

SANÁCIA KONTAMINOVANÝCH VODNÝCH ZDROJOV PODZEMNÝCH VÔD

RNDr. Miroslav Holubec, CSc.

Výskumný ústav vodného hospodárstva, Bratislava, Slovensko

1. ÚVOD

Najvýznamnejšie zdroje podzemnej vody v SR sa nachádzajú v horninových prostrediach alúvií riek. Pre toto horninové prostredie sú charakteristické vysoké koeficienty filtrácie a nízke obsahy ílovitých častíc, ktoré sa významne podieľajú na samočistiacich procesoch a zmenách kvality podzemnej vody. Preto sú tieto zdroje citlivé na vplyv antropogénnej činnosti. Ochrana týchto vodných zdrojov je jednou z najdôležitejších úloh vodného hospodárstva v SR a zabezpečenia kvalitnej pitnej vody. Aj z tohto dôvodu je v záujme nielen vodohospodárov a ochrancov životného prostredia, ale celej spoločnosti venovať zachovaniu a zlepšeniu ich kvality prioritnú pozornosť. Užívateľmi vodných zdrojov sú nielen podniky VaK, ale aj poľnohospodárske a priemyselné podniky, využíva sa nielen na hromadné, ale aj na individuálne zásobovanie. Vodné zdroje v tejto oblasti sú jednou podmienkou hospodárskeho rozvoja danej oblasti. Prienik kontaminantov, predovšetkým organických látok, do podzemných vôd v nasýtenej a nenasýtenej zóne znehodnocuje tento zložitý ekosystém a v rozhodujúcej miere ovplyvňuje jej kvalitu. Na druhej strane je kontaminácia podzemných vôd výsledkom vplyvu nielen samotnej kontaminujúcej látky a jej fyzikálno-chemických vlastností, ale aj procesov, ktoré ju sprevádzajú.

Sanačné práce zamerané na riešenie kontaminácie sú nevyhnutné pre priblíženie daného ekosystému k pôvodnému stavu a obnoveniu prirodzenej ekologickej rovnováhy.

2. MOŽNOSTI RIEŠENIA.

Význam, ktorý sa v posledných rokoch prikladá problémom ochrany a nápravy životného prostredia nebol adekvátne sprevádzaný vývojom technológií pre odstraňovanie negatívnych následkov. Tento problém je zvlášť zložitý v prípade pretrvávania kontaminovaných látok v ekosystéme podzemných vôd, čo vyplýva predovšetkým z možnosti ich transformácie počas migrácie vplyvom viacerých procesov. To vedie nielen k zmene zastúpenia jednotlivých zlúčenín vplyvom ich rozličnej mobility v danom prírodnom prostredí, ale aj k štrukturálnym zmenám samotných molekúl a obtiažnosti ich analytickej identifikácie a kvantifikácie.

Vo všeobecnosti je možné pre ochranu podzemných vôd použiť nasledovné spôsoby:

- legislatívne opatrenia pre zníženie stupňa antropogénneho pôsobenia,
- rozširovanie ochranných pásiem I. a II. stupňa,
- technické zásahy pre ochranu vodných zdrojov (hydraulické, sorpčné, oxidačné clony),
- budovanie úpravní vôd alebo dobudovanie ďalších technologických stupňov.

Pri analýze ochranných opatrení a upravitelnosti podzemných vôd je potrebné posudzovať predovšetkým nasledovné možnosti riešenia:

- zníženie stupňa kontaminácie
 - zníženie vypúšťania odpadových vôd do povrchových tokov
 - likvidácia bodových zdrojov znečistenia
 - zníženie plošného zaťaženia podzemných vôd v riešenom regióne

b) technické opatrenia

- realizácia nepriepustných stien
- realizácia sorpčných clôn
- realizácia oxidačných clôn

c) úpravou vody

- vybudovanie novej úpravne
- intenzifikácia a optimalizáciou existujúcich úpravní
- prestavba technológie
- kombinácia úpravy vody in situ a prestavby technológie

Zníženie stupňa kontaminácie je možné dosiahnuť predovšetkým dôsledným uplatnením legislatívnych nástrojov prostredníctvom príslušných štátnych úradov. Legislatívne opatrenia umožňujú riešiť problémy z dlhodobého hľadiska, ale ich účinok sa prejaví až po dlhšom čase. Sú však najlacnejším opatrením preventívneho typu. Treba si však tiež uvedomiť, že rozširovanie ochranných pásiem I. a II. stupňa vzhľadom na silné strety záujmov je možné realizovať len vo výnimočných prípadoch.

Aktuálnosť problémov kvality podzemnej vody vedie k potrebe spracovať a pripraviť opatrenia pre ochranu vybudovaných vodných zdrojov. Ako perspektívne riešenia sú v odbornej verejnosti akceptované predovšetkým dva základné spôsoby :

- ochrana oxidačnými clonami
- ochrana sorpčnými clonami.

Zatiaľ čo prvý spôsob je teoreticky rozpracovaný a v praxi aplikovaný ako technologický prvok - úprava vody in situ - vo viacerých lokalitách (Rusovce-Ostrovne lúčky, Topoľany, Michalovce, Topoľníky atď.) tak ochrana líniovými oxidačnými, nepriepustnými, sorpčnými a biosorpčnými clonami sú nové spôsoby, u nás ani vo svete nerealizované.

3. OXIDAČNÉ CLONY

Znalosť procesov transformácie látok vplyvom respirácie viedla v posledných rokoch k ich využitiu na odstraňovanie anorganických a organických látok metódami úpravy vody in situ. Spočiatku sa jednalo len o odstraňovanie železa, mangánu, amónnych iónov, sírovodíka využitím chemickej oxidácie kyslíkom. Neskôr sa preukázalo, že aj tieto procesy sa odohrávajú za spoluúčasti mikroorganizmov.

Aplikácia technických zásahov pre ochranu vodných zdrojov, ktoré sú hlavným predmetom tohto príspevku, nie je zatiaľ u nás, a na základe spracovanej literárnej rešerše ani vo svete, využívaná i keď umožňuje vo výraznej miere eliminovať negatívne vplyvy antropogénneho znečistenia. Je založená na zvýšení a stimulácii prirodzenej ochrany podzemných vôd, zvyšovaním a stimuláciou pôsobenia prirodzených procesov podieľajúcich sa na imobilizácii a mineralizácii kontaminujúcich látok, ako aj na zamedzení sekundárneho zhoršovania kvality podzemnej vody rozpúšťaním niektorých zložiek minerálov tvoriacich horninové prostredie v nasýtenej zóne podzemných vôd. Ako účinné technické zásahy je možné použiť imobilizáciu kontaminantov pomocou sorbentov ultrastabilných vo vodnom prostredí, zvýšenie oxidačno-redukčného potenciálu pomocou prísunu kyslíka alebo iného oxidačného činidla, zvýšenie doby zdržania podzemných vôd pomocou hydraulických clon a barrier, zamedzenie transportu kontaminantov do oblasti vodného zdroja.

Zmena redukčných podmienok v podzemných vodách na oxidačné umožňuje využiť prirodzené mikrobiálne procesy degradácie organických látok na mineralizáciu organických látok v podzemných vodách a zabrániť tvorbe pachotvorných látok ako degradačných

produktov organických látok v redukčnom prostredí. Zamedzuje tiež tvorbe rozpustných redukovaných foriem železa, mangánu a dusíka, ktoré sú dnes vzhľadom na uvedený stav najčastejšie prítomné v podzemných vodách. Význam technických opatrení na ochranu vodných zdrojov sa uplatní i v prípade, že ochrannými opatreniami nie je možné úplne eliminovať dôsledky antropogénneho pôsobenia predovšetkým v znížení investičných i prevádzkových nákladov na úpravne vôd alebo možnosťou prebudovania existujúcich úpravarenských celkov pre odstraňovanie kontaminantov, takže nie je potrebné budovať nové technologické stupne v úpravniach vôd.

Využitie reoxidácie horninového prostredia ako kvalitatívneho ochranného prvku pre zdroje podzemnej vody je jednou z najperspektívnejších a z hľadiska teoretických základov ako aj realizačných skúseností najlepšie prepracovaným riešením. Z možných alternatív riešenia sa pozornosť väčšinou venovala kruhovej ochrane aplikovanej ako technológia úpravy vody in situ. V riešení sa predpokladá využitie základných princípov úpravy podzemnej vody in situ v horninovom prostredí, ktoré sú založené na reoxidácii zvodnenej vrstvy systémom infiltračných vrtov. Režim, konfigurácia infiltračných vrtov, koncentrácia kyslíka v infiltrujúcej vode, ich interval a ďalšie parametre je nutné stanoviť na základe terénnych pokusov.

Zabezpečenie reoxidácie hlbších zvodnených horizontov je možné realizovať pomocou systému vrtov usporiadaných buď s kruhovým alebo líniovým prvkom. Líniový prvok aktívnej ochrany nebol v našich podmienkach zatiaľ odskúšaný. Jeho účelom je zabezpečovať kontinuálnu alebo cyklickú oxidáciu zvodnenej vrstvy pomocou radu nalievaných infiltračných studní umiestnených kolmo na generálny smer prúdenia podzemných vôd. Reoxidačné opatrenia musia byť vedené tak, aby nahradili vzniknutý deficit akceptorov elektrónov v prúde podzemných vôd a zároveň umožnili prípadnú mikrobiálnu oxidáciu prítomných biologicky degradovateľných organických látok.

Kruhové prvky sú vhodné pre ochranu jednotlivých vrtov alebo studní. V prípade, že je potrebné chrániť celé časti zvodnenej vrstvy, tak je to možné dosiahnuť len líniovým oxidačným prvkom. Toto platí nielen v prípade potreby oxidácie železa, mangánu, amoniaku a pod., ale nepriamo aj v prípadoch, keď by sa nepriaznivou zmenou oxidačno redukčných podmienok mohli uvoľňovať do podzemnej vody oveľa nebezpečnejšie látky (ťažké kovy, organické látky). Rozhodujúcim aspektom pre výber najvhodnejšej alternatívy sú náklady na ich realizáciu. Prevádzkové náklady sú zvyčajne porovnateľné. V tabuľke 1. je uvedené porovnanie ekonomických nákladov na realizáciu oxidačných clôn pre obe alternatívy a tri významné vodné zdroje na Žitnom Ostrove.

Tabuľka 1. Porovnanie nákladov na realizáciu oxidačných clôn

Typ oxidačnej clony	Spôsob aktivácie	Vodný zdroj		
		Náklady v tis. Sk		
		Kalinkovo	Šamorín	Rusovce
Radiálna oxidačná clona	Externá aktivácia	31 300	25 400	-
	Interná aktivácia	31 500	26 800	-
Líniová oxidačná clona	Externá aktivácia	37 800	29 600	63 800
	Interná aktivácia	30 200	21 500	55 300

Dôležitou skutočnosťou pri reoxidácii zvodne je tvorba vyzrážaných oxidov. Otázka kolmatácie horninového prostredia je veľmi častou námietkou proti tomuto spôsobu riešenia ochrany kvality podzemnej vody. Pozícia akumulácií vyzrážaných oxidov sa dá vyčíslieť z kinetických dát, alebo vygenerovať numericky pomocou modelu. Pomocou mernej hmotnosti oxidov a časového vývoju ich objemu je možné vypočítať strednú kolmatačnú rýchlosť. Ukazuje sa, že vo veľkej väčšine prípadov problém nie je taký akútny, za aký sa často považuje. Vypočítané kolmatačné rýchlosti ukázali, že na vyplnenie 25 % objemu pórov by bolo treba rádovo stovky rokov, čo je ďaleko za životnosťou vodných zdrojov. Navyše treba zdôrazniť, že pri vyplňaní pórov dochádza k zrýchleniu konvektívno - disperzného prenosu, a tým k rozptylu zóny vyzrážania do väčšej šírky, než uvažuje aj tento model. Pozícia vyzrážaných maxim pre mangán je bližšie k vrtu než pozícia maxima železa, čo súvisí s pomalšou kinetikou mangánu voči železu. Určujúcou zložkou pre reoxidáciu zvodne v prípade železa a mangánu býva preto väčšinou mangán. Pre prípad organického znečistenia je potrebné uvažovať s ďalšou spotrebou kyslíka, čo súčasné aplikácie oxidačných clón v rámci technológií úpravy vody in situ neuvažujú. Pri relatívne malých znečisteniach možno uvažovať s aditívnou účasťou organických kontaminantov na spotrebe kyslíka. Súčasné štúdie tiež potvrdili, že okrem samotných oxidačných produktov je dôležitý aj vplyv kovov zabudovaných v kryštáloch minerálov horninového prostredia. Zmenou oxidačného stupňa sa silne menia mnohé z povrchových vlastností predovšetkým ílových minerálov ako je napučiavanie, veľkosť povrchu, medzivrstvové vzdialenosti, počet povrchovo aktívnych centier.

4. SORPČNÉ CLONY

Ako už bolo konštatované vodohospodársky najvýznamnejšie oblasti v Slovenskej republike sú lokalizované v alúviách riek a vyznačujú sa vysokými koeficientami filtrácie a nízkymi obsahmi ílovitých častíc. To má za následok ich relatívne ľahkú zraniteľnosť z hľadiska možnosti ich kontaminácie. Jednou z možností riešenia ochrany týchto vodných zdrojov je zvýšenie prirodzenej imobilizačnej schopnosti zvodneného horninového prostredia vytváraním sorpčných clón injektážou prírodných sorbentov.

Využitím sorpčných vlastností prírodných sorbentov je možné riešiť ochranu vodných zdrojov pred prienikom radu mikropolutantov ako sú PCB, pesticídy, chlórované uhľovodíky, ropné uhľovodíky, ťažké kovy. Zatiaľ, čo odbúranie degradovateľných organických látok prebieha vplyvom respiračných a denitrifikačných procesov v úzkej zóne od miesta infiltrácie, je imobilizácia špecifických organických látok, ťažko oxidovateľných, ako aj ťažkých kovov vo veľkej miere realizovaná predovšetkým prostredníctvom sorpcie na jemné ílovité frakcie horninového prostredia.

Sorpčná clona predstavuje určitú časť horninového prostredia, v ktorom sme umelo zvýšili špecifický povrch injektážou ílového materiálu (prírodného sorbentu). Na druhej strane nainjektovaním ílového materiálu sa zníži koeficient filtrácie tohto prostredia.

Využitím sorpčných vlastností prírodných sorbentov (bentonit, aktívne uhlie...) v týchto clonách, je možné zabrániť prieniku mikropolutantov ako sú chlórované uhľovodíky, pesticídy, ropné uhľovodíky, ťažké kovy do vodných zdrojov.

Pre praktickú aplikáciu sa ukazuje ako najvýhodnejšie použiť ako sorbent suspenziu namiešanú z 0,5 % bentonitu + 0,5 % práškového aktívneho uhlia alebo 1 % bentonitu + 1 % práškového aktívneho uhlia.

Technickú realizáciu sorpčných clon je možné riešiť v dvoch alternatívach:

- líniové ochranné clony, ktoré sa vybudujú pred vodným zdrojom kolmo na smer prúdenia podzemnej vody
- kruhové ochranné clony vybudované okolo každej čerpanej studne

O výhodnosti jednej z týchto alternatív sa rozhodne na základe finančných nákladov na ich realizáciu. Podobne ako v prípade oxidačných clôn boli vyčíslené aj náklady na realizáciu sorpčných clôn pre uvedené vodné zdroje (Tabuľka 2.).

Tabuľka 2. porovnanie nákladov na realizáciu sorpčných clôn.

Vodný zdroj	Variant sorpčnej clony	Finančné náklady (mil. Sk)	
		investičné	prevádzkové
Šamorín	kruhová	220,92	18,5
	líniová (1 500 m)	1 333,72	-
Kalinkovo	kruhová	149,19	14
	líniová (1 000 m)	889,14	-
Rusovce	líniová (2 000 m)	1 778,30	-

Výhodou ochrany vodných zdrojov pomocou sorpčných clôn je, že nevyžaduje vývoj nových zariadení a pre realizáciu je možné použiť zariadenia určené na budovanie injektovaných tesniacich clon.

Pretože časom dôjde k vyčerpaniu sorpčnej kapacity vytvorenej zóny je ju potrebné kombinovať s oxidačnou clonou, čím sa vytvoria podmienky pre mikrobiologické respiračné procesy a regeneráciu povrchu sorpčného materiálu (mechanizmus biosorpcie). Z tohto aspektu je výhodnejšie použitie kruhovej ochrannej sorpčnej clony, ktorú je možné vybudovať ako súčasť úpravy vody in situ.

V zásade možno konštatovať, že všetky doterajšie poznatky o možnosti využitia sorpčných stien pre ochranu podzemných vôd poukazujú na účinnosť takéhoto postupu. Laboratórne experimenty preukázali, že sorpcie na ílovitých mineráloch je významným imobilizačným procesom, výrazne ovplyvňujúcim migráciu a transport látok v podzemných vodách a je potrebné s ňou uvažovať pri riešení problémov kontaminácie podzemných vôd.

Pre odstraňovanie organických mikropolutantov, ktoré by mohli ohroziť kvalitu vody vo vodných zdrojoch, je vhodné využiť zmiešaný sorpčný materiál tvorený bentonitom a práškovým aktívnym uhlím v pomere 1:1. Je možné injektovať suspenziu v tomto pomere, pričom sa dosiahne jedným radom injekčných vrtov šírka sorpčnej zóny 5 - 6 m čo postačuje pri predpokladaných rýchlostiach prúdenia vody na kontakt so sorpčným materiálom v dĺžke 36 hodín. Táto doba je pre veľkú väčšinu známych kontaminantov dostačujúca na dosiahnutie sorpčnej rovnováhy i pre látky s malou afinitou k sorpčnému materiálu.

5. PRIEPUSTNÉ BARIERY

Iným variantom riešenia ochrany vodných zdrojov sú *priepustné bariery*. Táto sanačná technológia je vhodná pre prúdiacu kontaminovanú podzemnú vodu, ale iba v dobre priepustnom horninovom prostredí (piesky, štrkopiesky, štrky). Princíp metódy je jednoduchý. Kolmo na smer prúdenia podzemnej vody sa vykope ryha, ktorá sa na výšku

zvodnenej vrstvy vyplní vhodne vybraným materiálom. Okrem kopania rýh sa môže použiť injektáž, pričom sa vybraný materiál nainjektuje priamo do horninového prostredia. Materiál sa zvolí podľa zloženia kontaminujúcich látok, aby umožnili ich chemický rozklad. Prechodom podzemnej vody cez upravovaciu bariéru dochádza k chemickej, alebo biochemickej reakcii pri ktorej dôjde k rozloženiu kontaminantu. zadrží. Okrem rozkladu sa môže využívať tiež zrážanie. Keď má pri priesaku bariérou nastať zrážanie kontaminantov, musí byť materiál bariéry zvolený tak, aby toto zrážanie podporoval (napr. drvený vápenec). Materiál degradačných bariér musí rozložiť kontaminanty na netoxické alebo menej toxické látky. Používajú sa napríklad železné granule, ktoré sa osvedčili pre rozkladanie organických kontaminantov ako trichlórétén a tetrachlórétén. (Kazda et al, 1998).

Pri laboratórnych testoch pre overenie degradácie trichlórétenu (TCE) vo vodnom prostredí pomocou granúl železa sa ukázalo, že proces prebieha ako reakcie pseudo-prvého poriadku. Degradačným produktom bol etén a následne etán a približne 3 – 3,5 % počiatočného TCE bol transformovaný na tri izoméry dichlórétenu a vinylchloridu. (Orth et al, 1995)

Jednou z možností využitia priepustných bariér so železom je aj redukcia šesť mocného chrómu na trojmocný chróm. Túto reakciu skúmali (Powell et al, 1995) v prírodnom systéme vodonosnej vrstvy. Bolo zistené, že rozličné formy Fe významne vplývali na redukciu Cr^{VI} . Najefektívnejšia bola redukcia nulvalentného Fe, ktorý s chrómom vytváral zlúčeninu $(\text{Cr}_x, \text{Fe}_{1-x})(\text{OH})_3$.

Zaujímavú aplikáciu využitia priepustných bariér predstavuje použitie imobilizovaných foriem mikroorganizmov (Balfanz et al, 1991). Použili *Alcaligenes* sp. A 7-2, imobilizovaný na granulovanom íly pre degradáciu 4 – chlórphenolu v piesčitom poréznom prostredí. Počas experimentov pri optimálnych podmienkach bol degradovaný chlórphenol v koncentrácii väčšej ako 160 $\mu\text{g/l}$.

6. VPLYV OCHRANNÝCH CLÔN NA HYDRAULICKÉ PARAMETRE VODNÝCH ZDROJOV

Realizáciu ochranných clôn, alebo ich prevádzkou dochádza k čiastočnej kolmatácii horninového prostredia. Modelové experimenty preukázali, že minimálna rýchlosť pri injektáži materiálu ochranných clôn musí byť 1,264 m.h^{-1} . Pri nižších rýchlostiach by došlo k zakolmatovaniu horninového prostredia a tým k výraznému zníženiu jeho priepustnosti. Zariadenia pre injektáž sorpčných zmesí umožňujú dosiahnuť rýchlosť injektáže 100 l.min^{-1} pre výšku injektovanej vrstvy 30 cm. Za týchto podmienok bude radiálna rýchlosť v okolí injektážneho vrtu klesať s druhou mocninou vzdialenosti od vrtu. K poklesu rýchlosti prúdenia injektovanej zmesi pod kritickú hodnotu 1,264 m.h^{-1} dôjde vo vzdialenosti asi 2,5 m od injekčného vrtu, takže maximálna šírka sorpčnej clony vytvorenej jednou líniou môže byť 5 m.

Pri predpokladaných rýchlostiach prúdenia podzemnej vody do 7 m.d^{-1} je suspenzia bentonitu a práškoveho aktívneho uhlia v horninovom prostredí stabilná a nedochádza k jej vyplavovaniu a nie je potrebné uvažovať s jej stabilizáciou pomocou cementu.

Injektáž sorpčnej zmesi do horninového prostredia vedie k čiastočnej kolmatácii horninového prostredia, k zníženiu filtračných koeficientov a tým i k zníženiu výdatnosti čerpanej studne. Na základe laboratórnych experimentov možno po vybudovaní sorpčnej clony očakávať zníženie koeficienta filtrácie o 10-20%, čo bude viesť k zníženiu výdatnosti

studne o 4,8% (Tab.3.). Toto zníženie výdatnosti studne je možné kompenzovať čerpaním vody pri väčšom znížení hladiny vody. Použitie suspenzie pripravenej s vyšším podielom sorpčných materiálov ako je 2%, vedie k neúnosnému zníženiu filtračných koeficientov.

Pre modelovanie vplyvu líniovej ochrannej clony sme použili program ASM(Kinzelbach,1991). Je to dvojrozmerný model transportu a prúdenia podzemnej vody, a tiež slúži na zisťovanie prieniku znečistenia. Riešenie rovnomerného prúdenia je založené na metóde konečných rozdielov. Celá zvodnená vrstva je rozdelená na pravouholníky predstavujúce bunky, v strede ktorých sa nachádza uzol. Pre každú bunku je stanovená vodná bilancia, čiže vodná rovnováha, ktorá je určená na základe Darcyho zákona.

Tabuľka č.3. Vplyv zníženie filtračného koeficientu na výdatnosť studne.

zníženie filtr.koef./%/	zníženie výdatnosti /%/
20	4,8
40	4,8
60	6,6
80	13,4
100	33,1

Počítačové modelovanie ochrannej clony sme vykonali pre vodný zdroj v lokalite Topoľany. Ochranná clona predstavuje určitú časť horninového prostredia, v ktorom sme umelo zvýšili špecifický povrch injektážou dispergovanného materiálu, pričom sa zníži koeficient filtrácie daného horninového prostredia.

Cieľom modelovania bolo zistiť hydrogeologické podmienky v oblasti VZ po realizácii úplnej ochrannej clony situovanej pozdĺž rieky, v ktorých bude znížený koeficient filtrácie o 5, 10, 15, 20, 25 a 30 % a neúplnej clony so zníženými koeficientami filtrácie o 5, 10, 15, 20, 25 a 30 %, situovaných iba v tých častiach, kde prúdi podzemná voda najrýchlejšie z rieky smerom k čerpacím studniam, potom vypočítať vodnú bilanciú v jednotlivých clonách a rieke, zistiť vplyv clôn na vodnú bilanciú, zníženia v studniach a hladinový režim. Hlavné výsledky modelovania sú uvedené v tabuľke 4.

Tabuľka č. 4. Výsledky modelovania

Q (m ³ /s) rieka	Q (m ³ /s) Clona	Δ Q (m ³ /s) rieka – clona	x %
6,98380E-02	1,24540E-02	5,738399E-02	0
6,90452E-02	1,19351E-02	5,711005E-02	5
6,81742E-02	1,13890E-02	5,678521E-02	10
6,73104E-02	1,08617E-02	5,644869E-02	15
6,63872E-02	1,03094E-02	5,607780E-02	20
6,53965E-02	9,72991E-03	5,566662E-02	25
6,43373E-02	9,15768E-03	5,517962E-02	30

Znižujúce sa množstvo vody vytečené z clony sa negatívne odrazí v znižujúcich sa vodných hladinách v studniach (pozri grafy v predchádzajúcej kapitole). Relatívne najviac sú ovplyvnené studne ležiace v blízkosti clony. V studni TH-5 hladina podzemnej vody klesla o 4 cm pri koeficiente filtrácie zníženom o 30 % oproti stavu bez clony. V studniach TH-2 a TH-3 hladina klesla o 3 cm a v TH-4 a TH-6 o 2 cm. Vplyv clony na pokles hladín podzemnej vody v studniach sa so zväčšujúcou vzdialenosťou od clony znižuje.

Z vypočítaných priebehov hydroizohýps bolo preukázané, že ochranné clony nemajú skoro žiadny vplyv na ich priebeh. Malé zmeny možno pozorovať iba v prehĺbovaní depresných kužeľov v studniach. Najhlbší depresný kužeľ je v studni TH-6 na úrovni 108,99 m n. m., v ktorom klesla hladina vody iba o 2 cm, maximálne zníženie bolo v studni TH-5 a to iba 4 cm, čo potvrdzuje minimálny vplyv clôn na priebeh hydroizohýps.

Význam ochranných clôn je v zlepšení kvality podzemnej vody. Na základe získaných výsledkov môžeme povedať, že tento pozitívny vplyv nie je kompenzovaný negatívnym dopadom na hydrogeologický režim podzemných vôd.

7. ZÁVER

Dlhodobé experimenty na prietochných kolónach preukázali, že oxidácia a sorpcia sú významnými imobilizačnými procesmi, výrazne ovplyvňujúce migráciu a transport látok v podzemných vodách a je potrebné s nimi uvažovať pri riešení problémov kontaminácie podzemných vôd a ochrany vodných zdrojov. Pre odstraňovanie organických mikropolutantov, ktoré by mohli ohroziť kvalitu vody vo vodných zdrojoch, je vhodné využiť aeróbnu respiráciu a zmiešaný sorpčný materiál tvorený bentonitom a práškovým aktívnym uhlím v pomere 1:1. Je možné injektovať suspenziu v tomto pomere, pričom sa jedným radom injekčných vrtov dosiahne šírka sorpčnej zóny 5-6 m, čo umožňuje pri predpokladaných rýchlostiach prúdenia vody dosiahnuť kontakt kontaminantu so sorpčným materiálom v dĺžke okolo 36 hodín. Táto doba postačuje na dosiahnutie sorpčnej alebo chemickej rovnováhy i pre látky s malou afinitou k použitému materiálu.

Výsledky počítačového modelovania ukázali, že pri realizácii sorpčných clôn so zníženými koeficientami filtrácie do 30 % dochádza len k veľmi malému ovplyvneniu hydrologického režimu podzemných vôd. Najvýraznejšie sa prejavil ich vplyv na množstvách infiltrovaných vôd z toku. Menej výrazne, alebo takmer vôbec sa neprejavil vplyv sorpčných clôn na hladinu vody v čerpaných vrtoch. Zistený vplyv na hladinu podzemných vôd vo vrtoch sa znižuje so vzdialenosťou studne od rieky. Použitie neúplných (prerušovaných) sorpčných clôn má podstatne menší vplyv na hydrologický režim podzemných vôd vodného zdroja, ale možno povedať, že má aj oveľa menší vplyv na kvalitu infiltrovanej podzemnej vody.

Experimentálne výsledky získané z riešenia etapy poskytli vhodnú východiskovú bázu pre aplikáciu niektorého z overovaných procesov na riešenie kontaminácie vodného zdroja. Na základe získaných výsledkov a pripravených metodických postupov je možné realizovať viacero variant riešenia sanácie vodných zdrojov, účinne zabráňujúcim prieniku kontaminantov do vodného zdroja, alebo čerpanej studne, avšak ako základný princíp sa ukazuje využitie oxidácie kyslíkom pri koncentráciách kyslíka 20 – 40 mg/l v kombinácii so sorpčnou stenou. Z technického hľadiska by bolo najvhodnejšie realizovať túto technológiu v kombinácii s technológiou biospargingu, pri ktorej sa do zvodneného horizontu neinjektuje prevzdušnená podzemná voda, ale priamo plynné oxidačné činidlo. Najvhodnejšia alternatíva závisí na druhu kontaminantu a hydrogeologických podmienkach v sanovanej lokalite.

Literatúra

- Balfanz, J., Rehm, H. J. , (1991): Biodegradation of 4 – chlorophenol by adsortive imobil *Alcaligenes* sp. A 7 – 2 in soil. Manuscript. 662 – 667 s.
- Baranovičová, L. (1999): Vplyv sorpčnej clony na hydrologický režim podzemných vôd vodného zdroja Topoľany. Diplomová práca, PrF UK, Katedra hydrogeológie, Bratislava
- Holubec, M., Valko, M., (1992): Ochrana vodných zdrojov sorpčnými clonami. Rámcová štúdia ochrany vodných zdrojov Rusovce, Kalinkovo, Šamorín. Správa. Archív VÚVH Bratislava.
- Kazda, I., Vaniček, M. (1998): Nové metody sanace kontaminovaných zemin a podzemní Vody. Vodní hospodářství 8. 218 – 221 s.
- Kinzelbach, W., (1991): Aquifer Simulation Model. Universitat Kassel, FRG. 55 s.
- Orth, W. S., Gillham, R. W., (1995): Dechlorination of Trichlorethene in Aqueous Solution Using Fe^0 . Environmental Science & technology 30/1. 66 – 71 s.
- Powell, R. M., Puls, R. W., Higtower, S. K., Sabatini D. A. (1995): Coupled Iron Corrosion & Chromate reduction: Mechanisms for Subsurface Remediation.