

# Elektrogeochemie, progresivní metoda sanace starých ekologických zátěží

**Vendula Ambrožová, Jaroslav Hrabal,**

**MEGA a.s., pracoviště Pod Vinicí 87, 47127 Stráž pod Ralskem,  
vendula.ambrozova@mega.cz, jaroslav.hrabal@mega.cz**

## Souhrn

*Elektrochemické procesy jsou běžně používány v průmyslové praxi, především v oblasti povrchových úprav. Jsou založeny na schopnosti nabitých částic migrovat v elektrickém poli, respektive na změně jejich valenčního stavu na elektrodách. Elektrické pole se však běžně vyskytuje i v horninovém prostředí a hraje významnou roli například v procesu zvětvávání sulfidických minerálů. Uměle vytvořené elektrické pole, tedy dotace elektronů do horninového prostředí, způsobuje geochemické procesy, které mohou být využity pro eliminaci některých typů antropogenních zátěží. V příspěvku jsou prezentovány teoretické základy elektrogeochemických procesů a možnosti jejího praktického nasazení včetně konkrétních výsledků ze sanace podzemních vod kontaminovaných chlorovanými ethyleny.*

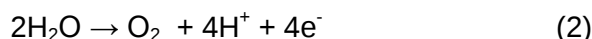
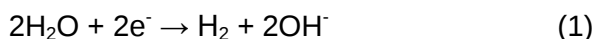
**Klíčová slova:** elektrogeochemie, geochemie, chlorované ethyleny, sanace ekologických zátěží

## ZÁKLADNÍ PRINCIPY PŮSOBNÍ ELEKTRICKÉHO POLE V HORNINOVÉM PROSTŘEDÍ

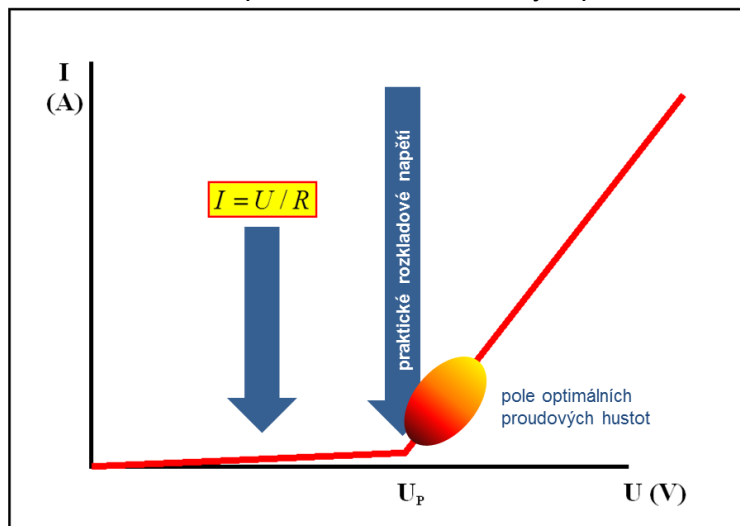
Nosnou sloučeninou celého geochemického systému přírodních exogenních pochodů je voda. Voda má celou řadu unikátních vlastností, které určují chování horninové matrice i biogenní složky. Jejími základními vlastnostmi je vysoká dielektrická konstanta, vysoké povrchové napětí a vysoká tepelná kapacita. Přírodní vody obsahují rozpuštěné látky, z nichž některé mají redukční nebo oxidační vlastnosti. Vzniká tak geochemická rovnováha mezi rozpouštědlem (voda), rozpuštěnými látkami a horninovou matricí. Změnou těchto podmínek dochází i ke změně chemizmu vody. Významnou proměnou prostředí je alkalita, která je v přírodních vodách většinou funkcí sumy  $\text{CO}_{2(\text{aq})}$  a  $\text{OH}^-$ . Geochemický systém tak má jistou setrvačnost a dokáže do určité míry pufovat přírodní oscilace nebo antropogenně vyvolané změny.

Další velmi důležitou složkou přírodního geochemického systému je železo. Je to nejrozšířenější přechodný kovový prvek a druhý nejrozšířenější kov na Zemi. Obsah železa ve sluneční soustavě se udává v úrovni  $49 \text{ g.kg}^{-1}$  a v zemské kůře  $62 \text{ g.kg}^{-1}$ . Železo patří mezi přechodné prvky, které mají valenční elektrony v d-orbitalu (vyznačuje se nejvyšší vazebnou energií ze všech známých prvků). Ve sloučeninách se vyskytuje především v mocenství  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ , sloučeniny  $\text{Fe}^{4+}$  jsou velmi nestálé a nemají praktický význam. Sloučeniny  $\text{Fe}^{5+}$  a  $\text{Fe}^{6+}$  se využívají jako velmi silná oxidační činidla. V přírodě se vzácně vyskytuje i ryzí železo (ve vulkanitech). V oxidačních podmínkách je stabilní železo ve valenčním stavu  $\text{Fe}^{3+}$ , v redukčních podmínkách pak ve valenčním stavu  $\text{Fe}^{2+}$ . Běžné jsou i minerály obsahující  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ . Železo v nízkých valenčních stavech ( $\text{Fe}^0$ ) je možno využít jako redukční činidlo a železo ve vyšších valenčních stavech ( $\text{Fe}^{6+}$ ) jako činidlo oxidační. Změny valenčního stavu Fe jsou vedle oxidace organické hmoty hlavním procesem, který v přírodě generuje elektronový transfer. Při oxidaci jsou elektrony generovány a při redukci spotřebovávány.

Obsah rozpuštěných látek v podzemní vodě v podstatě určuje elektrický odpor prostředí, tedy i proudovou hustotu tj. množství elektronů, které lze do horninového prostředí předat při určitém napětí. Na elektrodách však při překročení tzv. praktického rozkladového napětí dochází k elektrolýze vody podle rovnic:

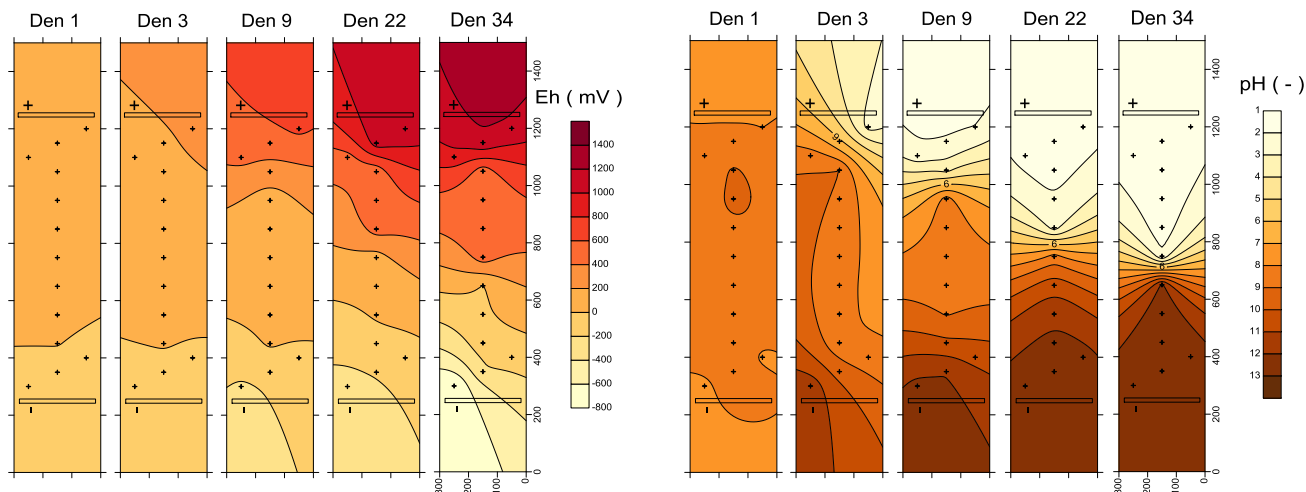


Na katodě při redukci vody vznikají hydroxidové ionty, které zvyšují pH a na anodě vznikají protony, které pH snižují. Tímto procesem se zvyšuje vodivost vody a snižuje odpor prostředí, což umožňuje zvýšení proudové hustoty v elektrickém poli. Funkce elektrodového materiálu je velmi diskutována především v elektrosyntézách organických sloučenin. Přímý transfer elektronů z katody do organické sloučeniny přednostně nastává při použití sp-kovů jako jsou: Pb, Hg, Sn, Ga, Tl, Zn, Cd, Bi, Al, In atd. Je známo, že největšího přepětí pro vylučování vodíku je dosaženo při použití těchto kovů. Absorpce vodíku na těchto sp-kovech obecně nebyla pozorována (popř. minimálně) a katodickou elektrosyntézu lze dobře kontrolovat vznikem oxoniových iontů, z nichž se vylučuje vodík na katodě. Použití sp-kovů také upřednostňuje produkci anionových radikálů a jejich sekundárních chemických reakcí vedoucích k hydromerizaci, katodickému párování a formování organometalických sloučenin. Oproti tomu nejnižší přepětí pro vylučování vodíku je pozorováno při použití d-kovů, které mají maximálně obsazené vnější d orbitály. Na těchto kovech, jako Pt, Ru, Ni, Pd, Rh, Fe, Co atd., je atom vodíku ochotně absorbován. Proto atomy vodíku sorbované na povrchu katody z d-kovu působí jako hydrogenační činidla.



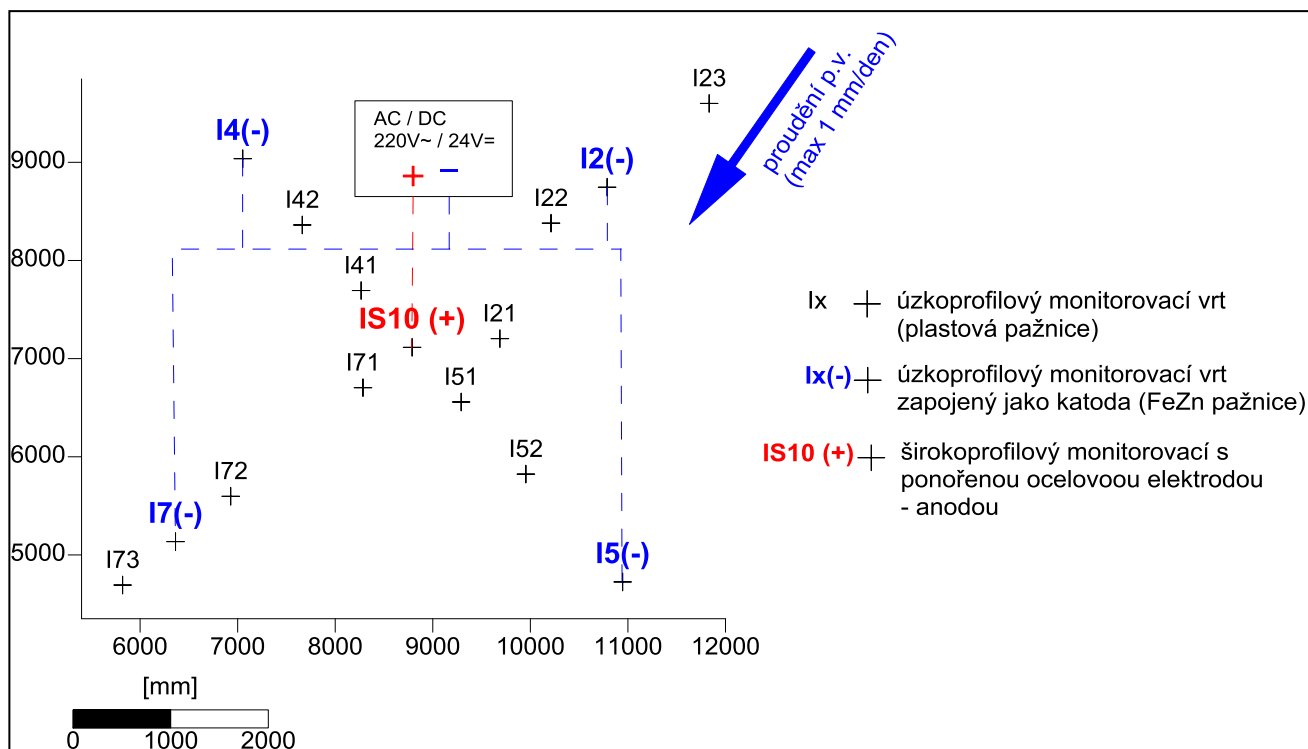
**Obr. 1: Závislost proudu na napětí**

Příklad procesu elektrolýzy vody a distribuce jejich produktů lze demonstrovat na výsledcích měření pH a Eh v neprůtočném 2D reaktoru [1]. Použity byly titanové elektrody, jako inertní náplň reaktoru skleněné kuličky a voda mineralizovaná NaCl. Z měření pH vyplývá pokles pH na anodě (až 1,2), nárůst pH na katodě (až 13,5) a postupné ustavení ostré hranice přibližně v centrální části reaktoru, kde dochází k neutralizaci produktů migrujících k opačně nabitým elektrodám. V případě oxidačně redukčního potenciálu není ostrá hranice vytvořena a oxidačně redukční potenciál se postupně mění.



**Obr. 2: Vývoj Eh a pH v neprůtočném 2D reaktoru**

Příklad procesu elektrolýzy vody a distribuce jejich produktů v horninovém prostředí lze demonstrovat na výsledcích provozu elektroredukce na pilotním polygonu [1]. Použity byly ocelové elektrody o délce 10 m penetrované do prostředí omezeně propustných písčito-prachovitých jííl. Použit byl AC/DC měnič o napětí 24 V a výkonu 300 W. Zapojení elektrod a umístění monitorovacích sond je znázorněno na následujícím obrázku.



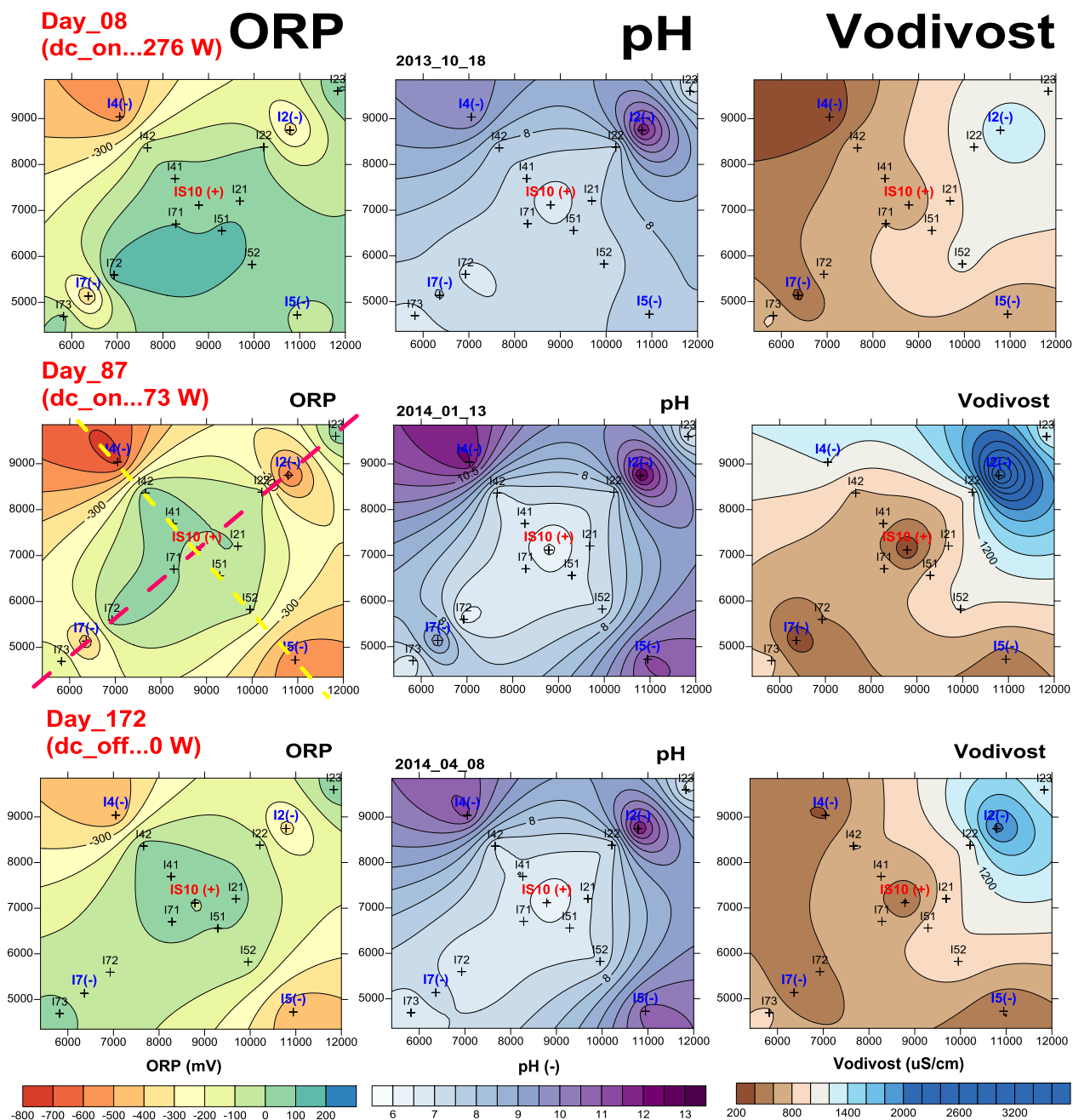
**Obr. 3: Zapojení elektrod a umístění monitorovacích sond v testovacím polygonu**

Výsledky dlouhodobého sledování jsou zpracovány na obrázku č. 4. Hodnoty Eh se mění prakticky okamžitě po zapojení elektrického proudu a to i pro napětí nižší než je napětí rozkladné. Tyto změny se poměrně rychle šíří horninovým prostředím (v daném případě nezávisle na vlivu proudění podzemní vody). Oproti tomu změny pH nastávají až po překročení rozkladného napětí, kdy dochází k elektrolytickému rozkladu podzemní vody, přičemž voda se změněným pH se následně šíří horninou vlivem disperze, elektromigrace a proudění podzemní vody. Šíření změn pH horninovým prostředím je tak v důsledku těchto dějů pomalejší. Rozdílné rychlosti šíření změn pH a Eh tak lze velmi efektivně využít pro optimální řízení oxidačně-redukčních podmínek pro daný typ sanačního činidla.

Podmínky Eh a pH se dlouhodobě stabilizují v celém polygonu přibližně na hranici oxidačních a redukčních podmínek a to mimo pole stability goethitu. Na katodě je dosahováno po překročení pH 11 pole stability  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  nebo  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ . Anoda u železných elektrod nedosahuje velmi nízkého pH a podmínky odpovídají poli stability rozpuštěného iontu  $\text{Fe}^{2+}$  (vytvoření redukčních podmínek). Tento stav je možno interpretovat nejen rozpouštěním anody a uvolňováním  $\text{Fe}^{2+}$  do podzemní vody, ale také postupným rozpouštěním železa z horninové matrice. V ošetřeném prostoru se tak postupně zvyšují obsahy rozpuštěného železa, které může vstupovat do reakcí s kontaminantem.

Po vypnutí stejnosměrného proudu (87 den po zahájení pokusu) má systém poměrně značnou setrvačnost, přičemž podstatně rychleji dochází k vyrovnávání hodnot Eh. Elektrony dopované v horninové matrici jsou postupně spotřebovávány. Vysoké hodnoty pH na katodách se snižují jen velmi pomalu a to v závislosti na reakci  $\text{OH}^-$  iontů s horninovou matricí, podzemní vodou a jejich difúzí do okolí.

Synergickým působením elektrického proudu, částic nanoželeza (dále nZVI) a přírodních částic dostupného Fe v horninové matrici je významnou měrou umocňován efekt redukčních procesů. Metoda je v současné době patentována a pozitivně odzkoušena na řadě lokalit v ČR. Jedním z přínosů metody je i ochrana povrchu částic železa před předčasnou oxidací a podstatné prodloužení životnosti reagentu. Dosahováno je tak hlubších redukčních podmínek po delší dobu. Dalším pozitivním efektem je nabití povrchu částic elektrony a snížení jejich zeta potenciálu. Je tak významnou měrou potlačena agregace částic a výrazně je zlepšena jejich migrační schopnost při aplikaci. Laboratorním výzkumem bylo prokázáno, že nZVI v elektrickém poli migruje k anodě a rozpuštěné ionty Fe následně migrují ke katodě.



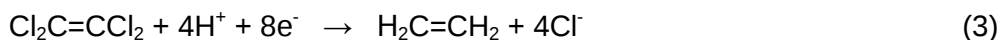
**Obr. 4:** Vývoj plošné distribuce měřených fyzikálně-chemických parametrů

## MOŽNOSTI NAsAZENÍ ELEKTROGEOCHEMICKÝCH METOD V SANAČNÍ PRAXI

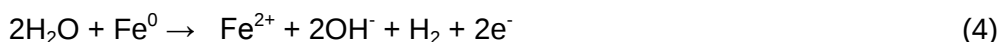
Elektrogeochemické procesy je možno nasadit v podstatě na dva základní typy kontaminantů. Na látky, které lze chemickými ději modifikovat (např. změnit jejich valenční stav – typicky redukce nebo oxidace kovů a jejich vysrážení z podzemní vody) a na látky, které lze rozložit nebo chemicky upravit (typický příkladem je oxidace nebo reduktivní dehalogenace CIE). Zatímco v případě koprecipitace kovů bude postupně docházet ke kolmataci horninového prostředí novotvořenými minerály, v případě hydrogenace CIE bude tento efekt minimální, neboť chemicky upravený kontaminant netvoří minerální fáze. Ty však mohou vznikat interakcí podzemní vody s horninovou maticí. Dalším limitem praktického nasazení je použití elektrodového materiálu. Využití některých kovů je vyloučeno z environmentálního důvodu (Hg, Pb, Cd atd.) jiných pak z ekonomických důvodů (Pt). Při použití nerezů je nutno zvážit uvolňování legovacích přísad (Cr, Mo atd.). V podstatě jediným bezproblémovým materiálem je ocel. Je však nutno počítat s anodickou korozí, která postupně způsobuje degradaci anody.

## ELEKTROGEOCHEMICKÉ DĚJE PŘI REDUKTIVNÍ DEHALOGENACI CHLOROVANÝCH ETHYLENŮ (CLE)

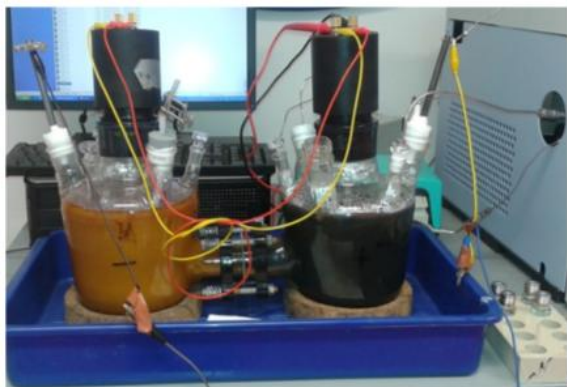
Reduktivní dehalogenace CIE je obecně vzato chemická reakce, jejíž podstatou je substituce atomů chloru ve struktuře CIE protony. Pro průběh reakce tetrachlorethylenu podle rovnice



je nezbytné vytvořit v horninovém prostředí vhodné podmínky, tedy přebytek elektronů a protonů (nascenčního vodíku). Pro tento účel se obvykle používá nZVI, jehož oxidací a reakcí s molekulami vody podle následujících rovnic se dosáhne požadovaného stavu

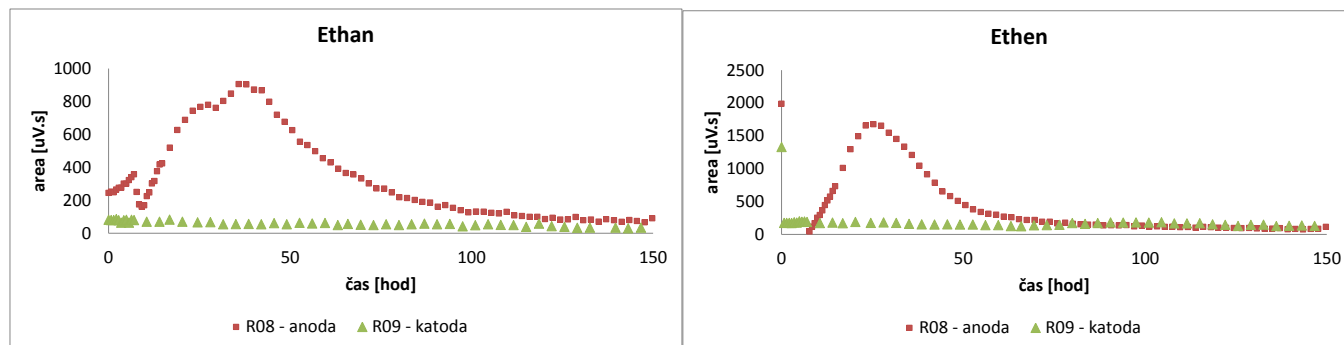


Podle výsledků laboratorních experimentů, které provedla Technická univerzita v Liberci [2] lze usuzovat, že rozhodujícím procesem pro dechloraci CIE není přímý kontakt molekuly CIE s nZVI, ale oxidace  $\text{Fe}^{2+}$  na  $\text{Fe}^{3+}$  doprovázená hydrolyzou vody. Při vhodné instrumentaci lze tento proces doložit. Na následujícím obrázku je vyhodnocen pokus na reaktoru s odděleným katodovým a anodovým prostorem (elektricky vodivou membránou) přímo napojeným na plynový chromatograf pro možnost stanovení produktů rozkladu.



**Obr. 5:** Fotografie dokumentující průběh reaktorových testů. Vlevo napojení reaktorů na plynový chromatograf, vpravo detail spojení katodového reaktoru (černá barva) a anodového reaktoru (rezavě hnědá barva) iontovýměnnou membránou.

V kontaminované vodě s přidávkou nZVI byly pozorovány rozkladné produkty CIE nikoliv na katodě, ale pouze na anodě a to v období intenzivního rozpouštění povrchu elektrody. V katodovém prostoru byly částice nZVI přebytkem elektronů (silně redukčním prostředím) chráněny před oxidací. Samotný kontakt s nZVI tedy nevedl ke vzniku rozkladných produktů. Z toho lze dovodit, že kontakt molekul CIE s nZVI za přítomnosti vodíku nezpůsobuje jejich hydrogenaci. Pro úspěšný průběh hydrogenace CIE je rozhodující, v aplikacích s využitím stejnosměrného pole, ustavení mírně redukčního prostředí přibližně na hranici mezi stabilitou  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  iontů.



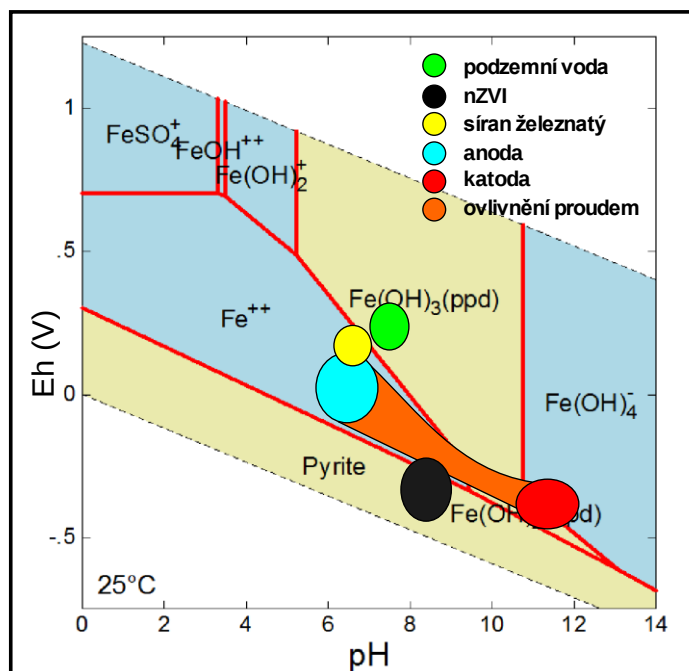
**Obr. 6:** Vývin rozkladných produktů dechlorace CIE v reaktoru

## ZÁKLADNÍ ASPEKTY APLIKACE ELEKTROGEOCHEMIE V PRAXI

Optimalizace studovaného procesu a jeho přenos do praxe je spojen s co nejvhodnějším nastavením geochemických podmínek na konkrétních lokalitách. Stanovena musí být vhodná dávka činidel, vhodná intenzita proudové hustoty a především, proces musí být řízen udržováním reakčních činidel v dostupném stavu i sledováním intenzity dodávky stejnosměrného elektrického proudu. První námi provedená praktická aplikace se datuje již do roku 2009 a metoda byla nasezena celkem na třinácti lokalitách, z toho na sedmi lokalitách jako nosná sanační metoda. K dispozici tak jsou poměrně rozsáhlá a ucelená data o chování kontaminovaných hydrogeologických struktur za různých provozních podmínek.

Podrobnější obraz o základních geochemických parametrech prostředí podávají diagramy Eh-pH, kde jsou jednotlivá měření promítnuta. Tvar polí je poněkud odlišný v rámci jednotlivých lokalit, ovšem lze zde nalézt zobecňující principy působení jednotlivých kombinací testovaných sanačních postupů. Neovlivněné podzemní vody vykazují většinou mírně oxidační podmínky a neutrální pH. Aplikace nZVI vede k prudkému poklesu Eh, někdy až ke hranici stability vody. Reagent je rychle vyčerpán a podmínky se opět vrací do mírně oxidačního stavu (kinetika děje je závislá na bilanci látek s oxidačním potenciálem přinášených do reakční zóny, nikoliv na úrovni kontaminace). Aplikace samotného síranu železnatého vede ke zdánlivě nepodstatným

změnám podmínek, avšak ve zkoumaných lokalitách došlo vždy k převedení reakční zóny do anoxických podmínek. Elektroredukce mění podmínky v reakční zóně v závislosti na pozici měřeného bodu od elektrod. Na katodě obvykle není dosaženo anoxických podmínek, vlivem nárůstu pH i při výrazném poklesu Eh. Na anodě naopak i přes nízký pokles Eh (a pokles pH) jsou anoxické podmínky dosaženy. Prostor anody a katody však představuje jen velmi malý podíl reakční zóny a zvláště navýšení pH je pozorováno jen v bezprostřední blízkosti katody. Důvodem je neutralizace  $\text{OH}^-$  iontů (vznikajících na katodě procesem elektrolýzy vody) horninovým prostředím i vlivem elektromigrace. Většina prostoru zóny ovlivněné elektrickým polem se nachází v anoxických podmínkách, tedy v podmínkách vhodných pro průběh reduktivní dehalogenace chlorovaných ethylenů.

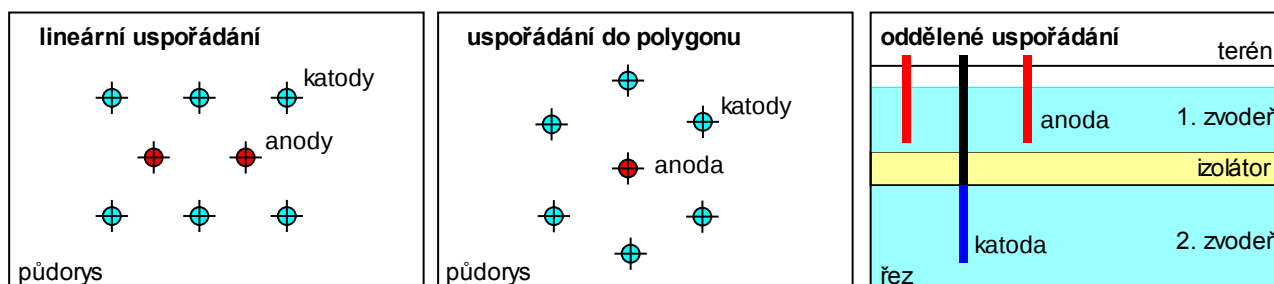


Obr. 7: Syntéza geochemických podmínek dosažených na lokalitách

Z výše uvedené syntézy je možno učinit několik zásadních závěrů:

- nZVI lze částečně nahradit jiným zdrojem železa, nicméně přítomnost nZVI urychluje dosažení vhodných geochemických podmínek v reakční zóně,
- aplikace síranu železnatého má vliv na dehalogenaci CIE a nezatěžuje dlouhodobě zveřejněným síranovým iontem, dehalogenace je podporována rozvojem bioty (sulfát redukujících bakterií),
- stejnosměrný elektrický proud je za určitých podmínek schopen zajistit běh reduktivní dehalogenace v katodovém i anodovém prostoru,
- stejnosměrný proud prochází i hydrogeologickými izolátory, respektive horninami s velmi omezeným prouděním podzemní vody, kde může iniciovat dehalogenaci CIE,
- kombinace nZVI, síranu železnatého a stejnosměrného proudu výraznou měrou zvyšuje intenzitu reduktivní dehalogenace.

Obecně je možno zapojení elektrického pole řešit z hlediska prostorové geometrie, řízení napětí stejnosměrného proudu a materiálu elektrod. Jako nejvhodnější materiál elektrod byla vyhodnocena ocel (11373) a to z hlediska její dostupnosti i ceny. Prostorové řešení bylo obvykle řešeno pro jednu hydrogeologickou polohu. V roce 2015 byl navržen zcela nový formát, kdy byly anody i katody umístěny do hydrogeologicky oddělených struktur. Jeden soubor elektrod byl umístěn do prvního zvodnělého horizontu a druhý soubor elektrod do hlouběji uložené zvodně oddělené izolátorem. Elektrické pole tak obsáhlo dvě, navzájem hydraulicky oddělené struktury. Schématický náčrt je uveden na následujícím obrázku. Pro provozní zapojení je vhodné vždy udržovat vyrovnanou katodovou a anodovou plochu.

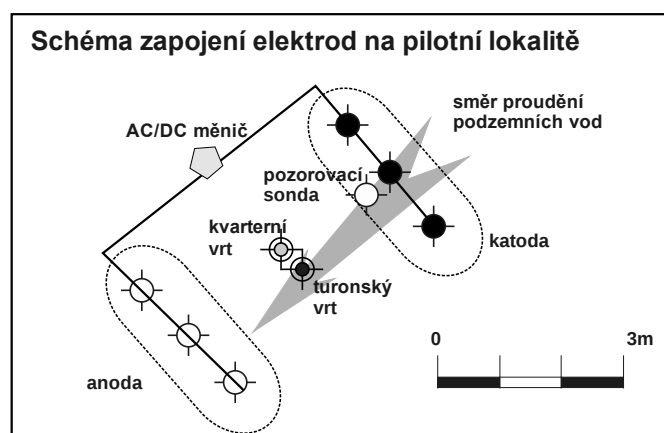


**Obr. 8: Schématické znázornění základních typů geometrie elektrického pole**

### **PŘÍKLAD VÝSLEDKU NAsAZENÍ ELEKTROGEOCHEMICKÝCH METOD NA LOKALITĚ KONTAMINOVANÉ CHLOROANÝMI ETHYLENY**

Na prezentované lokalitě [1] proběhla nejprve sanace za využití nZVI, avšak vzhledem k velmi omezené propustnosti horninového prostředí nesplňovaly dosahované výsledky očekávání, především z důvodu obtížné aplikace suspenze nZVI a její nerovnoměrné distribuci v horninovém prostředí. Z hydrogeologického hlediska je na lokalitě nejvýznamnější cenomanský kolektor. Jeho propustnost je průlinovo-puklinová, koeficient transmisivity dosahuje až  $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  a zvodně je v části svého profilu artézsky napjatá. Strop kolektoru je uložen cca 20 m pod terénem. Další zvodně je turonská, propustnost puklinová s koeficientem transmisivity v řádu  $10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . K dotaci zvodně dochází především přetokem mezi turonským a cenomanským kolektorem. První zvodně je kvartérní zvodně, která je vázaná na přeplavené písčito-prachovité jíly. Propustnost je průlinová a velmi nízká, koeficient transmisivity je řádově  $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Kontaminace CIE se vyskytovala ve všech třech zvodních s maximem výskytu v kvartéru.

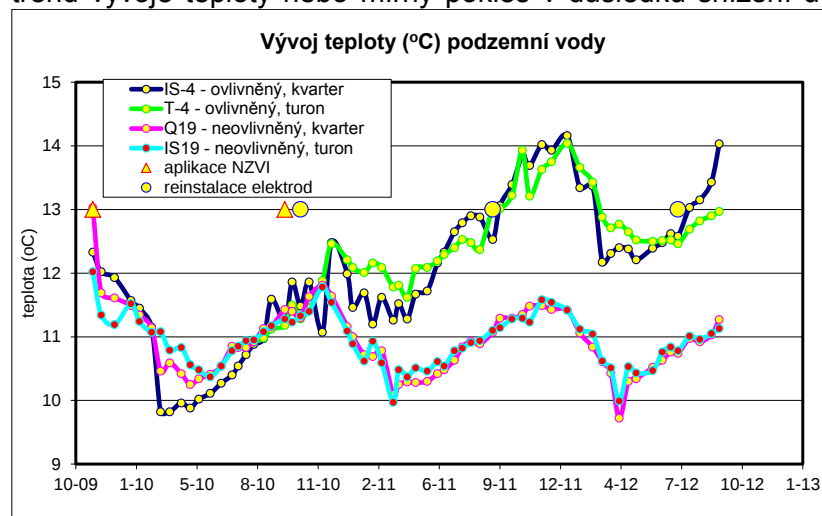
K sanačně monitorovacím vrtům (dvojčatům – kdy je jeden vrt vystrojený do kvartéru a druhý do turonu s odizolovaným kvartérem) byly ve vzdálenosti 2 m proti směru proudění podzemní vody,



umístěny tři katody a po směru proudění tři anody v liniích kolmých na směr proudění podzemní vody. Jako elektrody byly použity 10 m dlouhé ocelové tyče o průměru 20 mm. Aby mohly být odebírány vzorky podzemní vody za účelem měření koncentrací CIU a změn chemizmu v blízkosti katodového prostoru, byly ve vzdálenosti 20 cm po směru proudění podzemní vody od střední katody umístěny pozorovací sondy (trubky o průměru 28 mm perforované do výšky 3 m ode dna). Tyče i trubky byly penetrovány přiklepovým kladivem. Následně byla provedena instalace zdroje DC napětí. Elektrické zdroje byly nastaveny jako napěťové s konstantní hodnotou napětí.

**Obr. 9: Schéma zapojení elektrod na jednom ze sanačních polygonů**

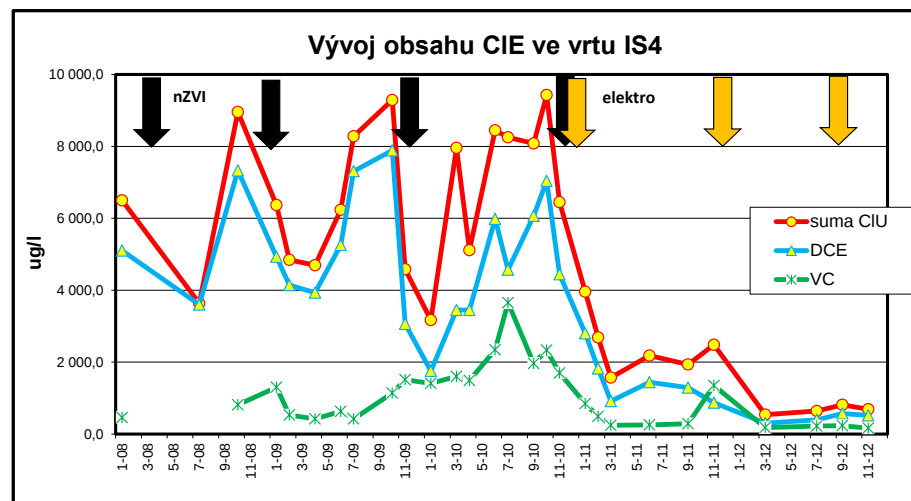
Stejnoseměrný proud, způsobuje mírné prohřívání podzemní vody, přestože má relativně nízkou proudovou hustotu. Po zapojení polygonů byl zachycen nárůst teploty až o 2 °C. Následoval setrvalý trend vývoje teploty nebo mírný pokles v důsledku snížení účinnosti metody vlivem degradace anody.



Největší rozdíl teplot ovlivněného a neovlivněného prostoru je pozorován v jarním období, kdy teplota vody obecně klesá. Maximální rozdíl byl zjištěn až o 5 °C. Růst teplot je přímo úměrný proudové hustotě na polygonech, respektive stupni degradace anody. Ačkoliv jsou elektrody zavedeny do kvartérního kolektoru, teplota se zvyšuje i v turonském kolektoru, přičemž mezi ovlivněnými zvodněmi není příliš velký rozdíl. Je tedy zřejmé, že vliv elektrického pole dosahuje i do podložní zvodně mimo přímý prostor instalace elektrod.

**Obr. 10: Ovlivnění teploty podzemní vody dotací DC proudu**

Na všech polygonech byl jednoznačně prokázán pokles měřených koncentrací CIE v souvislosti se zapojením stejnosměrného proudu. Aplikací samotného nZVI došlo na lokalitě k poměrně rychlé dechloraci PCE na DCE. Přičemž absolutní výše koncentrací sumy CIE se v ohniscích spíše zvýšila. Následovalo období stagnace koncentrací, které se nepodařilo změnit ani další aplikací nZVI. Vždy došlo k dočasnému snížení koncentrací a jejímu opětovnému nárůstu po vyčerpání redukční kapacity nZVI. Tento vývoj koncentrací je běžný na lokalitách ošetřených nZVI, v případě značné zásoby kontaminantu vázaného na horninovou matici. Absolutní výše maxim se na některých vrtech snižovala



**Obr. 11: Vývoj koncentrací CIE na jednom ze sanačních polygonů**

Použitím stejnosměrného proudu dochází ke změně geochemických podmínek v horninovém prostředí. Zásadní skutečností je pravděpodobně fakt, že Eh-pH podmínky prostředí se posunou mimo pole stability goethitu, což je neobvyklejší minerální fáze  $\text{Fe}^{3+}$ . Tato fáze je za běžných podmínek nerozpustná. Elektrické pole udržuje nZVI a produkty jeho rozkladu v polích stability  $\text{Fe}^{2+}$ , což umožňuje prodloužení doby aktivity nZVI ve struktuře. Geochemické podmínky odpovídají na monitorovacích vrtech této lokality nejčastěji poli stability  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2^-$  a v blízkosti katod  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ . V podzemní vodě na lokalitě není zastoupen síranový aniont a to z důvodu jeho odstranění vznikem sulfidu již v první fázi sanace. Část  $\text{Fe}^{2+}$  je zachycena do struktury pyritu a to včetně síranů přitékajících podzemní vodou do ošetřeného prostoru. V daném prostředí je voda v kontaktu se slínovci a produkty jejich zvětvávání, je tedy významně obohacena o karbonátový iont. Z hlediska konečné cílové minerální fáze se do

(v prostoru ohnisek) nebo i rostla (ve vrtech po směru proudění) v důsledku vyšší mobility DCE. Vyšší hodnoty vykazoval i VC. Po zapojení stejnosměrného proudu došlo na naprosté většině polygonů k prudkému poklesu hodnot sumy CIE (DCE i VC). Jedná se o koncentrace na monitorovacích vrtech, které nebyly přímo používány k zasakování reaktantů a jsou umístěny mezi elektrodami. To prokazuje plošné snížení koncentrací v celém ošetřeném prostoru.

horninového prostředí dotované železo transformuje vedle pyritu na magnetit, siderit a není vyloučen ani výskyt hydroxidu železnatého, jak vyplývá z výsledků laboratorních experimentů. Poslední dva jmenované minerály jsou při poklesu pH do běžných hodnot částečně rozpustné, takže mohou zpětně dotovat prostředí ionty  $\text{Fe}^{2+}$ , jež mají významnou úlohu v procesu reduktivní dechlorace CIE.

## **Závěr**

Elektrogeochemické procesy jako zcela nový prvek sanačních technologií mohou mít značný aplikační potenciál a to nejen v případě sanace CIE. Lze je přitom nasadit i na lokalitách se složitými geologickými podmínkami, kde je hydraulický zásah neefektivní nebo nespolehlivý. Jedná se však o poměrně sofistikovaný systém, kde úspěšná realizace předpokládá dokonalé zvládnutí managementu sanace a jeho optimalizaci na konkrétní podmínky lokality, které se navíc dynamicky mění při zapojení elektrického pole i při aplikaci pomocných reagentů.

V případě sanace CIE lze elektrogeochemickými procesy podstatně urychlit nejen dobu nutnou na průběh reduktivní dechlorace, ale také významně snížit potřebnou dávku pomocných reagentů – především finančně nákladného nZVI. To vede k celkovému zlevnění sanačního zásahu. Využít lze i další prokázané efekty. Provozně významné je urychlení transportu nZVI i produktů jeho oxidace v elektrickém poli a zajištění homogenní distribuce nZVI v požadovaném prostoru potlačením agregace částic. Vhodným uspořádáním elektrod lze urychlit migraci nebo naopak stabilizovat částice v předem zvoleném místě. Tohoto efektu lze například využít při provozu difúzních reaktivních bariér, které mohou provozně spolehlivě nahradit hydraulické bariéry v některých lokalitách. Významná je i podpora bioty schopné degradace CIE (především síran redukujících bakterií), avšak jen při vhodných proudových hustotách.

Elektrogeochemické procesy umožňují i efektivní aplikaci méně reaktivních částic železa (mikroželezo, makroželezo), jelikož se zde uplatňuje synergické působení dodávaných elektronů a rozpouštěných částic železa. Tento proces je nejlépe uplatnitelný v geochemických bariérách nebo při intenzifikaci provozu nebo oživení již nefunkčních reaktivních bran na bázi makroželeza.

## **Literatura**

- [1] Hrabal J., Nosek J. et al., 2014: Závěrečná zpráva projektu TAČR TA01021304 - Použití elektrického proudu k sanaci lokalit kontaminovaných organickými látkami
- [2] Beneš P., Hrabal J., Nosek J. et al., 2017: Průběžná zpráva projektu TAČR TA04020431 - Pokročilé in situ sanační technologie podporované elektrickým polem

## **Poděkování**

Tato práce je realizována za podpory prostředků Technologické agentury České republiky, v rámci projektu „Použití elektrického pole k sanaci lokalit kontaminovaných organickými látkami“ č. TA01021304 a „Pokročilé in situ sanační technologie podporované elektrickým polem“ č. TA04020431.