}} = E_{\text{SHE}} - 0,316 \text{ V}$$

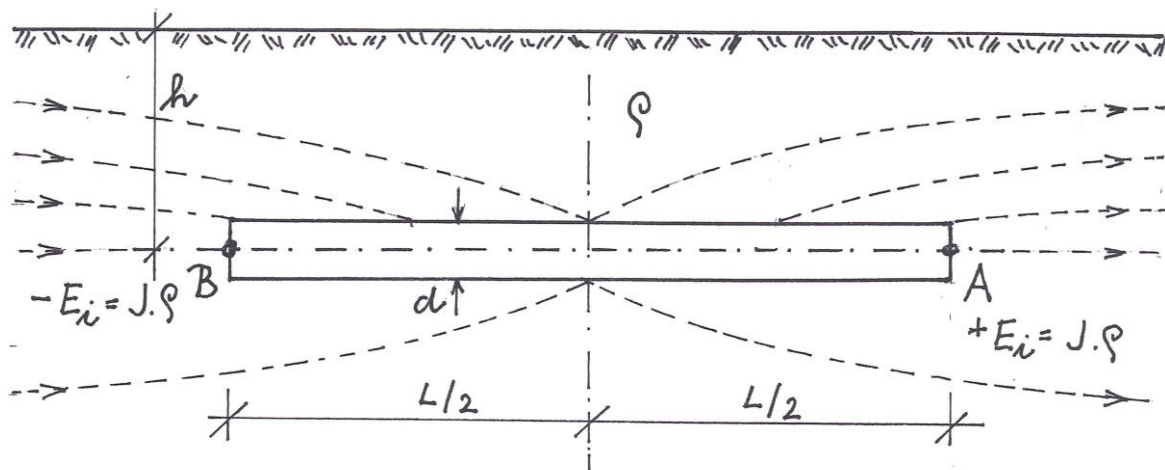
Obr. 3 Ochranný pasivační povlak sestávající ze tří vrstev oxidů železa vytvořených samovolnou (atmosférickou) korozi na ocelové výztuži betonu



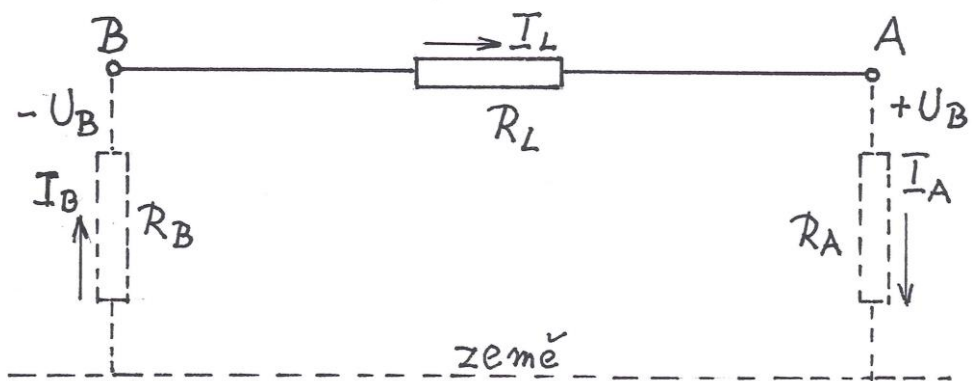
**Legenda:**

1: Pro pH = 7,3	je	$E_{SHE} = - 0,19 \text{ V}$	$(E_{CSE} = - 0,51 \text{ V})$
2: Pro pH = 14,0	je	$E_{SHE} = - 0,57 \text{ V}$	$(E_{CSE} = - 0,87 \text{ V})$
3: Pro pH = 9,0	je	$E_{SHE} = - 0,60 \text{ V}$	$(E_{CSE} = - 0,92 \text{ V})$
4: Pro pH = 13,8	je	$E_{SHE} = - 0,87 \text{ V}$	$(E_{CSE} = - 1,19 \text{ V})$

Obr. 4 Závislost termodynamické stability maghemitu ( $Fe_2O_3$ ) magnetitu ( $Fe_3O_4$ ) na pH roztoku a elektrodovém potenciálu  $E_{SHE}$



a) Uložení konstrukce v zemi, uspořádání proudnic v elektrickém poli



b) Elektrické schéma konstrukce

Obr. 5 Neliniová železobetonová konstrukce uložená v zemi v homogenním poli bludných proudů



$$I = I_A = I_B = I_L = (-U_B + U_A) / R_e \quad (A; V; \Omega)$$

$$R_e = R_B + R_L + R_A \quad \text{Pro: } R_B = R_A \rightarrow R_e = R_L + 2R_A$$

Pro náhradní průměr konstrukce  $d$  v hloubce  $h$  a délce  $L$  (tj. vzdálenosti mezi dvěma pracovními respektive dilatačními spárami) na konci nelineové konstrukce v bodě  $A$  vznikne napětí:

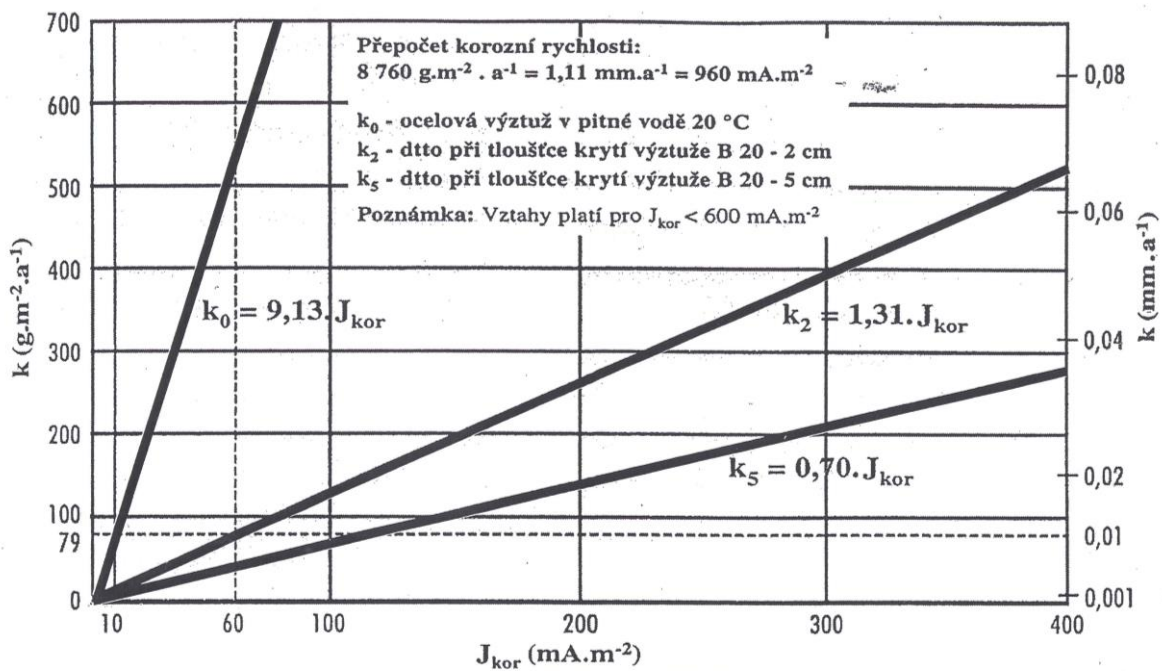
$$-U_B + U_A = U = L \cdot E_i = L \cdot \rho \cdot J \quad (V; m; V \cdot m^{-1}; \Omega m; A \cdot m^{-2})$$

Odpor  $R_A$  nahradíme zemním odporem konstrukce  $R_Z$  :

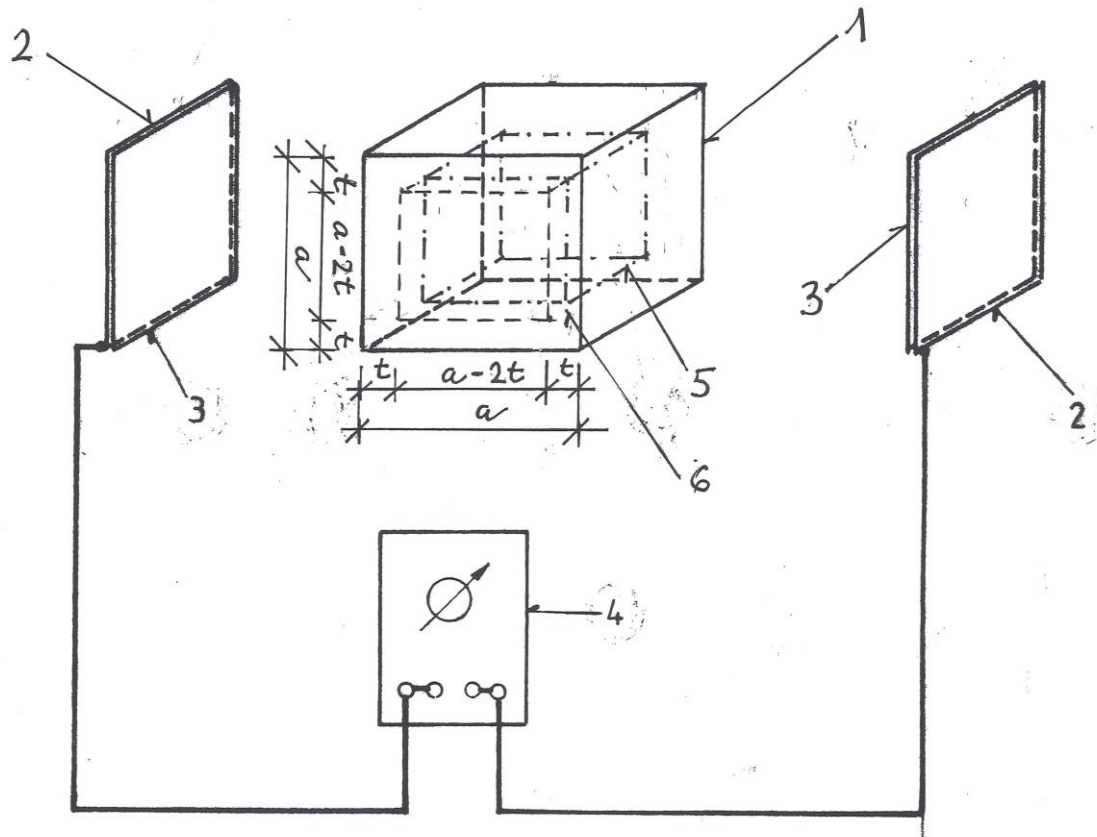
$$R_Z = (\rho / 2\pi L) \cdot \ln(L^2 / dh) \quad (\Omega; \Omega m; m)$$

Proud v konstrukci bude:

$$I = L \cdot E_i / R_e = L \cdot E_i / (R_L + 2 R_Z) \quad (A; m; V \cdot m^{-1}; \Omega)$$



Obr. 6 Rychlost koroze ocelové výztuže v betonu třídy C 16/20 v závislosti na anodické proudové hustotě na povrchu prutů



#### LEGENDA:

- 1 - Zkušební krychle o hraně  $a = 150$  mm pro zjišťování pevnosti v tlaku betonu
- 2 - Měděný plech 155/155/1 mm
- 3 - Elektrolytický kontakt (textilní podložka tl. 3 mm navlhčená vodou)
- 4 - Měřič elektrického odporu
- 5 - Suchá část beton.krychle o hraně:  $a - 2t$  (mm)
- 6 - Hloubka průniku (průsaku) vody:  $t$  (mm)

Celkový objem zkušební krychle podle Obr.

$$V_c = a^3 = 0,15^3 = 3,375 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$$

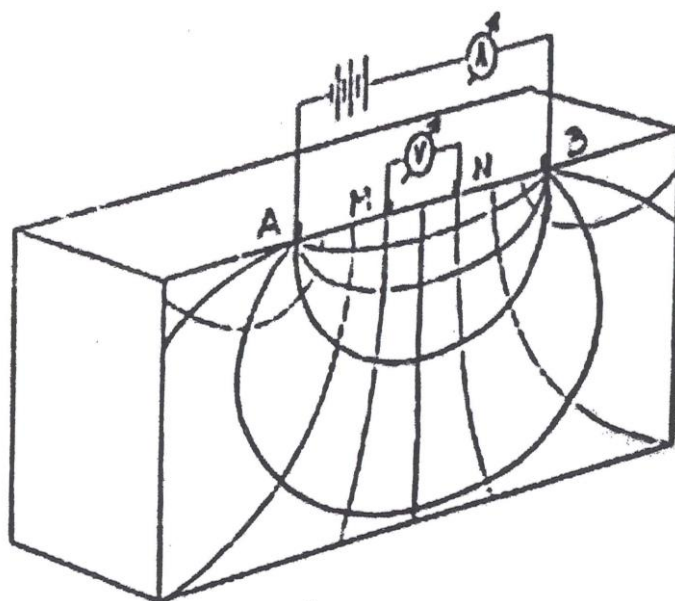
Část objemu krychle v suchém stavu:

$$V_s = (a - 2t)^3 \text{ (m}^3\text{)}$$

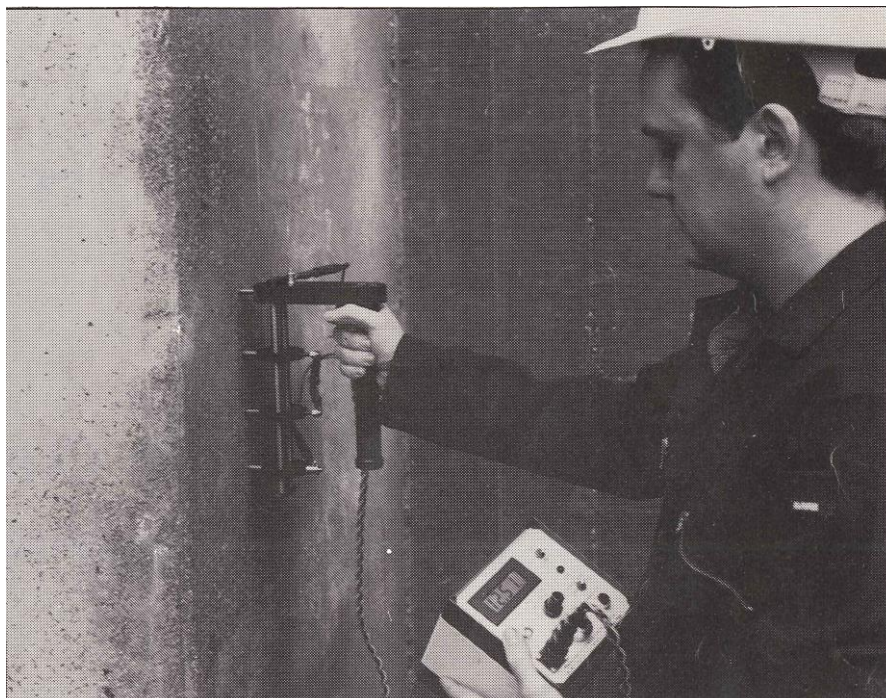
Část objemu krychle, jejíž póry jsou nasyceny vodou:

$$V_t = V_c - V_s = a^3 - (a - 2t)^3 \text{ (m}^3\text{)}$$

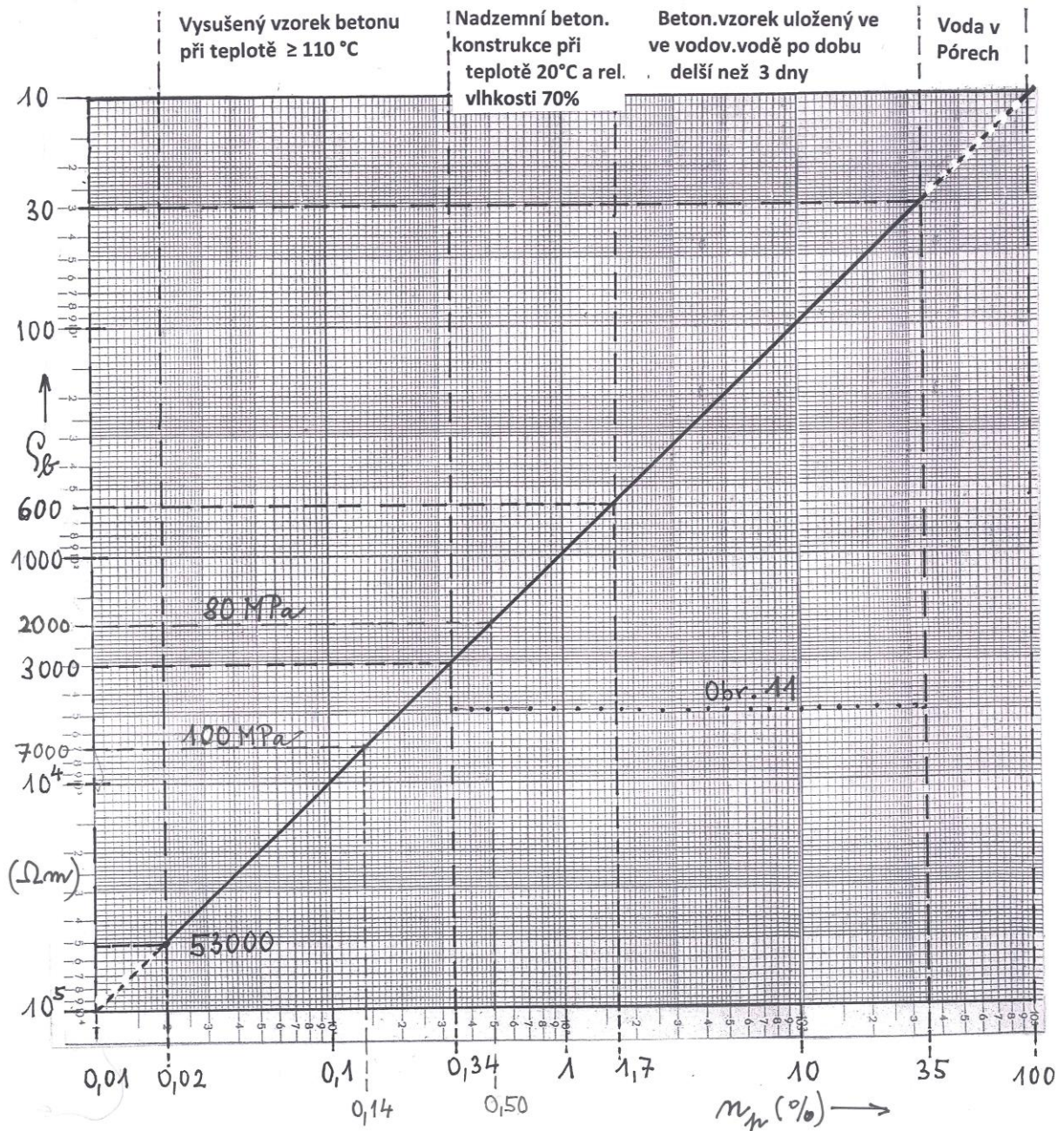
Obr 7 Způsob měření elektrického odporu zkušební betonové krychle (vzorku)



Obr. 8 Měřicí obvod čtyřelektrodové metody podle Wennera



Obr. 9 Příklad použití měřiče elektrické rezistivity betonu v praxi



LEGENDA:

$\rho_b$  - elektr. rezistivita betonu ( $\Omega m$ )

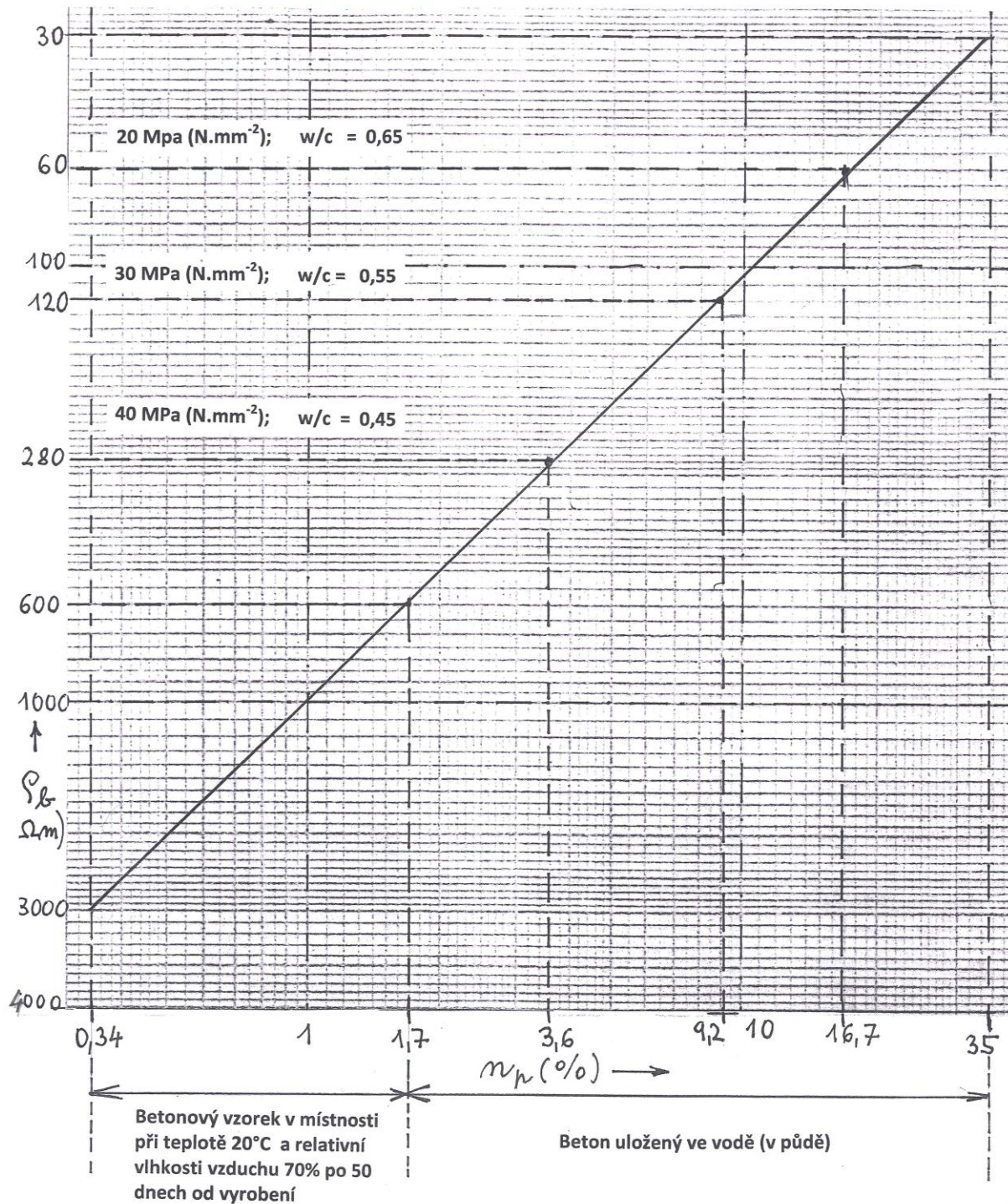
$n_p$  - permeabilní pórovitost (%)

$$n_p = (V_p / V_c) \cdot 100 \quad (\%)$$

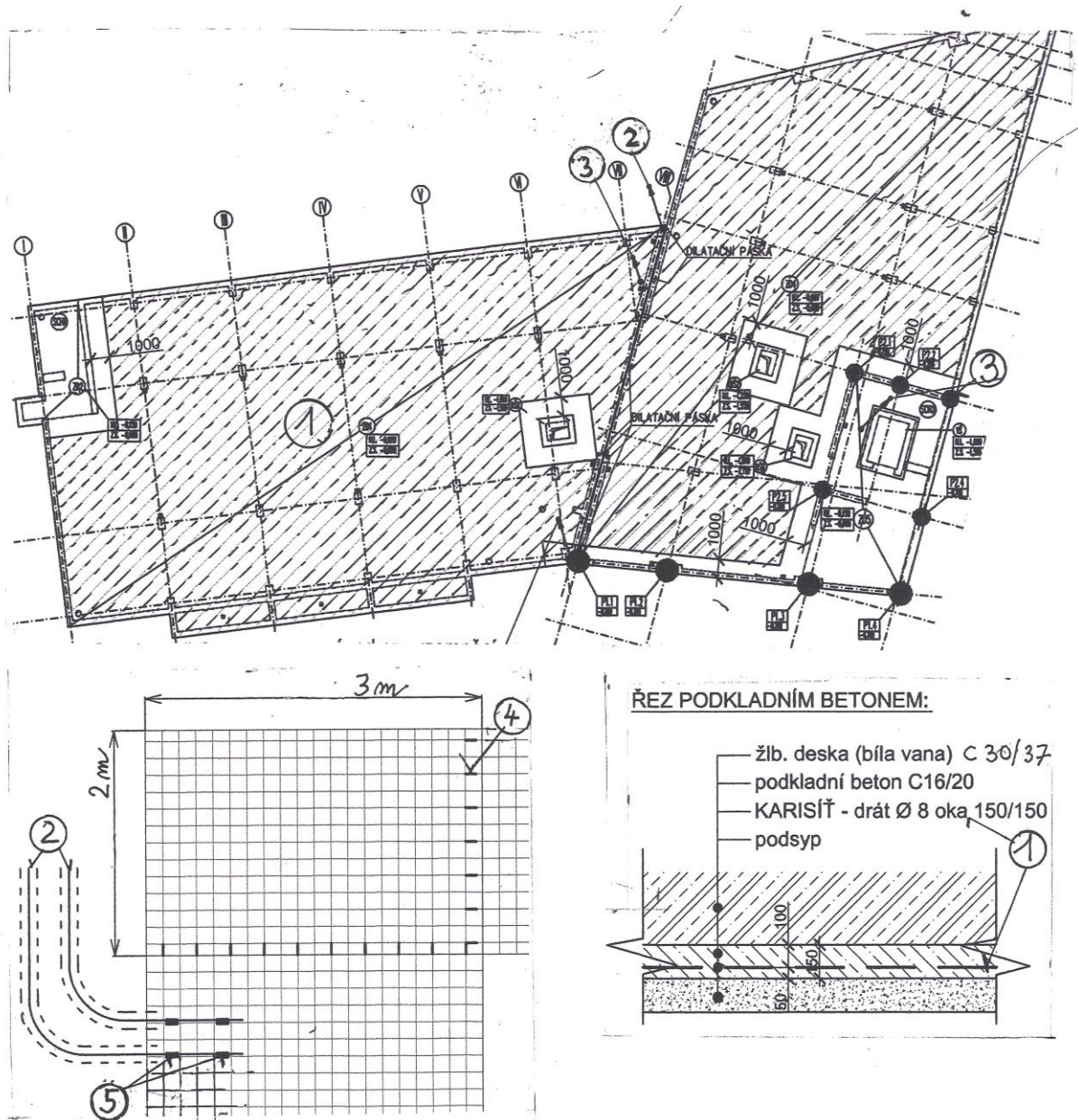
$V_p$  - Objem pórů vyplněných vodou : makropóry ( $\phi 50$  až  $2000 \mu m$ ), spojitě kapilární póry ( $\phi 5$  až  $50 \mu m$ ) ( $m^3$ )

$V_c$  - Celkový objem zkušební tělesa – betonu s póry ( $m^3$ )

Obr. 10 Závislost elektrické rezistivity betonu na jeho permeabilní pórovitosti a na korozním prostředí



Obr. 11 Vztah mezi pevností vlaku (vodním součiniteli) a elektrickou rezistivitou betonu a obsahem vody v makropórech, resp. permeabilní pórovitostí

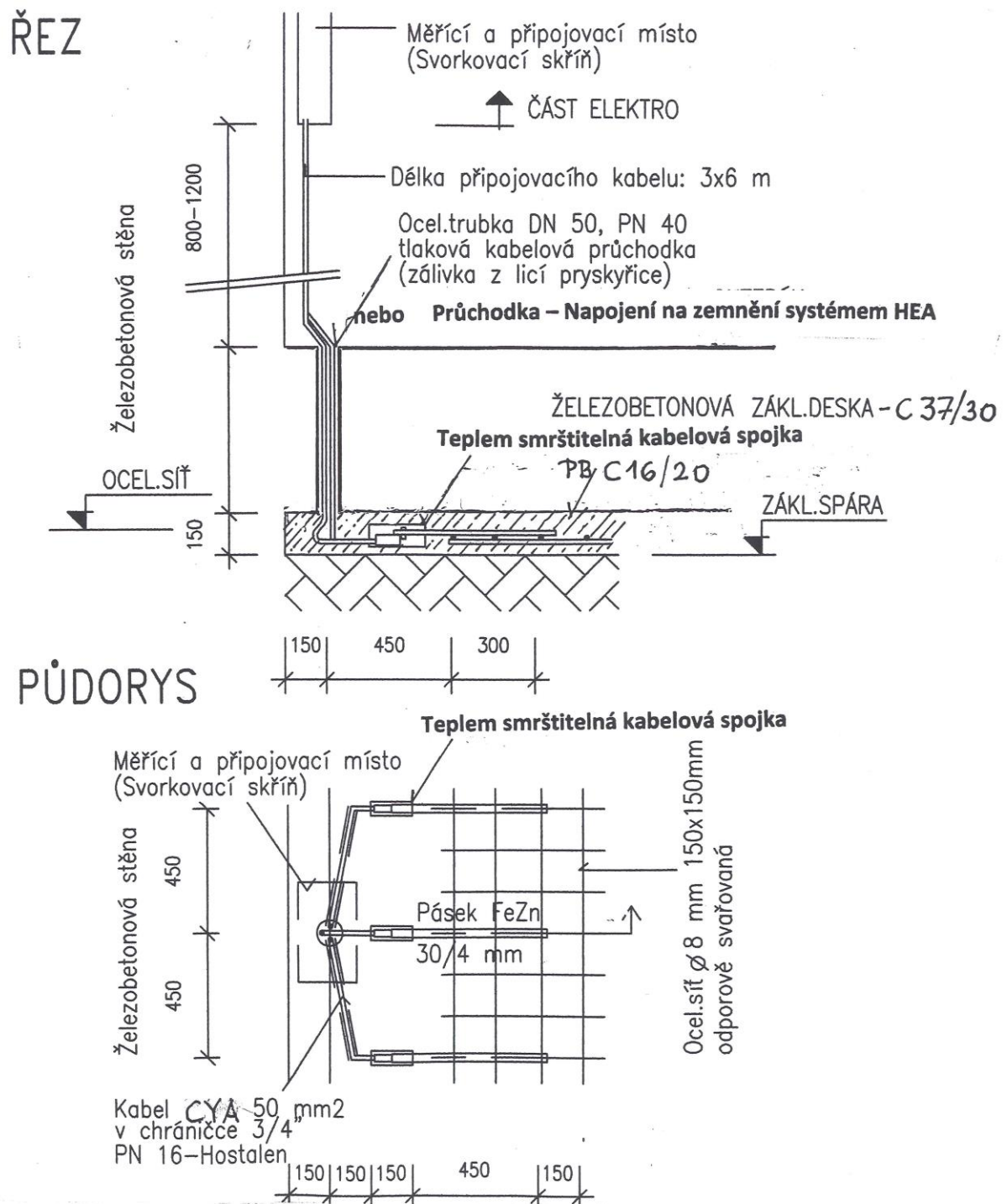
**Legenda:**

- 1-Plocha PB ze vzájemně svařených Kari sítí, drát  $\varnothing 8\text{mm}$ , oka 150/150 mm, 1 ks: 3 x 2 m  
 2-Vývod pro uzemnění svodu hromosvodu: drát FeZn  $\varnothing 10\text{ mm}$ , v PVC trubce (bužírce)  
 3-Vývod pro uzemnění výtahu a HOP; 4-Svar (min.50 mm) dvou ocelových sítí 3x2 m  
 5-Svar ocel.sítě s vývodem  $\varnothing 10\text{ mm}$  FeZn + pasivní ochrana (epoxid . asfalt)

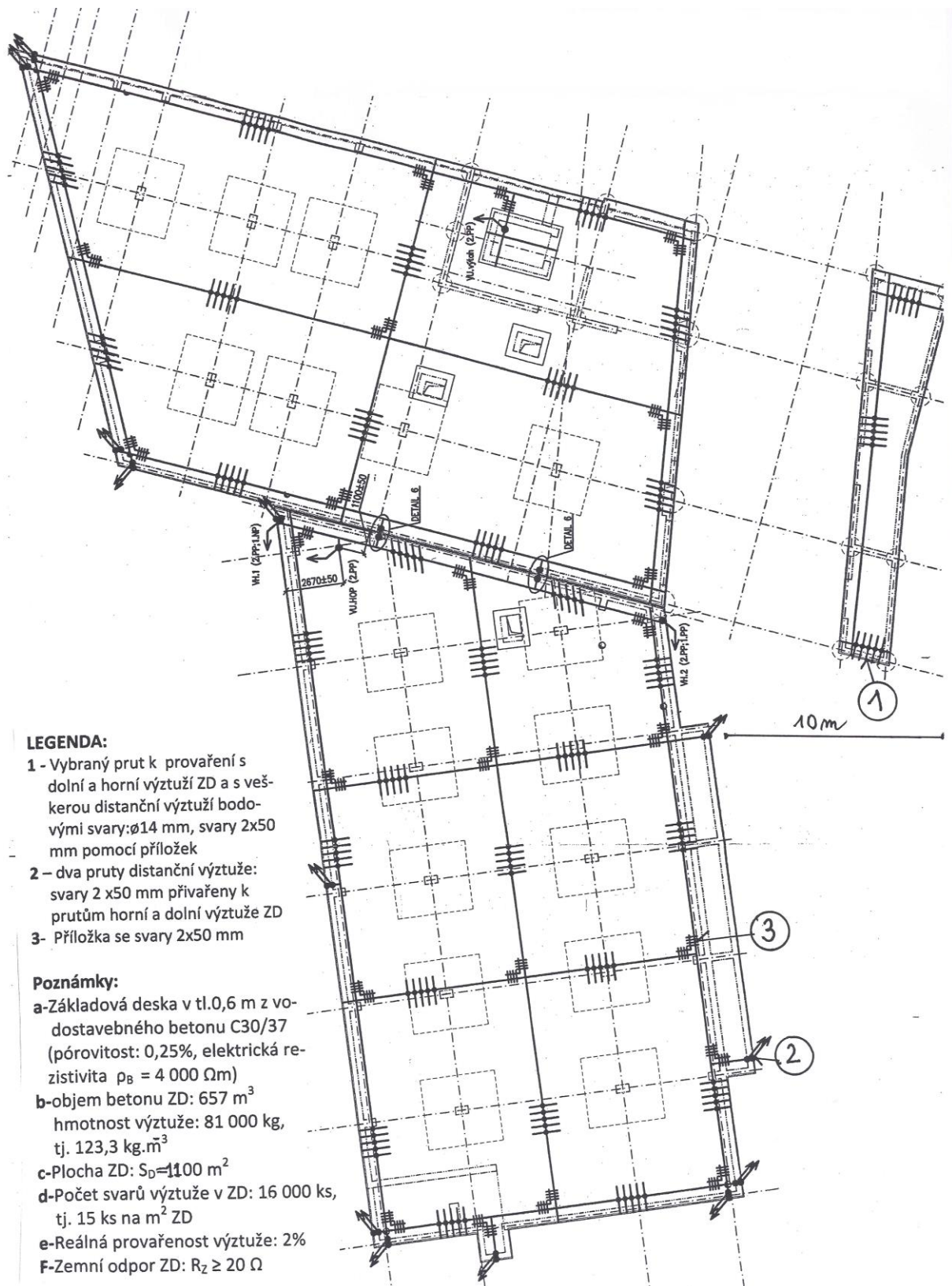
**Poznámky:**

- a-Celková plocha ocelových rohoží 3x2 m v PB třídy C16/20:  $S_0 = 901\text{m}^2$   
 b-Objem PB:  $135\text{ m}^3$ , hmotnost Kari sítí: 5 160 kg, tj.  $38,3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$   
 c-Elekr.resistivita PB třídy C16/20:  $\rho_0 = 60\ \Omega\text{m}$  při efektivní pórovitosti  $n_p = 16,7\%$   
 d-Počet svarů na stavbě: 1 560 ks, tj. 3 ks na  $\text{m}^2$ , reálná provařenou ocel.sítí: 100 %  
 e-Zemní odpor zemniče v PB:  $R_z = 1,2\ \Omega$  ( při resistivitě půdy  $\rho_z = 80\ \Omega\text{m}$  )

Obr. 12 Příklad použití kari sítě v podkladním betonu (PB) jako ochranného uzemnění bytového objektu a detaily připojení svodů k ocelové síti



Obr. 13 Příklad připojení svodů z hromosvodů a vývodů z technologických zařízení k ocelové síti při použití měděných kabelů



Obr. 14 Příklad chybného použití výztuže základové desky (ZD) z vodostavebního betonu jako ochranného uzemnění bytového objektu