

Automatizovaný cirkulační systém sanace podzemních vod

RNDr. Jan Němeček, Ph.D., ENCON s.r.o. (nemecek@enacon.cz), **Ing. Petr Pokorný**, ENCON s.r.o., **Ing. Dr. Libor Novák**, PRO-AQUA CZ, s.r.o., **Vladimír Janeček**, PRO-AQUA CZ, s.r.o., **Mgr. Pavel Hrabák, Ph.D.**, Technická univerzita v Liberci, **Ing. Lucie Jiříčková**, Technická univerzita v Liberci,

Souhrn

Vyvíjený cirkulační systém umožňuje aktivní a dálkově řízený způsob dávkování činidel do horninového prostředí, který vede k rovnoměrnější distribuci činidel a v konečném důsledku k omezení opětovného nárůstu koncentrace kontaminantu, dále ke kratší době potřebné k dosažení cílových koncentrací kontaminantu a k snížení množství dávkovaných činidel. On-line monitoring klíčových parametrů a dálkové ovládání sanačního systému umožňuje řešiteli rychle reagovat na vývoj situace a zefektivnit sanační proces. Celý systém je v současnosti testován poloprovozní zkouškou na lokalitě znečištěné chlorovanými uhlovodíky. Cirkulační systém je touto poloprovozní zkouškou používán k distribuci fermentujícího substrátu pro biologickou reduktivní dechloraci chlorovaných uhlovodíků. Výsledky poloprovozní zkoušky vykazují velmi dobrou účinnost a možnosti využití této technologie v sanační praxi.

Klíčová slova: in-situ sanace, distribuce reakčních činidel, cirkulace, automatizace, znečištění podzemních vod, chlorované uhlovodíky

Úvod

Účinnost in-situ sanačních technologií významně závisí na dosažené distribuci chemického činidla nebo, v případě biologických technologií, substrátu či nutrientů v kontaminovaném horninovém prostředí. Vyvíjený cirkulační systém má za cíl zajistit optimální distribuci těchto činidel v sanovaném zvodněném horninovém prostředí. Systém je založen na řízené cirkulaci podzemních vod s dávkováním substrátu (činidla). Cirkulace, tedy zasakování a čerpání při změnách scénáře aktivních injektážních a čerpaných vrtů vyvolá změny proudového systému, která způsobí rozšíření substrátu i do stagnačních zón nebo zón s omezenou propustností a tím rovnoměrnější distribuci činidla. Zamezí se tak nežádoucímu opětovnému nárůstu koncentrací kontaminantu po odeznění účinku činidla a omezí se tak množství činidla opakovaně dávkovaného na potlačení tohoto efektu. Sanační systém rovněž umožňuje on-line monitoring klíčových parametrů systému a jeho dálkové ovládání. Řešitel tak může rychle reagovat na vývoj situace – „na dálku“ upravovat čerpaná/vsakovaná množství, vypínat či zapínat čerpané/injektážní vrty, dávkování substrátu, apod.

Příspěvek popisuje vyvíjený systém a prezentuje dosavadní výsledky poloprovozní zkoušky.

Popis automatizovaného systému sanace

Systém se skládá z:

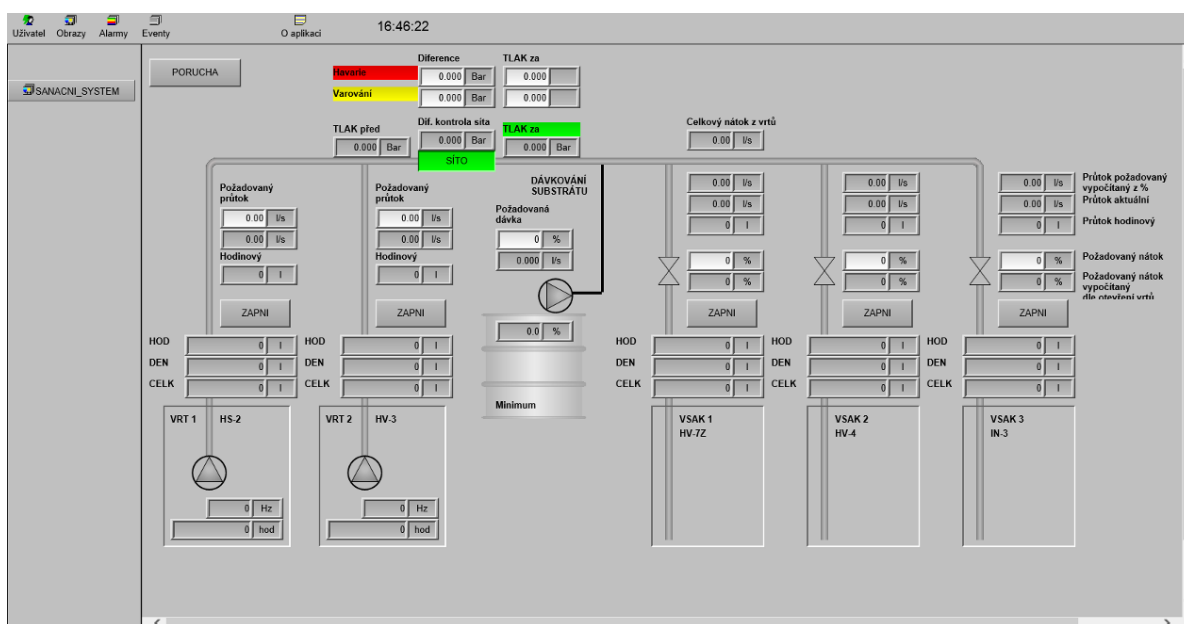
- injektážních vrtů,
- čerpacích vrtů,
- ponorných čerpadel v čerpacích vrtech,
- dávkovacího čerpadla na činidlo,
- filtru jemných částic,
- zásobní nádrže na substrát,
- potrubních rozvodů, včetně kulových a vzorkovacích ventilů,

- měřících aparatur (vodoměry, tlakoměry, měření hladiny v zásobní nádrži),
- elektrorozvodů,
- řídicí jednotky, a
- dispečerského pracoviště.

Řízení technologického procesu je plně automatické. Pro řízení a monitorování technologického procesu byl zvolen řídicí systém PLC firmy SIEMENS z řady S7-1200, který zaručuje provoz technologie s minimálními nároky na obsluhu a umožňuje rozšiřování monitorovaných úseků technologie.

Z provozu automatizovaného cirkulačního systému jsou snímány důležité provozní a poruchové stavy, potřebné jak pro samotné řízení chodu technologie, tak i pro zaznamenávání údajů vypovídajících o funkci zařízení: hladina v čerpacích vrtech, hladina v nádrži na činidlo, čerpané množství z vrtů, čerpané množství činidla, tlak před a za filtrem pevných částic, porucha a chod čerpadel ve vrtech a dávkovacích čerpadel, výpadek fáze. Systém umožňuje automaticky reagovat na tyto stavy, např. vypnutí čerpání/vtláčení v případě překročení předem nastavené kritické difference tlaku před a za filtrem pevných částic (indikace ucpání filtru) nebo kritického tlaku za filtrem (indikace ucpání injektážního vrtu).

Softwarový systém PROMOTIC umožňuje na vzdáleném PC počítači nebo mobilním telefonu interaktivnímu ovládání, povelování a sledování procesu, včetně grafických průběhů vybraných veličin.



Obr. 1: Obrazovka dispečerského pracoviště

Poloprovozní zkouška

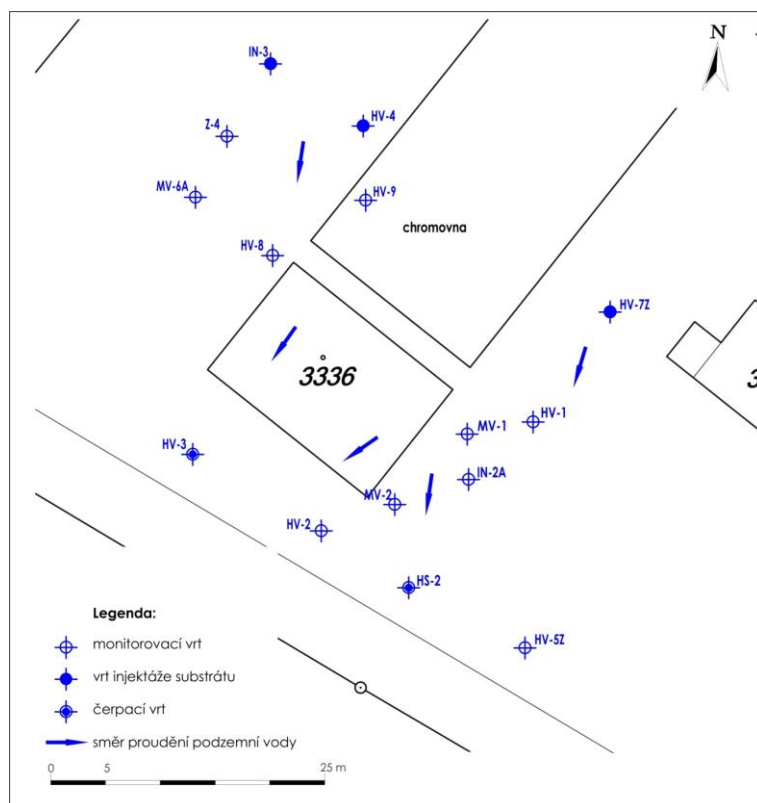
Uspořádání zkoušky

Vyvíjený systém je testován na lokalitě znečištěné chlorovanými etheny (CIU-Eth). Jedná se o dobře propustný kvartérní šterkopískový kolektor mocný 4 m, překrytý cca 5 m mocnou vrstvou povodňových hlín. Před zahájením poloprovozní zkoušky se koncentrace primárního kontaminantu – trichlorethenu (TCE) v podzemní vodě oblasti pohybovala v širokém rozmezí od úrovně pod mezí laboratorní stanovitelnosti ($<1,0 \mu\text{g/l}$) ve vrtech v jv. části oblasti v důsledku v minulosti proběhlé sanace in-situ až po úroveň v řádu vyšších tisíců $\mu\text{g/l}$. Výchozí stav koncentrací TCE je znázorněn na Obr. 3 nahoře.

Jako sanační technologie pro odstranění znečištění chlorovanými etheny byla zvolena metoda biologické reduktivní dechlorace (BRD), při které dochází k sekvenční hydrogenolýze, tedy substituci

vodíku za atom chlóru a zároveň k redukci uhlíku v molekule chlorovaného ethenu elektronem poskytnutým donorem. Donorem elektronu (a vodíku) je molekulární vodík produkovaný fermentací organických látek přirozeně se vyskytujících nebo účelově do zvodněného prostředí aplikovaných. Jako substrát produkující donor elektronu (vodík) byla zvolena syrovátka. Testovaný automatizovaný cirkulační systém tedy slouží k aplikaci substrátu (případně i jiných živin) do kontaminované zvodně a jeho co nejlepší distribuci.

Cirkulační systém se sestává z 2 čerpacích vrtů a 3 injektážních vrtů a dalších prvků popsanych výše. Podzemní voda byla jímána z čerpacích vrtů a po obohacení syrovátkou (v poměru 1:50) zasakována do injektážních vrtů situovaných proti směru proudění podzemních vod. Opakovaně byl scénář čerpání a vtlačení měněn (zapínání a vypínání jednotlivých vrtů). Cirkulace podzemní vody pokračovala po dobu 10 dnů i po ukončení dávkování syrovátky pro její distribuci v prostoru vymezeném cirkulačními vrti. V roce 2015 bylo aplikováno 11,4 m³ syrovátky a odčerpáno a zpětně injektováno 3500 m³ podzemní vody (zkouška bude pokračovat i v roce 2016).



Obr. 2: Rozmístění vrtů poloprovozní zkoušky

Během poloprovozní zkoušky jsou v pozorovacích vrtech sledovány fyzikálně-chemické parametry podzemní vody (teplota, ORP, vodivost a pH) a odebrané vzorky vod analyzovány na obsahy TOC, základní kationty a anionty, CIU-Eth a plyny (ethan, ethen, methan). Ve vzorcích vybraných vrtů jsou navíc ještě stanovovány obsahy sulfanu a formem uhlíčanů.

Výsledky

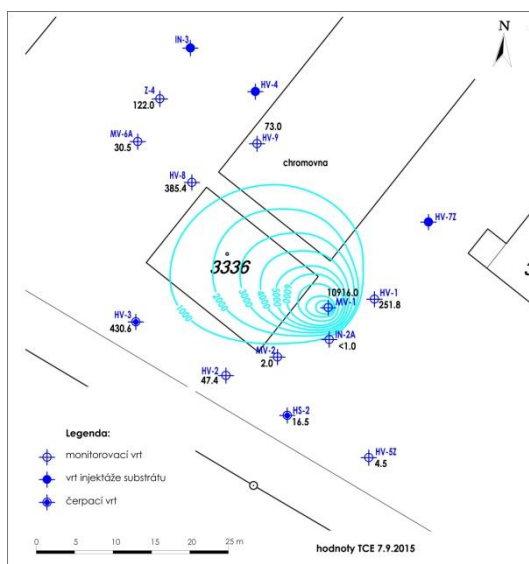
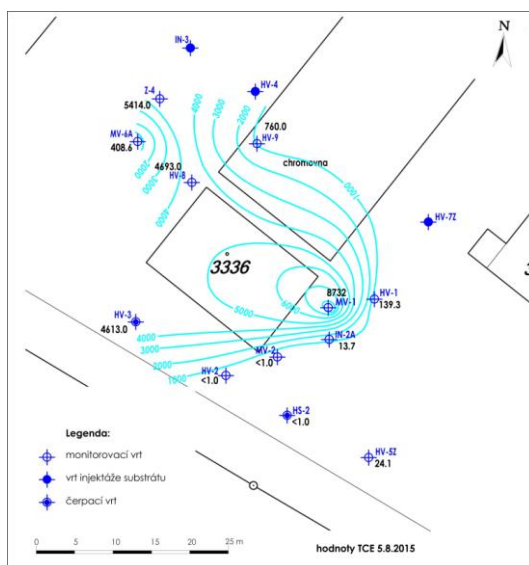
Výsledky poloprovozní zkoušky lze shrnout takto:

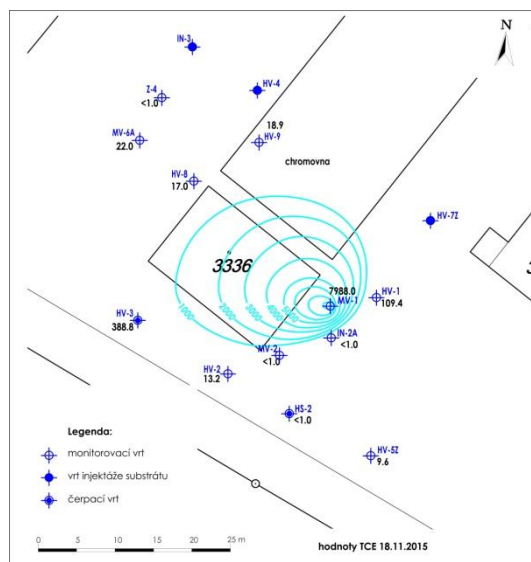
Systém v dosavadním průběhu poloprovozního testu vykázal prakticky nulovou poruchovost. Dílčí neprojektové stavy byly odstraněny při náběhu systému.

Podle výsledků prováděného monitoringu se aplikovaný substrát rozšířil v celé oblasti poloprovozní zkoušky. Pouze v prostoru vrtu MV-1 byla dotace substrátu omezená pravděpodobně v důsledku lokální heterogenity prostředí, omezené hltnosti injektážního vrtu HV-7Z a jeho pozice (optimální pozici brání existence budov a podzemních inženýrských sítí).

Distribuce substrátu se projevila ve změně celé řady sledovaných parametrů (Eh, obsah Fe, Mn, dusičnanů síranů, methanu) detekujících posun fyzikálně-chemických poměrů zvodně do podmínek optimálních pro biologickou hydrogenolýzu CIU-Eth.

Biologickou hydrogenolýzou došlo během cca 3 měsíců k výrazné dechloraci CIU-Eth z TCE na níže chlorované etheny a dále až na nechlorované a netoxické ethen a ethan. Nejvýraznější rozklad TCE byl pozorován v objektech Z-4 a HV-8 v západní části oblasti, kde pokles koncentrace TCE 98. den poloprovozní zkoušky činil >99,98%, resp. 99,53%. Významná účinnost byla pozorována i dále ve směru proudění podzemní vody v čerpacím vrtu HV-3, kde pokles koncentrace za stejné období činil 91,57%. Minimální pokles koncentrace TCE byl zatím pozorován ve vrtu MV-1 (8,5%) a v sousedním vrtu HV-1 (21,46%) kam se dosud substrát nerozšířil v dostatečné míře.





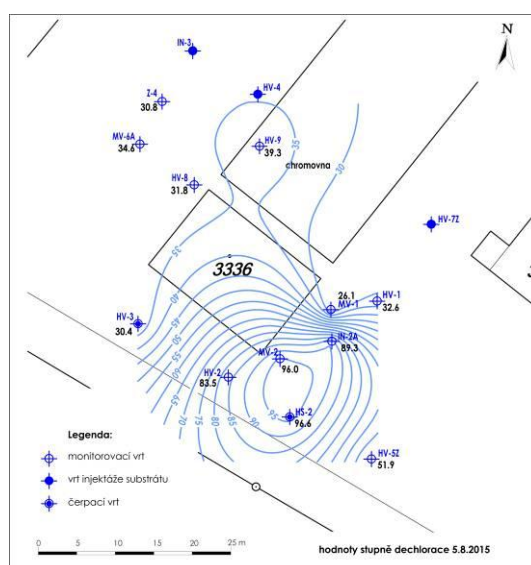
Obr.3: Obsah TCE v podzemní vodě před (nahore), 26. den (uprostřed) a 98. den (dole) poloprovozní zkoušky.

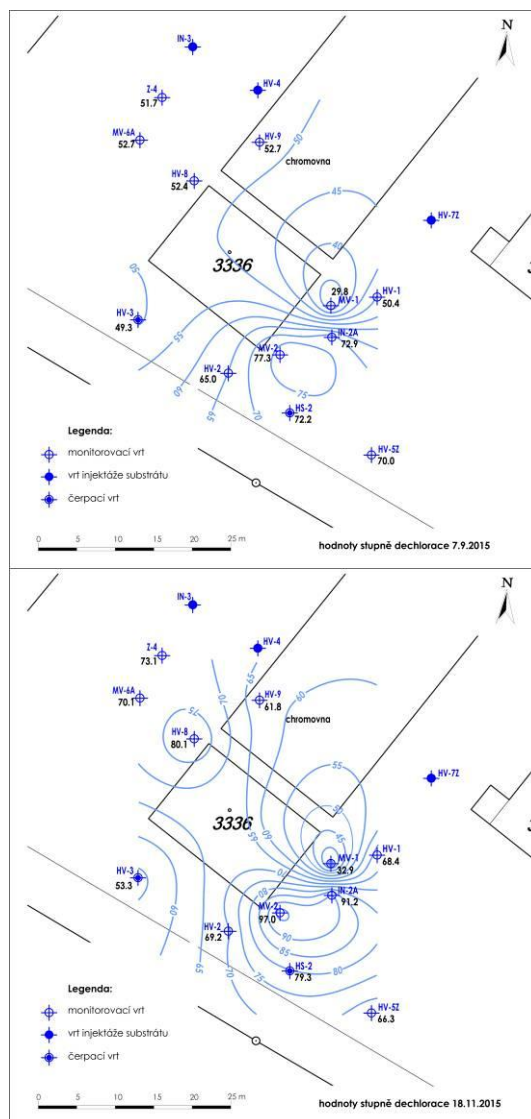
Postupná dechlorace CIU-Eth z matečného TCE přes níže chlorované etheny až na nechlorovaný ethen a ethan je patrná na Obr. 4 vyjadřujícím vývoj stupně dechlorace, který je definován vztahem (Sinke et al. 2001):

$$\frac{[TCE] + 2[cis - DCE] + 3[VC] + 4[ethen] + 4[ethan]}{4 \times ([PCE] + [TCE] + [cis - DCE] + [VC] + [ethen] + [ethan])} \times 100\%$$

kde [kontaminant] představuje molární koncentraci (mmol/l) jednotlivých kontaminantů.

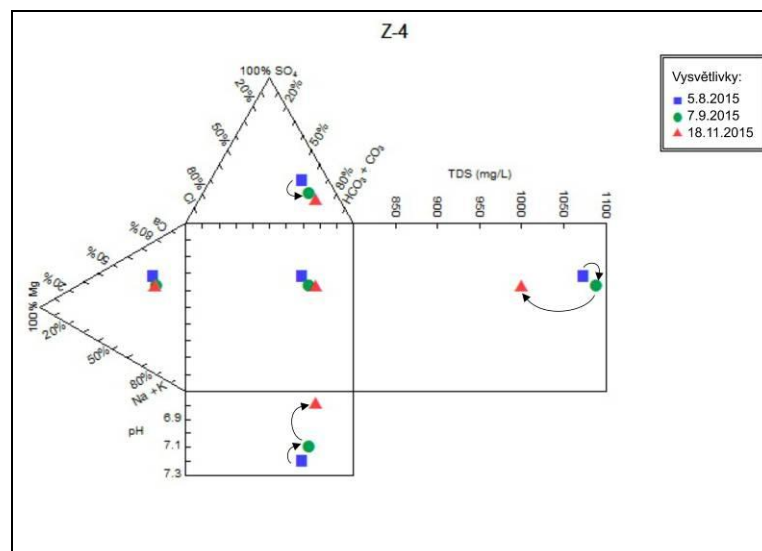
Aplikace substrátu a jeho distribuce automatizovaným cirkulačním systémem vedl k výraznému nárůstu stupně dechlorace na hodnoty převážně překračující 50% (26. den), resp. 60% (98. den poloprovozní zkoušky).





Obr. 4: Stupeň dechlorace CIU-Eth v podzemní vodě před (nahore), 26. den (uprostřed) a 98. den (dole) poloprovodní zkoušky.

Nebyly pozorovány výrazné změny v základním chemickém složení podzemní vody, viz Durovův graf pro podzemní vodu vrtu Z-4 na Obr. 5. Po aplikaci substrátu došlo ke změnám, které souvisí s vyvolanou intenzifikací mikrobiálních procesů - tedy k vyčerpání rozpuštěných terminálních akceptorů elektronu (především síranu) a nárůstu koncentrace některých rozpuštěných kovů (manganu, v menší míře železa) v důsledku jejich mikrobiální redukce. Tyto změny generelně způsobily pokles celkové mineralizace podzemních vod, nedošlo však ke změně hydrochemického typu podzemní vody.



Obr. 5: Durovův diagram popisující vývoj hydrochemických vlastností podzemní vody ve vrtu Z-4

Závěr

Vyvíjený automatizovaný cirkulační systém sanace v dosavadním průběhu poloprovozním testu vykázal prakticky nulovou poruchovost. Dílčí neprojektové stavy byly odstraněny při náběhu systému. Během prvních cca 3 měsíců poloprovozní zkoušky došlo k distribuci substrátu prakticky v celé oblasti poloprovozní zkoušky a k navození podmínek pro biologickou hydrogenolýzu (rozklad) CIU-Eth. To bylo potvrzeno vývojem celé řady sledovaných fyzikálních i chemických parametrů. Ukazuje se, že tato technologie má potenciál uplatnění v sanační praxi s pozitivním dopadem na rychlost a trvalost dosažení cílových koncentrací sanace, množství aplikovaných reakčních činidel a na celkové náklady.

Poděkování

Předmětná technologie je vyvíjena a testována v rámci výzkumného projektu č.TA04021725. Projekt je řešen za podpory Technologické agentury v rámci programu Alfa 4.

Literatura

Sinke A.J.C., Heimovaara, T.J., Tonnaer, H., a Van Veen, J.H. (2001): Simple Natural Attenuation System – SINAS demo software . TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation in collaboration with IWACO and TAUW. TNO-MEP, Apeldoorn, The Netherlands