



ZÁKLADNÍ KOROZNÍ PRŮZKUM, PRAXE, STANDARDY, OTÁZKY
BASIC CORROSION SURVEY, PRACTICE, STANDARDS, QUESTIONS

Jaroslav Bárta¹, Jan Vilhelm²

Abstrakt

Do portfolia úkolů, které řeší geofyzikální pracoviště, patří také základní korozní průzkum stavebních lokalit, sestávající z měření velikosti bludných proudů, zjišťování velikosti měrných odporů a vyhodnocení stupně agresivity zkoumaného horninového prostředí. Zjištěné poznatky mohou významně ovlivnit rozsah potřebných protikorozních opatření, a tím i náklady na konečnou cenu připravované stavby. Zde předložený článek hodnotí aktuální praxi realizace korozních průzkumů, upozorňuje na základní doporučené normy a pokyny a navrhuje aktualizaci některých metodik.

Abstract

The portfolio of tasks solved by the geophysical workplace also includes a basic corrosion survey of building sites, consisting of measuring the size of stray currents, determining the size of resistivity and evaluating the degree of aggressiveness of the examined rock environment. The findings may significantly affect the extent of the necessary anti-corrosion measures and thus the costs of the final price of the planned construction. The article presented here evaluates the current practice of corrosion surveys, draws attention to the basic recommended standards and guidelines and proposes an update of some methodologies.

Klíčová slova

Koroze, průzkum, bludné proudy, proudová hustota, měrný odpor

Keywords

Corrosion, survey, stray currents, current density, resistivity

1. Úvod

Značná část geofyzikálních pracovníků, kteří se orientují na geoelektrický průzkum, se již setkala s požadavkem zjistit přítomnost bludných proudů a následně zařadit lokalitu podle stupně agresivity. I když základní úkoly, které mají geofyzici řešit, leží v jiných oblastech (ložiskový průzkum, inženýrská geologie, hydrogeologie, ekologie), nelze problematiku bludných proudů a půdní koroze považovat za okrajovou a odborně nenáročnou specializaci. Rutinní geoelektrická měření pro posouzení korozity požadují projekční kanceláře nejméně od čtyřicátých let minulého století, viz lit. MUDD (1945). Geofyzikální pracoviště v Československu byla komerčně spojena se správci produktovodů a projektanty dosti často již v šedesátých letech, viz lit. BÁRTA (1967) a BÁRTA (1969). Z aktuálních zahraničních informačních zdrojů, ze kterých může čerpat hlubší znalosti i geofyzik, lze odkázat například na BABOIAN (2004). Z českých standardů a technických pokynů, jejichž znalost je potřebná pro geofyziky provádějící Základní korozní průzkum, lze upozornit na následující, viz lit. ČSN 03 8375, ČSN 03 8372, ČSN 03 8365, TP 124, Metodický pokyn MD a ČSN 038363.

Ze široké problematiky spojené s korozi kovových materiálů se zde předložený článek věnuje “Základnímu koroznímu průzkumu”. Tento termín je chápán jako činnost spojená s detekcí přítomnosti bludných proudů a stanovení odporových poměrů v dané lokalitě. Následně geofyzik na základě naměřených dat zhodnotí stupeň agresivity zkoumaného prostředí (lokality) a předá tuto informaci projektantovi spolu s nejnutnějšími doporučeními. Otázky spojené s detailním návrhem protikorozních opatření (jsou-li potřebná) následně řeší korozní specialista a toto již není činností, která geofyzikovi přísluší. I tak je problematika spojená se „Základním průzkumem“ náročná a zaslouží si, aby byla postupně inovována v souladu s rozvojem geoelektrických metod.

2. Kritéria agresivity

Vyhodnocení naměřených dat se obecně řídí dle Tab. 1, která je odvozena z tabulky 1 uvedené v ČSN 03 8375, nebo ČSN 03 8372. Podrobněji propracovaná tabulka doprovázená doporučeními pro základní ochranná opatření je uváděna v Technických podmínkách TP 124 (příloha 8, tabulka 1), viz Tab. 2 níže.

Tab. 1 Nebezpečí koroze dle ČSN 03 8375

Měrný odpor (půdní koroze) [Ωm]	Proudová hustota J_p [mA/m^2]	Charakteristika koroze	Stupeň koroze
více jak 100	méně než 0,0001	velmi nízká	I
50 - 100	0,0001 – 0,003	střední	II
23 - 50	0,003 – 0,1	zvýšená	III
méně než 23	více než 0,1	velmi vysoká	IV

Tab. 2 Stupně základních pasivních ochranných opatření pro omezení vlivu bludných proudů

Základní ochranná opatření, stupeň č.	Proudová hustota [mA/m ²]	Provedení základních opatření
1	méně než 0,0001	1. Primární ochrana dle ČSN EN 206-1 A – bez propojení výztuže a jejího vyvedení na povrch konstrukce
2	0,0001 – 0,003	2. Kombinace primární ochrany dle ČSN EN 206-1 a tab. 3 a případně sekundární ochrany dle TP, čl. 5.3 B – bez propojení výztuže a jejího vyvedení na povrch konstrukce
3	0,003 – 0,1	3. dtto ad 2 plus C – konstrukční opatření dle TP, čl. 5.4, bez propojení výztuže a jejího vyvedení na povrch konstrukce
4	0,1 - 3	4. dtto ad 2 plus D – konstrukční opatření dle TP, čl. 5.4, včetně propojení výztuže a jejího vyvedení na povrch konstrukce
5	větší jak 3	5. dtto ad 4 plus E – dokumentace „Elektrické rozvody a zařízení pro kontrolu vlivu bludných proudů“ umožňující elektrická a geofyzikální měření (dle MP DEM) včetně realizace a ev. návrhu následujících opatření

Mezi uvedenými tabulkami Tab. 1 a Tab. 2 je rozdíl ve smyslu jejich zrodu a cíle použití. Tab. 1 je odvozena z Českých norem (ČSN). ČSN 03 8372 má obecný charakter. ČSN 03 8375 je určena pro liniové stavby (tedy produktovody). Tab. 2 je převzata z technického pokynu Ministerstva dopravy (TP 124) určeného pro mostní objekty a další betonové objekty pozemních komunikací. Struktura Tab. 2 a kvalita jejího zpracování dovoluje častou praxi, že objednatelé korozního průzkumu pro větší stavební objekty požadují vyhodnocení dle Tab. 2, i když nejde o objekt pozemní komunikace.

V Tab. 1 jsou brány v úvahu dva druhy koroze. Prvním typem je půdní koroze. Půdní koroze je obecně považována za méně nebezpečnou. Tato koroze představuje elektrochemický proces, který nastává ve vodivém půdním prostředí. Termín půda zahrnuje nejen

materiál vyskytující se v přírodě, ale i jakýkoli jiný materiál použitý k překrytí konstrukce, např. šterkopísek nebo zásyp (viz ČSN EN ISO 8044). Půdní koroze v sobě zahrnuje reakci anodovou a katodovou. Tyto reakce jsou navzájem sprzęženy. Anodová reakce odpovídá oxidaci kovu (tj. vlastní korozi). Katodová reakce odpovídá redukci oxidující složky elektrolytu (vybíjení iontu vodíku, nebo redukce kyslíku). Podle zažité praxe anodová reakce se častěji tvoří v místech zvodnělých a jílovitých, proto oblasti s nízkým odporem indikují zvýšenou korozivitu. Podle zkušeností při výstavbě prvních řadů ropovodu Družba (z ústního podání, Klomínková, PÚDIS) se však také zjistilo, že nejnebezpečnější místa představují odporové kontakty (z desítek Ωm na první tisíce Ωm). Tento interpretační názor je oprávněný, protože odporový kontakt je indicií dvou elektrolytů o rozdílné koncentraci a dané místo má dispozice ke vzniku lokálního galvanického článku.

V Tab. 1 a 2 je dále popsán vztah mezi velikostí proudové hustoty a stupněm nebezpečí koroze. S proudovou hustotou roste agresivita prostředí. I v tomto případě jde o elektrochemický proces, který je způsoben přítomností bludných (parazitních) proudů. Bludné proudy jsou zapříčiněny neregulárními úniky špatně ošetřených elektrických zdrojů. Typické jsou úniky z elektrifikovaných železničních tratí, podzemních drah nebo dopravních systémů v dolech. Při výpočtu proudové hustoty je nutno znát dvě měřené veličiny, a to gradient elektrického potenciálu ΔU (mV/m) a měrný odpor ρ (Ωm) prostředí, kterým se proud šíří. Proudová hustota J_p je pak vypočtena ze vzorce

$$J_p = \Delta U / \rho \quad [\text{mA/m}^2] \quad (1)$$

Pozn. k rov. 1: V příslušných ČSN se používá místo pro geofyzika frekventovanějšího pojmu gradient ΔU pojem intenzita elektrického pole E_p se stejným fyzikálním rozměrem [mV/m].

3. Průběh terénních prací; dosavadní praxe

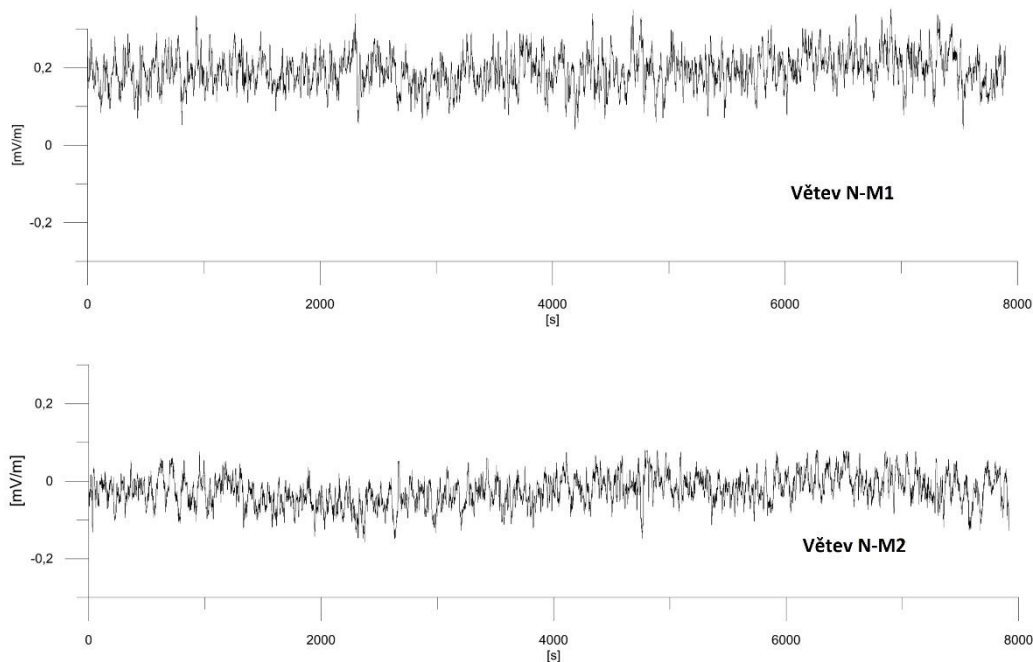
Terénní měření probíhá na observačních stanicích. Rozložení stanic by mělo být na zájmové ploše (budoucím staveništi) v zásadě pravidelné, ideálně v síti 50 krát 50 m. Měření je závislé na vlhkosti a teplotě, proto za ideální je možno považovat klimatické podmínky cca 20 °C, sezóna s průměrným srážkovým úhrnem, neměřit těsně po prudkém dešti. Pracoviště, které se dané problematice věnuje častěji a zodpovědně by mělo mít k dispozici testovací stanici (opakované měření vertikální elektrické sondy), na které kontroluje vliv klimatu na terénní práce. Případné klimatické vlivy lze pak opravit korekcí.

Měření bludných proudů probíhá tak, že jsou sledovány potenciální rozdíly (v lit. ČSN 03 8365 se používá termín intenzita elektrického pole) mezi nepolarizovatelnými elektrodami N a M1, resp. N a M2. Vzdálenost elektrod od sebe je vesměs 20 m. Směr dvojic nepolarizovatelných elektrod NM1 je vůči dvojici NM2 vždy kolmý. Orientace měřících elektrod a jejich rozteče by měly být pro všechny stanice stejné. Pokud to terénní podmínky nedovolí, je nutno následně provést opravou korekci, aby konečná tabulka a mapa vektorů intenzity elektrického pole E [mV/m] měla vzájemně srovnatelné údaje. Vzorkovací čas a délka monitorování se přizpůsobuje konkrétním podmínkám staveniště. Pro běžné situace doporučujeme vzorkovací čas po 1 sekundě s trváním měření cca 60 minut. Měření by mělo probíhat v době, kdy lze očekávat maximální pracovní vytížení proudových zdrojů. Při měření se používají nepolarizovatelné elektrody, vesměs keramické nádoby s přesyceným roztokem CuSO_4 , ve které je umístěna měděná elektroda.

Měrné odpory prostředí jsou zjišťovány nejčastěji pomocí vertikálního elektrického sondování (VES). V poslední době se nabízí možnost použití odporových tomografických řezů (ERT), což vnáší do celé problematiky zcela nový vhléd. Poznamenáváme, že při měření je nutno respektovat požadavek: odporové měření má probíhat tam, kde proběhlo i měření intenzity. Tento požadavek je někdy nesplnitelný, protože měření probíhá na zastavěném terénu (zpevněný povrch komunikací).

Na obr. 1 je uvedena ukázka záznamu intenzity elektrického pole (časová doména). Měření proběhlo v místech s relativně klidným potenciálem elektrického pole.

Měření z obr. 1 bylo provedeno s aparaturou BLOW-2, která je určena především pro potenciálová měření bludných proudů a která umožňuje souběžný záznam dat mezi dvěma dvojicemi elektrod. V našem případě elektrodami N-M1 a N-M2. Na obr. 2 je snímek aparatury BLOW-2 při terénním měření. Aparatura se skládá ze dvou multimetrů OWON N-25T+. Naměřená data se přenášejí pomocí bluetooth do mobilu (Android), kde jsou ukládána pomocí aplikace do databáze v časové doméně (v našem případě ve vzorkovacím čase 1 vteřina).



Obr. 1 Záznam potenciálních rozdílů. Stanice ST4, Ruzyně.

Obr. 2 Měření bludných proudů s měřícím kompletem BLOW-2. V popředí nepolarizovatelná elektroda.

4. Průběh vyhodnocovacích prací; dosavadní praxe

Naměřená data intenzity elektrického pole [mV/m], která jsou měřena ve dvou na sebe kolmých směrech (máme tedy dva soubory dat), jsou nejprve zprůměrována. Průměry jsou děleny velikostí měrného odporu ρ , a tak získáme proudové hustoty J_p ve směru 1 a 2, tj.

$$J_{p1} = E_{p1} / \rho \quad (2)$$

$$J_{p2} = E_{p2} / \rho. \quad (3)$$

Následně vypočteme velikost totálního vektoru J_p , tj.

$$J_p = (J_{p1}^2 + J_{p2}^2)^{0,5}. \quad (4)$$

Měrný odpor ρ se určí z výsledku odporových měření. Normy vyžadují dosadit naměřenou hodnotu zdánlivého měrného odporu pro odpovídající hloubku (třetina Wennerova uspořádání elektrod). V současnosti převládá praxe použít reprezentační hodnotu skutečného měrného odporu získanou z měření vertikálního elektrického sondování (VES). Pro konečné vyhodnocení se následně berou v úvahu proudové hustoty J_p (koroze bludnými proudy) a velikosti zjištěných skutečných měrných odporů (pro vyhodnocení půdní koroze).

Většina zkoumaných lokalit má plošný charakter (plocha budoucího domu apod.). V minulosti bylo častým úkolem řešit liniovou trasu budoucího produktovodu. V tomto případě bylo v trase používáno pro vymezení potenciálních anodických oblastí půdní koroze symetrické odporové profilování s optimálním rozestupem (rozestupy) elektrod. V současné době se pro produktovody používají převážně plastová potrubí nebo ocelové roury rozdělené izolačními spojkami. Problém korozity je tak z velké části odstraněn.

5. Rozpory mezi ČSN a současnými možnostmi nových technologií

I když praxe terénních měření a jejich vyhodnocování probíhá převážně kvalitně a naše zprávy (tj. z geofyzikálních pracovišť) o výsledcích Základního korozního průzkumu jsou přijímány až na výjimky bez připomínek, bylo by možno současný stav zlepšit. Lze upozornit na několik problémů:

- Používané ČSN neodpovídají současným znalostem. Aktuálně prováděná měření se těmito standardy nemohou doslovně řídit.
- Geofyzici mají z meritu věci hluboké zkušenosti s vlastnostmi potenciálových polí a mohli by při přípravě aktualizovaných norem být užitečnými partnery.
- Současný způsob výběru dodavatele prací (tj. dodavatele Základního korozního průzkumu) není zacílen na kvalitu provedené práce, ale na nejnižší cenu dodávky. Řada akcí je tedy odvedena pouze v nejjednodušší formě nejlacinějším dodavatelem. Toto konstatování ostatně platí pro většinu výběrových řízení v České republice.

ČSN 03 8365 Stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi:

- Norma vyžaduje měření ve dvou směrech, a to západ-východ a sever-jih. S ohledem na složitost terénu na nepřipravených staveništích (terénní překážky) nelze tuto zásadu vždy dodržet.

- Potenciálové pole v měřeném místě téměř nikdy nedodrhuje jednoduchý eliptický tvar svých ekvipotenciálních čar (např. malá poloosa elipsy vždy ve směru V-Z a velká poloosa vždy ve směru S-J). Z toho plyne, že k vyjádření 2D vektoru intenzity pole, který vstupuje do dalších výpočtů, je nutno měřit ve více směrech.
- Norma předpokládá monitoring po dobu 15 až 30 minut s frekvencí měření po 15 až 30 sekundách. Tato frekvence a délka měření je nedostatečná a zůstaly v normě jako relikty z dob, kdy většina operátorů měla k dispozici pouze analogové, ručičkové přístroje a naměřené hodnoty se ručně zapisovaly do zápisníku.

ČSN 03 8363 Měření zdánlivého měrného odporu půdy Wennerovou metodou:

- Norma popisuje pouze jednu, nejjednodušší variantu elektrodového uspořádání. V řadě případů je efektivnější použít i jiná uspořádání.
- Zpracování normy vede méně informovaného uživatele k tomu, že při měření a vyhodnocení použije pouze zdánlivý měrný odpor, který vztahuje nejčastěji k hloubkovému dosahu jedné třetiny rozestupu proudových elektrod. Takto získaná hodnota může být značně vzdálená skutečnému měrnému odporu, který by bylo správné při posuzování korozivity použít. Zkušeni geofyzici proto provádějí měření metodou vertikálního elektrického sondování (VES) a následně provádějí kvantitativní interpretaci, čímž získají znalost skutečného měrného odporu. Praxe použít VES je správná, ale je v rozporu s původní instrukcí tvůrců normy.
- Vývoj technologií pokročil a v současnosti se u závažnějších úkolů používá na některých pracovištích měření metodou ERT (odporová tomografie), což je další kvalitativně zásadní posun, který současné ČSN nezachytily. Vyšší kvalita získaných informací vede samozřejmě k určitému zvýšení nákladů, a tedy cena zakázky vzroste. Na druhé straně poměr kvalita informace /cena informace je pro klienta výhodnější.
- V normě je uváděno doporučení korigovat naměřená data koeficientem, který má upravit odporové hodnoty tak, aby nebyly závislé na průměrných změnách teplot a vlhkosti během ročního období. Viz ČSN, Tabulka 4.1: Korekční činitele pro zpřesňování naměřených hodnot měrného odporu půdy. Tato tabulka může zejména v období výraznějších extrémů (mrazivé počasí v lednu, srážkově suchý rok apod.) být zavádějící. Optimálním řešením je, aby specializované pracoviště mělo vlastní dlouhodobou bázi, kde provádí pravidelné měření VES. Podle výsledků z báze pak lze provádět případnou korekci aktuálních hodnot na sezónní průměr. Opět ovšem jde o zvýšení nákladů na cenu prací.

ČSN 03 8375 Ochrana kovových potrubí uložených v půdě nebo vodě proti korozi. ČSN 03 8372 Zásady ochrany proti korozi nelineových zařízení uložených v zemi nebo vodě:

- Normy byly tvořeny za předpokladu, že příprava staveniště zahrnuje i inženýrsko-geologický průzkum. Normy tedy obsahují i požadavky na stanovení obsahu celkové síry, obsahu Cl, obsahu SO₃+Cl a množství agresivního CO₂. Dále je zapotřebí měřit vodivost podzemní vody. Tyto hodnoty se zjišťují v rámci IG průzkumu v laboratoři z odebraných vzorků. Samotné podklady získané základním korozním průzkumem (měření bludných proudů a měrného odporu) jsou tedy sice významnou, ale pouze částí potřebných informací.

- V tab. 1 (v ČSN 03 8375 a ČSN 03 8372) je pro půdní korozi, stupeň IV zvolena hranice $< 23 \Omega\text{m}$. V minulosti tam bývala hodnota $20 \Omega\text{m}$. Z meritů věci je změna o $3 \Omega\text{m}$ malicherná. Zřejmě jde o důsledek mechanického přepočtu z amerického standardu v imperiální soustavě na evropskou SI soustavu.

6. Diskuse

Tvůrci norem (viz kap. 4) vycházeli z předpokladu, že pro hodnocení situace stačí pracovat se zdánlivým měrným odporem, který jako průměrná hodnota reprezentuje zkoumanou horninovou (půdní) vrstvu. Tento předpoklad je ale málo kdy splněn. Přitom při výpočtu proudové hustoty větší změna hodnoty ρ , kterou vložíme do rov. 2 nebo 3 může významně změnit výpočet, a tedy i zařazení lokality podle nebezpečí koroze. Jenom skutečná hodnota měrného odporu zařazená do rov. 2 a 3 vede ke správnému výpočtu proudové hustoty J_p . Nesplnění tohoto předpokladu je zejména významné, pohybuje-li se náš výpočet na hranici stupně agresivity III a IV. V této kritické oblasti nesprávné zařazení může mít významné důsledky (nedostatečný návrh protikorozních opatření nebo zbytečné náklady na předimenzovanou ochranu). Skutečný měrný odpor lze zjistit jedině metodou vertikálního elektrického sondování (VES) nebo odporové tomografie (ERT). Postupujeme-li takovýmto způsobem, nemůže logicky naše informace pro projektanta skončit pouze výstupem, který obsahuje jednoduchou informaci o jakési jedné střední hodnotě proudové hustoty. Proudová hustota se v každém horninovém prostředí mění s hloubkou i místem (3D). Polohy jílovité mají proudovou hustotu zásadně větší než například vysokoodporová podložní poloha. Projektant by pak měl podle skutečnosti respektovat, že základy stavby jsou nejvíce ohroženy např. do hloubky x metrů apod.

Je jasné, že možnosti stanovení hodnoty skutečného měrného odporu prostředí mají své limity, zejména pokud měříme v silně nehomogenním prostředí, například s přítomností inženýrských sítí. Tento problém lze často vyřešit požadavkem na opakované měření po odkrytí základové spáry. Tím ovšem dojde k navýšení nákladů.

Z praxe je zřejmé, že zařazení lokality do stupně I, nebo II či III (dle ČSN 03 8375, ČSN 03 8372 či TP 124) není podstatné z hlediska nákladů na protikorozi ochranu. Zásadní je, vznikne-li možnost, že stupeň agresivity může mít hodnotu IV, nebo zejména V (dle TP124). V tomto pásmu by měl mít geofyzik povinnost, ale ze strany objednatele dostat i možnost, navýšit náklady spojené s důkladným doprůzkumem lokality.

S ohledem na to, že k nezávažnějším poškozením kovových objektů uložených v zemi dochází na základě praxe až po dosažení proudové hustoty cca 3 mA/m^2 , bylo by účelné v rámci aktualizace (což autoři článku doporučují) ČSN 03 8375 a ČSN 03 8372 rozšířit klasifikační tabulku o stupeň agresivity 5, a tak sjednotit ČSN s TP124 .

I v nejpříznivějším případě má geofyzik možnost řešit zadání Základního korozního průzkumu pouze tak, že má k dispozici data z optimálně navržených observačních stanic. Zde má k dispozici rozložení elektrického pole (bludných proudů) na povrchu terénu a dále má k dispozici izoohmický řez s hloubkou. Pokud považujeme informaci o rozložení elektrického pole z povrchu za kvazi platný i do hloubky, lze počítat proudové hustoty pro jednotlivé vrstvy řezu jako podíl intenzity elektrického pole E (mV/m zjištěné tak, jak je popsáno v kap. 4) k hodnotě skutečného měrného odporu vrstvy. Pokud bychom spolehlivěji prokázali tento předpoklad, bylo by možno jako základní realizační

výstup našich zpráv předkládat vedle izoohmického řezu také řez rozložení proudových hustot. V následující kapitole 7 je uveden pokus o sestrojení takového modelu.

7. Geoelektrický model

Numerické řešení úlohy toku elektrického proudu prostředím se zadaným rozdělením měrného odporu $\rho(x, y, z)$ se řeší zejména pomocí metody konečných diferencí nebo konečných prvků. V geoelektrických odporových metodách se často využívá zjednodušující dvojrozměrný model prostředí, kde se předpokládá, že rozložení měrných odporů je funkcí pouze souřadnic v rovině vertikálního řezu, tj. $\rho(x, z)$, zatímco ve směru kolmém k rovině řezu se měrný odpor nemění. V takovém případě se například pro výpočet potenciálu pole bodového zdroje proudu využívá Fourierovy transformace přes proměnnou y , která je transformována do frekvenční oblasti ω_y . Úloha se stane dvojrozměrnou, s parametrem ω_y . Zpětnou Fourierovou transformací lze získat prostorové řešení.

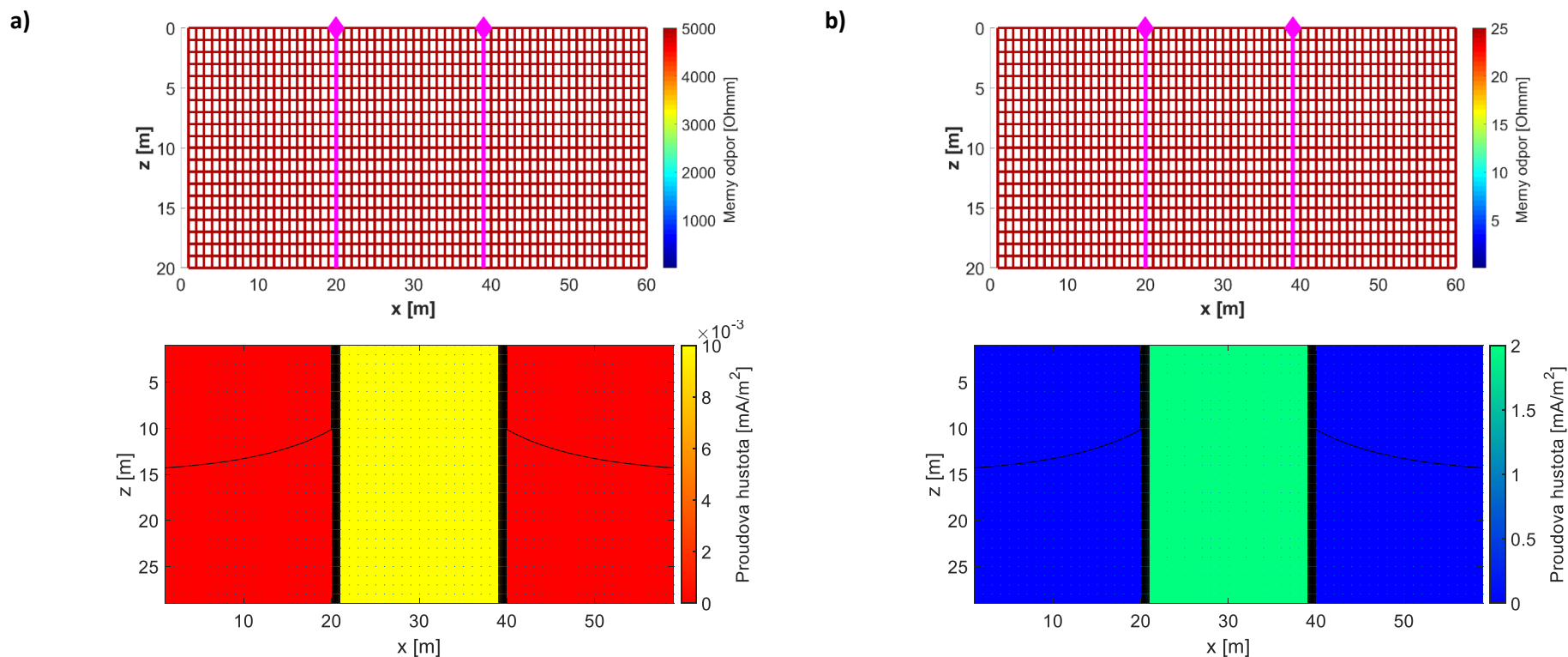
Pole bludných proudů ale nemusí mít známý bodový zdroj v blízkosti místa měření. Proto má smysl v prvním přiblížení uvažovat model homogenního proudového pole mezi dvěma plošnými elektrodami, kolnými na rovinu řezu. V případě, kdy uvažujeme liniový zdroj, kolmý na rovinu profilu, dojde k dalšímu výraznému zjednodušení dvojrozměrného modelu. V našem případě byl pro modelový výpočet v takovém případě použit jednoduchý 2D model prostředí, tvořený pravoúhloú sítí rezistorů [12, 13]. Model pracuje se sítí o délce hrany 1 m, číselné hodnoty velikosti odporů jsou tak rovny hodnotám měrných elektrických odporů prostředí. V rovině modelu jsou uvažovány dva vertikální vodiče, dostatečně vzdálené od sebe. Pokud jsou vodiče připojené ke zdroji elektrického napětí / proudu, vzniká mezi nimi pole proudu. V homogenním prostředí se jedná o homogenní pole proudu, respektive proudové hustoty. Konkrétní velikost proudové hustoty je určena měrným odporem prostředí a parametry zdroje, který injektuje elektrický proud do prostředí. Výsledná proudová hustota je nepřímo úměrná měrnému odporu prostředí. Naopak je přímo úměrná zvolenému napětí nebo proudu zdroje.

Samotný numerický výpočet vychází z Kirchhoffových zákonů. V daném případě jsou počítány tzv. smyčkové proudy v každé elementární smyčce sítě, která je tvořena celkem čtyřmi odpory. Smyčkový proud v každé smyčce je určen velikostí odporů v této smyčce a smyčkovými proudy v bezprostředně sousedních smyčkách. Pro každou smyčku je tedy možné sestavit jednu lineární rovnici. Počet elementárních smyček v síti je roven počtu smyčkových proudů a pro odporovou síť je tak možné sestavit soustavu rovnic, která má jediné řešení. Vnější zdroj proudu, který je připojen k nějaké dvojici uzlů sítě, je do výpočtu zahrnutý modifikací příslušných rovnic pro zdrojem ovlivněné smyčky. Výsledkem řešení jsou smyčkové proudy pro všechny smyčky sítě a z nich je pak možné spočítat proudy, které protékají jednotlivými odpory sítě. Zvolený model odporové sítě nahrazuje model prostředí se spojitým rozložením měrného odporu. Protože síť odporů byla zvolena tak, že uvažujeme délku hrany 1 m, velikosti odporů v jednotce Ω jsou číselně rovny měrným odporům v Ωm a spočtené proudy protékající jednotlivými odpory v jednotce A jsou číselně rovny proudovým hustotám v A/m^2 .

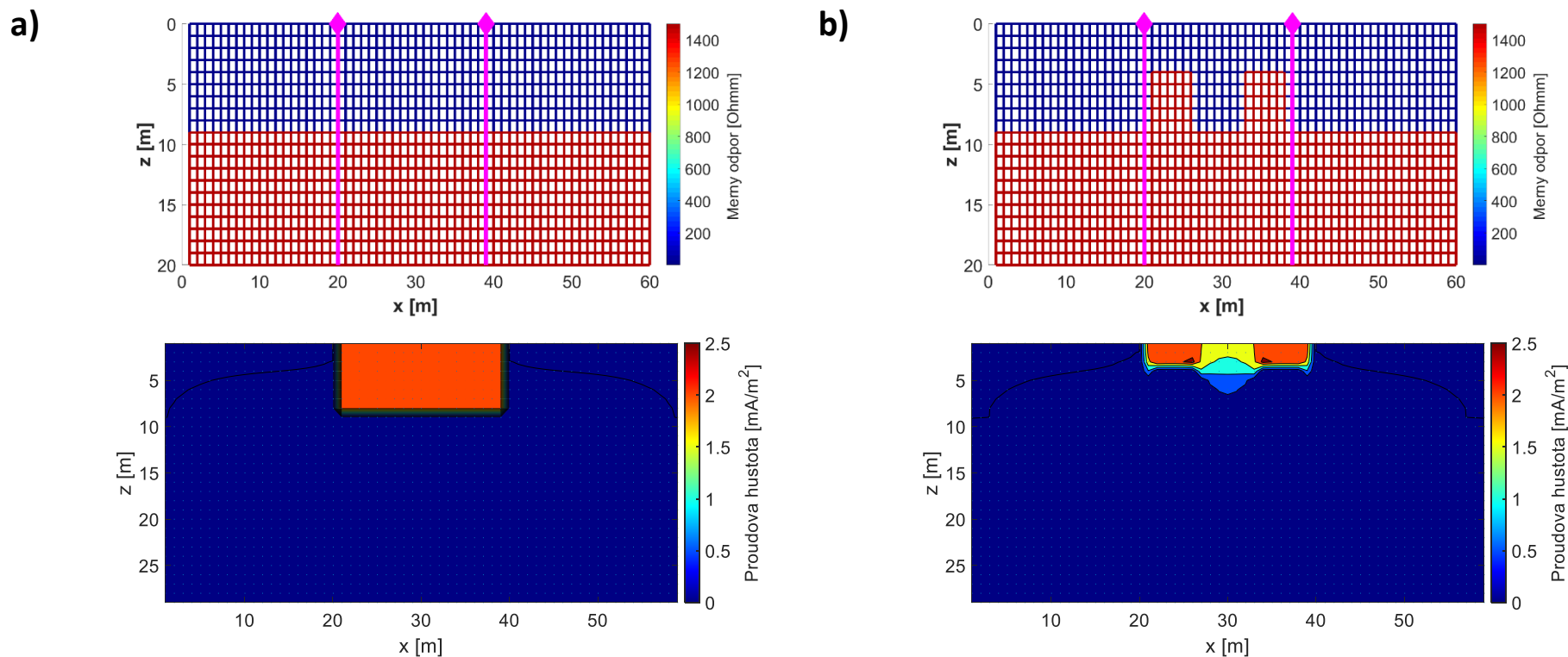
Jako výchozí model byl zvolen model homogenního prostředí. V prvním případě (obr. 3a) jde o model nevodivého prostředí, měrný odpor byl zvolen $5000 \Omega\text{m}$. Pro zvolené napětí na zdroji je proudová hustota mezi proudovými elektrodami v tomto případě

cca $10 \times 10^{-3} \text{ mA/m}^2$. V případě homogenního prostředí s výrazně vyšší vodivostí (měrný odpor $25 \Omega\text{m}$, obr. 3b) je pro stejné napětí zdroje pole proudové hustoty mezi elektrodami opět homogenní a tentokrát proudová hustota dosahuje hodnoty 2 mA/m^2 .

Ukázka nehomogenních modelů je na obr. 4. Pokud je nehomogenní prostředí tvořeno vodivou vrstvou ($25 \Omega\text{m}$) s nevodivým podložím ($1500 \Omega\text{m}$), ukazuje se, že při stále stejné volbě napětí zdroje je výsledná proudová hustota měřená na povrchu 2 mA/m^2 a není nijak nevodivým podložím ovlivněna (obr. 4a). V případě, kdy se mocnost vodivého pokryvu mění, nebude pole proudové hustoty homogenní (obr. 4b). V závislosti na tom, kde bude provedeno měření proudové hustoty na povrchu, dostaneme odlišné výsledky. Stejně tak je zřejmé, že měření na povrchu nemusí vypovídat o proudové hustotě v hloubce. Pouze při současném stanovení rozložení měrných odporů v řezu by bylo možné z měřené proudové hustoty na povrchu odhadnout velikost proudové hustoty v hloubce.

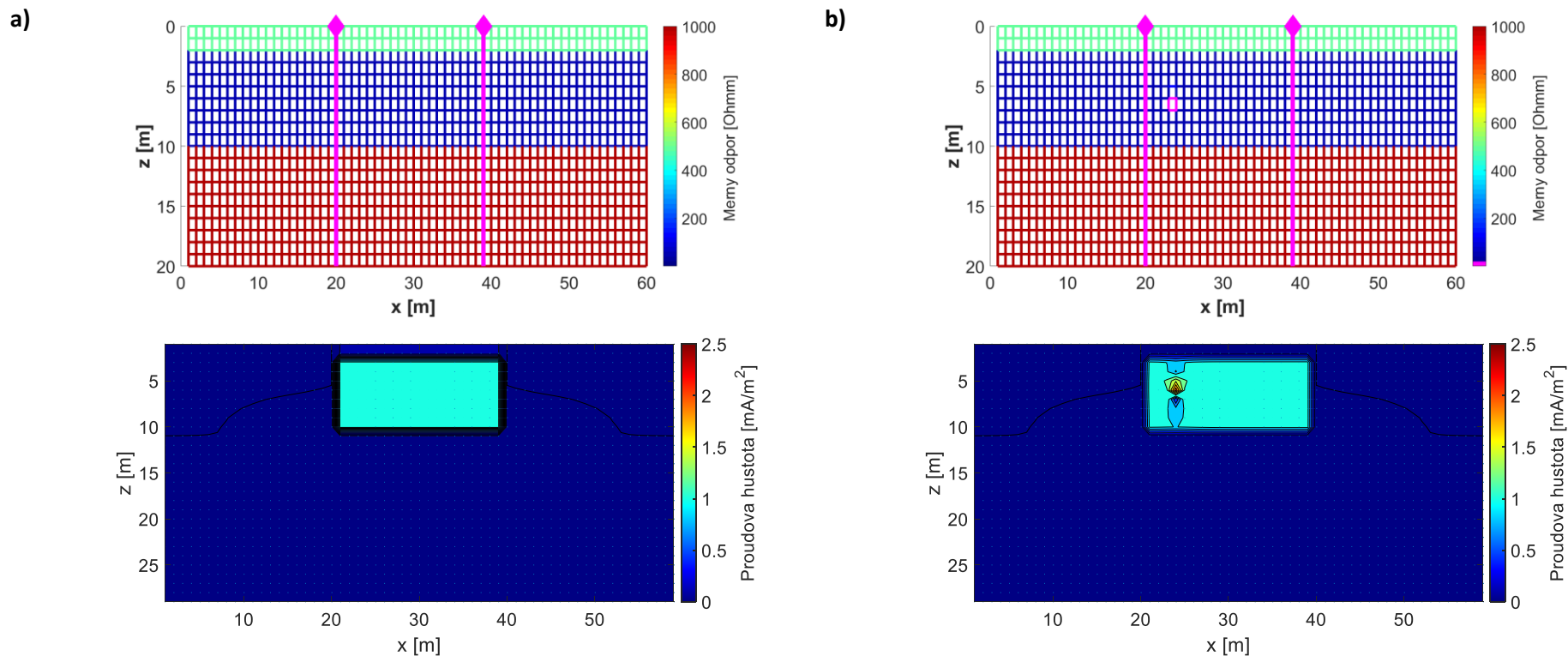


Obr. 3 Ukázka modelu odporové sítě v případě homogenního modelu prostředí. Část a) je model nevodivého prostředí ($5000 \Omega\text{m}$), část b) odpovídá modelu vodivého prostředí ($25 \Omega\text{m}$). Fialovou vertikální čarou vyznačeny plošné elektrody, kolmé k rovině řezu, které generují pole proudové hustoty. V dolní části obrázků je pole proudové hustoty – pomocí barevné škály je zobrazena velikost horizontální složky vektoru proudové hustoty.



Obr. 4 Ukázka modelu odporové sítě v případě nehomogenního modelu prostředí. Model a) je tvořen vodorovnou vrstvou vodivého pokryvu (měrný odpor $25 \Omega\text{m}$) na nevodivém podloží (měrný odpor $1500 \Omega\text{m}$). Část b) odpovídá modelu se stejnými měrnými odpory jako část a), ale s vyznačenou proměnlivou mocností vodivého pokryvu. V dolní části obrázků je naznačeno pole proudové hustoty, pomocí barevné škály je zobrazena velikost horizontální složky proudové hustoty.

To dále ilustruje i obr. 5a, na kterém je příklad mírně složitějšího nehomogenního prostředí. To je tentokrát tvořeno vodivou vrstvou ($50 \Omega\text{m}$) o mocnosti 8 m, která je překryta 2 m pokryvu o nižší vodivosti (měrný odpor $500 \Omega\text{m}$), podloží je uvažováno relativně nevodivé (měrný odpor $1000 \Omega\text{m}$). Odporové kontrasty jsou tentokrát ale voleny menší než na obr. 4. Je uvažováno stejné napětí zdroje jako v předchozích modelech, aby byly výsledné proudové hustoty srovnatelné. Na obr. 5b je pak tento model doplněn o lokální vodivou nehomogenitu, která představuje např. kovové potrubí, kolmé na rovinu řezu modelu (měrný odpor $5 \Omega\text{m}$). Ukazuje se, že s výjimkou bezprostředního okolí vodivého potrubí zůstala horizontální složka proudové hustoty blízká hodnotě 1 mA/m^2 .



Obr. 5 Ukázka složitějšího nehomogenního modelu prostředí. Model a) je tvořen vodorovnou vodivou vrstvou (měrný odpor $50 \Omega\text{m}$), která je překrytá pokryvem (měrný odpor $500 \Omega\text{m}$) a leží na nevodivém podloží (měrný odpor $1000 \Omega\text{m}$). Část b) odpovídá modelu a), navíc je modelován vodič kolmý k rovině řezu o měrném odporu $5 \Omega\text{m}$. V dolní části obrázků je naznačeno pole proudové hustoty, pomocí barevné škály je zobrazena velikost horizontální složky proudové hustoty.

8. Návrhy a doporučení

Zde popsané poznatky vedou k návrhu některé zastaralé standardy zrušit a pro potřeby základního korozního průzkumu vytvořit nový standard, který bude respektovat současné technologie a obecné poznatky. Norma by měla v textu závazně zahrnovat minimální nároky na rozsah měření a jejich kvalitu, protože jenom tak se zajistí, aby nebyla poptávková řízení orientována pouze na cenu dodávky bez ohledu na správnost výsledků. Přípravě nové normy by měl předcházet kratší výzkumný úkol aplikovaného charakteru (TAČR?), který by mohl upřesnit metodiku tvorby geoelektrických modelů. Navrhovaný výzkum by vycházel hlavně z úvah uvedených v kap. 7 (modely). Dále by úkol řešil některé otázky hodnocení dat postižených extrémně silnou nehomogenitou elektrického pole (přítomnost elektrických sítí, těsná blízkost

zdroje bludných proudů vůči stavbě). V rámci výzkumného úkolu je potřebné řešit i možné interference stejnosměrného pole s elektromagnetickým polem, což je aktuální zejména se stavbami, které mají sloužit datovým centřům.

Připravovaná norma by měla být také koncipována tak, že bude pravděpodobně v krátké budoucnosti použita i pro posuzování podzemních staveb, jmenovitě pro připravované hlubinné úložiště radioaktivních odpadů.

Literatura:

MUDD, O.C *Control of Pipe – Line Corrosion*. University of Wisconsin – Madison, 1945.

BÁRTA, J. Vztah mezi korozi způsobenou zeminou a měrným odporem zeminy. *Geologický průzkum č. 1*, Praha 1967.

BÁRTA, J. Použití geoelektrického měření při zjišťování nebezpečí koroze kovových objektů uložených v zemi. *Sborník konference o korozi a protikorozi ochraně uložených zařízení*, Brno 1969.

BABOIAN R. (editor) *Corrosion Tests and Standards-Application and Interpretation*. Second Edition. *Corrosion Doctors*, 2004., <https://corrosion-doctors.org/Books.htm>

ČSN 03 8375: *Ochrana kovových potrubí uložených v půdě nebo ve vodě proti korozi*.

ČSN 03 8372: *Zásady ochrany proti korozi neliniových zařízení uložených v zemi nebo ve vodě*.

ČSN 03 8365: *Stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi*.

TP 124: *Základní ochranná opatření pro omezení vlivu bludných proudů na mostní objekty a ostatní betonové konstrukce pozemních komunikací*.

METODICKÝ POKYN MD: *Dokumentace elektrických a geofyzikálních měření betonových mostních objektů a ostatních betonových konstrukcí pozemních komunikací*.

ČSN 038363: *Měření zdánlivého měrného odporu půdy Wennerovou metodou*.

ČSN EN ISO 8044: *Koroze kovů a slitin - Základní termíny a definice*.

JIRKŮ J. 4D charakteristika elektrických odporů a elastických parametrů krystalického horninového masivu. *Doktorská disertační práce*, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 2021.

JIRKŮ J., VILHELM J. Resistor network as modeling tool for fracture detection in crystalline rocks. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 16 (4), 2019, pp. 465 – 471.

Autoři:

¹RNDr. Jaroslav Bárta, CSc., G IMPULS Praha spol. s r.o., Přístavní 24, 170 00 Praha 7, Czech Republic, barta@gimpuls.cz

²Doc., RNDr. Jan Vilhelm, CSc., Přírodovědecká fakulta UK, Albertov 6, 128 00 Praha, vilhelm@natur.cuni.cz