OCHRANA VODNÝCH ZDROJOV PRED ZNEČISTENÍM POMOCOU GEOTECHNICKÝCH OPATRENÍ

WATER SOURCE PROTECTION AGAINST POLLUTION BY GEOTECHNICAL GROUNDWATER PROTECTION SYSTEMS

Danka Grambličková, Emília Bednárová

ABSTRACT

Potable water resources are one of the most important parts of the environment. That is why their protection against pollution is very discussed. Drinking water resources pollution is mostly due to leakage of contaminants into groundwater. Similarly dangerous are potential sources of contaminants occurring on surfaces close to water resources in case of floodwater events. The paper deals with some aspects of water source protection. The method of finite elements by application of the program SEFTRANS was used.

KEY WORDS

Pollution, dispersion, groundwater, water resources, pumped well, cut-off wall, flood

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Znečistenie, disperzia, podzemná voda, vodný zdroj, čerpacia studňa, podzemná tesniaca stena, povodeň

ÚVOD

Súčasťou životného prostredia, ktoré je v súčasnosti predmetom častých diskusií, je podzemná voda ako bohatý zdroj zásob pitnej vody. Nebezpečenstvo jej znečistenia paradoxne narastá aj vplyvom vedecko-technického rozvoja. V ostatných rokoch sa ako negatívny faktor objavujú aj často sa opakujúce povodne. Predkladaný článok venuje pozornosť niektorým aspektom ochrany zdrojov pitnej vody pri aktivovaní potenciálnych zdrojov znečistenia, nachádzajúcich sa na povrchu pokryvných vrstiev, v dôsledku zvýšenej zrážkovej činnosti resp. povodní a pri úniku kontaminantu do podzemných vôd.

METÓDA RIEŠENIA

K analýze vyššie naznačených problémov bola použitá metóda konečných prvkov s aplikáciou programu SEFTRANS (1996). Program umožňuje riešiť stacionárne i nestacionárne úlohy filtračného prúdenia v rovine v nasýtenej i nenasýtenej zóne ako i transport konzervatívnych, stabilných, časovo nezávislých nečistôt, ktoré sa neabsorbujú na povrch pevných častíc. Šírenie sa kontaminantu je výsledkom superpozície filtračného a transportného modelu, nakoľko jedným z hlavných nositeľov šírenia sa nečistôt v podzemných a priesakových vodách je prúdiaca voda.

Neustálené prúdenie podzemných vôd v rovine je definované rovnicou:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(bk_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(bk_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)=(S_v+bS_s)\frac{\partial h}{\partial t}-Q \qquad (1)$$

kde h je piezometrická výška, (m), b – mocnosť zvodnenej vrstvy (m), k_x, k_y - koeficient filtrácie v smere osí x, y ($m.s^{-1}$), t - čas (s), S_v - koeficient zásobnosti voľnej hladiny, S_s - špecifická zásobnosť (m^{-1}), Q - prítok resp. odtok ($m^3.s^{-1}$). Q je kladné pre prítok a záporné pre odtok z riešenej oblasti.

Transport znečistených látok vyjadruje rovnica:

Doc.Ing.Emília Bednárová, PhD., RNDr.Danka Grambličková, PhD.
Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(nbD_L\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(nbD_T\frac{\partial c}{\partial y}\right)-bv_x\frac{\partial c}{\partial x}-bv_y\frac{\partial c}{\partial y}=nbR\frac{\partial c}{\partial t} \quad (2)$$

kde b je mocnosť zvodnenej vrstvy (m), c - koncentrácia ($g.l^{-1}$), n – efektívna pórovitosť, D_L - koeficient pozdĺžnej disperzie ($m^2.s^{-1}$), D_T - koeficient priečnej disperzie ($m^2.s^{-1}$), v_x, v_y - rýchlosti v smere osí x, y ($m.s^{-1}$), R - retardačný koeficient.

ZNEČISTENIE NA POVRCHU POKRYVNÝCH VRSTIEV

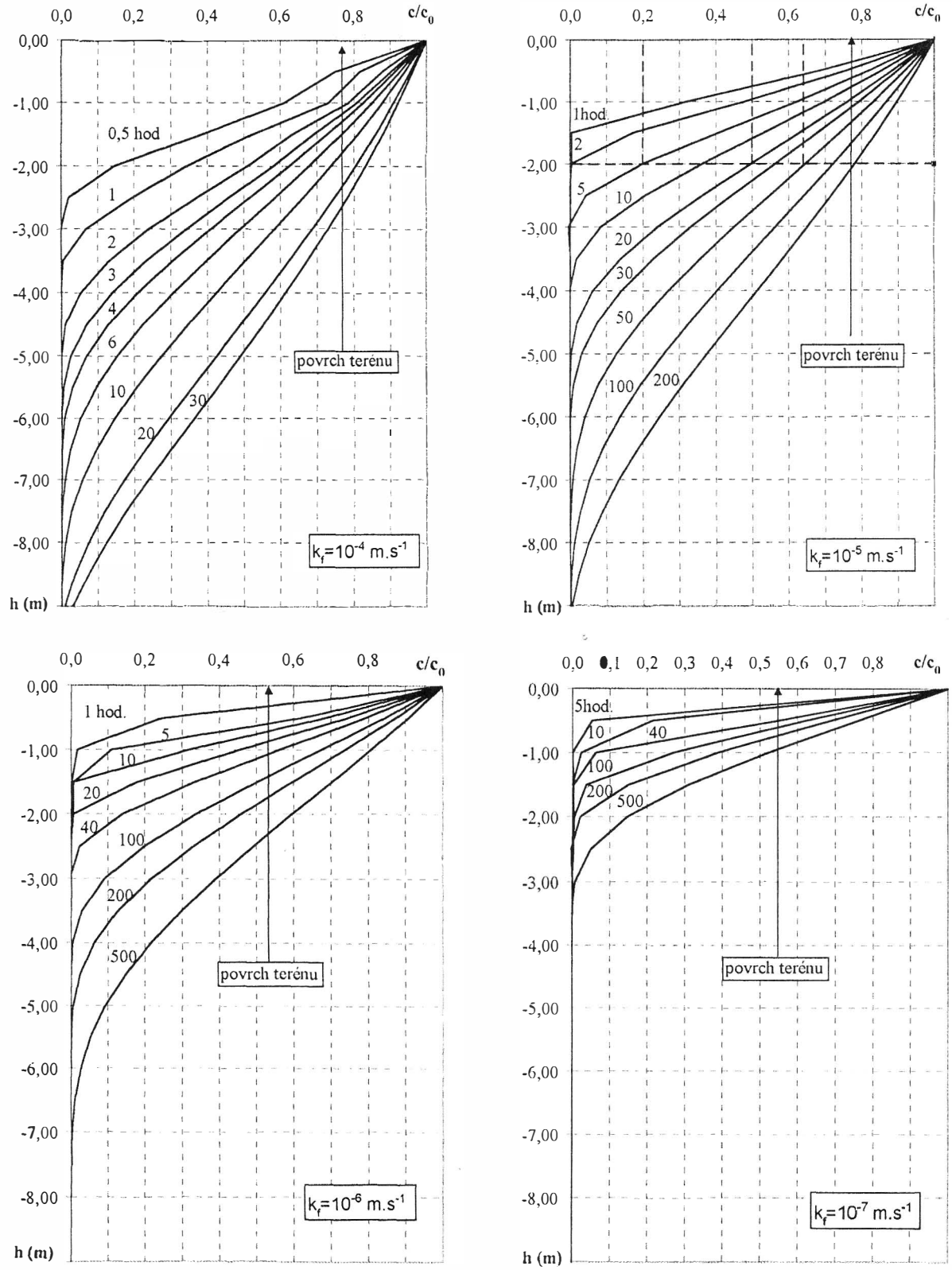
Veľkým nebezpečenstvom znečistenia vodných zdrojov môžu byť aj potenciálne zdroje znečistenia lokalizované na povrchu terénu (skládky, chemické posypy, odpady atď.). Zvýšená zrážková činnosť resp. povodne môžu aktivovať prenikanie kontaminantu do vodonosnej vrstvy, kde vplyvom existujúceho pohybu dochádza k ohrozeniu vodného zdroja. Povrchové vrstvy, zvyčajne nenasýtené vodou, môžu mať ochranný účinok. Vedomosti o miere ich ochranného účinku sú dôležité pri rozhodovaní o potrebe budovania ochranných opatrení. Ochranný účinok povrchových vrstiev je limitovaný viacerými faktormi. K najdôležitejším možno zaradiť jej hrúbku a filtračno-migračné charakteristiky, ktoré boli predmetom nasledujúcej analýzy prirodzeného ochranného účinku povrchových vrstiev za predpokladu vzniku povodne. Povrchové vrstvy simulovali izotropné ($k_f = k_x = k_y$) polopriepustné až nepriepustné materiály s charakteristikami v štyroch alternatívach:

- $k_f = 1.10^{-4}$ $m.s^{-1}$, $S_v = 0,20$, $S_s = 1,3.10^{-4}$ (m^{-1})
- $k_f = 1.10^{-5}$ $m.s^{-1}$, $S_v = 0,15$, $S_s = 5,0.10^{-4}$ (m^{-1})
- $k_f = 1.10^{-6}$ $m.s^{-1}$, $S_v = 0,10$, $S_s = 9,0.10^{-4}$ (m^{-1})
- $k_f = 1.10^{-7}$ $m.s^{-1}$, $S_v = 0,05$, $S_s = 1,5.10^{-3}$ (m^{-1})

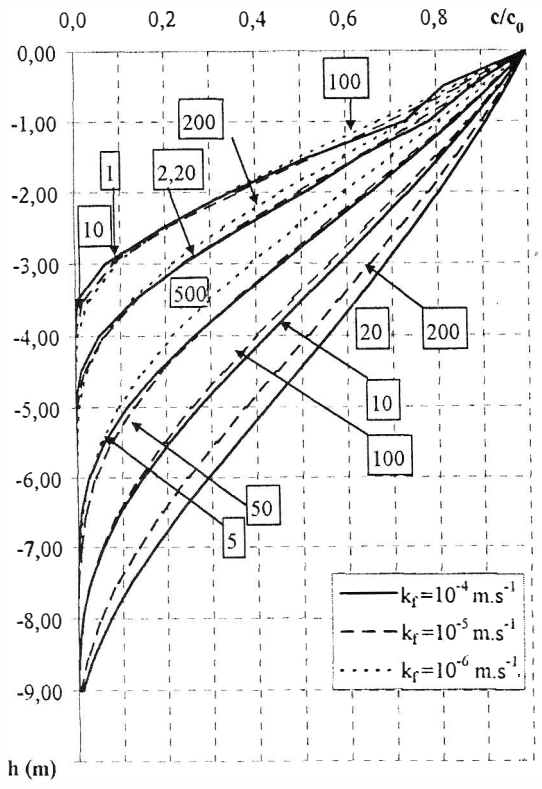
Koeficient zásobnosti voľnej hladiny S_v pre jednotlivé zeminy bol určený zo vzťahu Lucnera (Mucha, 1987) $S_v = 0,4 + 0,05.\log(k_f)$, špecifická zásobnosť S_s bola stanovená na základe poznatkov z literatúry – Thomas (1996). Koeficient pozdĺžnej disperzie $D_L = 5$ ($m^2.s^{-1}$) a koeficient priečnej disperzie $D_T = 0,5$ ($m^2.s^{-1}$) vyplynuli z grafov, ktoré uvádza Hulla (1996) vzhľadom na rozlohu riešenej oblasti 120 m x 10 m. Vo všetkých alternatívach bola povodeň simulovaná úrovňou hladiny vody 0,5 m nad terénom s predpokladom aktivácie kontaminantu na povrchu terénu pri povodni. Riešenie bolo uskutočnené metódou konečných prvkov vo vertikálnej rovine.

Výsledky riešenia sú dokumentované na obr. 1a až 1d, ktoré vyjadrujú priebeh koncentrácie znečistenia c/c_o (c_o – počiatočná koncentrácia) v rôznych polohách pod povrchom terénu h (m) a v rôznych časových intervaloch t (hod) pre jednotlivé typy zemín. Možno z nich dedukovať ochranný účinok povrchovej vrstvy ľubovolnej hrúbky s uvedenými materiálovými charakteristikami pri simulovanej povodni. Tak napr. ak pokryvná vrstva má koeficient filtrácie $k_f = 1.10^{-5}$ $m.s^{-1}$ (obr. 1b) a jej hrúbka je 2 m (čiarkovaná hrubá čiara) prenikne ňou za päť hodín cca 20 % -tné znečistenie z celkového znečistenia do vrstvy pod ňou, za 20 hodín je to 50 % -tné, za 50 hodín je to cca 64 % -tné znečistenie a cca 2 hodiny je podložie pred kontamináciou pokryvnou vrstvou chránené. V prípade koeficienta filtrácie $k_f = 1.10^{-6}$ $m.s^{-1}$ (obr. 1c) možno predpokladať, že ochranný účinok pokryvnej vrstvy je cca 20 hodín a ak $k_f = 1.10^{-7}$ $m.s^{-1}$ (obr.1d) je to cca 190 hodín. Ak dĺžka povodne neprekročí odpovedajúci stanovený čas (2, 20 resp. 190 hodín podľa typu zeminy) znečistenie neprenikne do vodonosnej vrstvy a je predpoklad, že vodný zdroj nie je ohrozený znečistením. V prípade, že do vodonosnej vrstvy prenikne znečistenie, potreba ochranného opatrenia závisí od mnohých faktorov. Predovšetkým je to proces šírenia sa kontaminantu vo vodonosnej vrstve, čo závisí od materiálových charakteristík, existujúceho prúdenia, vzdialenosti kontaminovanej látky od vodného zdroja. atď. Rozhodujúca je tiež prípustná hodnota kontaminácie zdroja.

Ako vyplýva z obr. 1a až obr. 1d koeficient filtrácie výrazne ovplyvňuje ochranný účinok povrchových vrstiev. Jeho vplyv na priebeh koncentračnej krivky po hĺbke v rôznych časových intervaloch je názorný z obr. 2. Na základe zobrazených koncentračných kriviek a ostatných vypočítaných numerických hodnôt koncentrácie znečistenia vyplýva, že rádovému rozdielu koeficienta filtrácie zodpovedajú koncentračné krivky v rádovo rozdielnom čase t. j. rádová zmena koeficienta filtrácie predstavuje aj rádovú zmenu v šírení sa kontaminantu. Napr. koncentračná krivka (obr. 2) v čase t = 2 hod pri $k_f = 1.10^{-4}$ $m.s^{-1}$ je takmer totožná s koncentračnými krivkami v časoch t = 20, 200 hodín odpovedajúcim postupne $k_f = 1.10^{-5}$ $m.s^{-1}$ a $k_f = 1.10^{-6}$ $m.s^{-1}$.



Obr. 1: Časový vývoj šírenia sa kontaminantu
a) $k_f = 10^{-4}$ m.s^{-1} b) $k_f = 10^{-5}$ m.s^{-1} c) $k_f = 10^{-6}$ m.s^{-1} d) $k_f = 10^{-7}$ m.s^{-1}
Fig. 1: Time development of contaminant transport
a) $k_f = 10^{-4}$ m.s^{-1} b) $k_f = 10^{-5}$ m.s^{-1} c) $k_f = 10^{-6}$ m.s^{-1} d) $k_f = 10^{-7}$ m.s^{-1}



Obr. 2: Vplyv koeficienta filtrácie na šírenie sa kontaminantu
Fig. 2: Filtration coefficient influence on the contaminant transport

Na základe predbežných výsledkov sa javí, že z materiálových charakteristík k_f, S_v, S_s má koeficient filtrácie dominantný vplyv na vývoj znečisťovania. V prípade výskytu anizotropie povrchových vrstiev je predpoklad, že rozhodujúci vplyv na ich preniknutie kontaminantom bude mať koeficient filtrácie vo zvislom smere – k_y. V prípade potvrdenia uvedených hypotéz môžu byť uvedené grafy použité pre určenie orientačných hodnôt znečistenia aj za iných predpokladov ako boli analyzované.

ZNEČISTENIE PODZEMNÝCH VÔD ÚNIKOM KONTAMINANTU

Únik kontaminantu do vodonosnej vrstvy podložia spôsobuje okamžité šírenie znečistenia do okolia. Ak sa v takýchto oblastiach vyskytujú vodné zdroje, tieto sú vystavené riziku znečistenia, závisiaceho od mnohých faktorov – dĺžka trvania a rozsah znečistenia, filtračno - migračné charakteristiky zemín, rýchlosť prúdiacej vody, vzdialenosť vodného zdroja od zdroja znečistenia atď. Nebezpečiu možno predchádzať vhodnými geotechnickými opatreniami - čerpacími a recirkulačnými systémami a tesniacimi ochrannými systémami.

ČERPACIE SYSTÉMY

Tento druh ochrany podzemných vôd spočíva v odčerpávaní znečistenej vody pomocou vŕtaných studní. Vhodný je hlavne, ak sa jedná o havarijné situácie znečisťovania v priepustnom prostredí s veľkou mocnosťou. Je zvlášť ekonomicky vhodný ak k odčerpávaniu vody možno použiť už existujúce studne tvoriace súčasť využívaných vodných zdrojov. Účinnosť opatrenia závisí od mnohých faktorov. Pozornosť bola sústredená na sledovanie vplyvu ochranného opatrenia na šírenie sa znečistenia z hľadiska čerpaného množstva, polohy studne vzhľadom ku zdroju kontaminantu a chránenej oblasti, počtu a rozmiestnenia studní.

Riešenie je uskutočnené MKP v horizontálnej rovine. Modelovaná oblasť rozlohy 2000 m x 2000 m simuluje výskyt štrkovitých zemín so koeficientom filtrácie $k_f = 3.10^{-3}$ m.s^{-1} a hydraulickým sklonom i = 0,005, simulovaným úrovňou hladiny vody po stranách riešenej oblasti. Transportný model s rozlohou zdroja znečistenia 50 x 200 m, vzdialeného od vodného zdroja 1300 m predpokladal hodnotu pozdĺžnej disperzivity D_L = 80 m, priečnej disperzivity D_T = 8 m, (Hulla, 1996).

Pri analýze vplyvu čerpaného množstva na znečistenie vodného zdroja bola uvažovaná jedna čerpacia studňa modelovaná v smere prúdenia vo vzdialenosti 600 m od zdroja znečistenia. Pri čerpaných množstvách Q = 0, 1, 2, 3, 5, 8 a 10 l.s^{-1} bol vysledovaný nepriamo úmerný vzťah čerpaného množstva ku kontaminácii vodného zdroja.

Vplyv vzájomnej polohy studne vzhľadom ku zdroju znečistenia a chránenej oblasti bol sledovaný pri čerpanom množstve Q = 5 l.s^{-1}. Poloha studne lokalizovaná v mieste úniku kontaminantu (l = 0 m) a vo vzdialenostiach l = 50, 100, 150, 200, 300, 400 a 600 m od zdroja znečistenia v smere prúdenia naznačuje významný vplyv tohto parametra na kontamináciu vodného zdroja s parabolickou závislosťou medzi vzdialenosťou čerpacej studne od zdroja kontaminantu a znečistením vodného zdroja. Umiestnenie čerpacej studne v mieste úniku kontaminantu je pri plošnom znečistení nevýhodné. Posunom ochranného opatrenia

smerom ku chránenému zdroju ochranný efekt do určitej vzdialenosti narastá, potom však znovu klesá. V zásade možno konštatovať, že čerpacie studne treba navrhovať, ak to lokálne podmienky dovoľujú, čo najďalej od chránenej oblasti, avšak do takej vzdialenosti od zdroja znečistenia, aby sa šíriaci kontaminovaný mrak nachádzal v oblasti dosahu čerpania zo studne.

V prípade rozsiahleho znečistenia resp. iných podmienok spolupôsobenia môžu vzniknúť vysoké nároky na čerpané množstvá k dosiahnutiu požadovanej eliminácie znečistenia. Čerpané množstvo je dôležité nielen z hľadiska kapacity čerpacieho systému, ale i z hľadiska priepustnosti prostredia (prítok vody do studne) a sufóznych javov, ktoré pri požiadavke veľkého čerpaného množstva môžu viesť k vážnym problémom narušenia filtračnej stability v okolí čerpacích studní, hlavne v zeminách náchylných na sufóziu. V takýchto prípadoch je vhodné k odčerpaniu kontaminovanej vody navrhnúť viac čerpacích studní. Predmetom nasledujúcej analýzy bolo posúdiť efektívnosť rozmiestnenia čerpacích studní. Uvažované boli dve studne s celkovým čerpaním Q = 5 $l.s^{-1}$ lokalizované:

- za sebou v smere prúdenia vo vzájomnej vzdialenosti 50 m a 20 m. Vzdialenejšia studňa bola situovaná 600 m od zdroja kontaminantu
- vedľa seba kolmo na smer prúdenia, vo vzájomnej vzdialenosti 50 m a vo vzdialenosti 600 m od zdroja kontaminantu.

Výsledky riešenia poukázali na zanedbateľné rozdiely medzi čerpaním z jednej studne a dvoch studní umiestnených v smere prúdenia. Mierne nepriaznivé rozdiely sa vyskytli pri situovaní studní vedľa seba kolmo na smer prúdenia. Naviac takáto situácia je riskantná z hľadiska ich vzdialeností, kedy môže nastať unikanie kontaminanu medzi studňami.

Čerpacie systémy, pri vhodnom použití, môžu spĺňať funkciu efektívneho geotechnického opatrenia. Pri ich návrhu treba mať na zreteli:

- vplyv čerpaného množstva je nepriamo úmerný k znečisteniu vodného zdroja
- vzájomná poloha čerpacej studne ku zdroju kontaminantu významne ovplyvňuje účinnosť čerpacej studne
- počet čerpacích studní a ich vzájomná poloha nemá významný vplyv na účinnosť ochranného opatrenia pri rovnakom sumárnom čerpaní, avšak vzhľadom na riziko šírenia sa kontaminantu medzi studňami je rozmiestnenie čerpacích studní za sebou v smere prúdenia výhodnejšie.

RECILKULAČNÉ SYSTÉMY

Recirkulačné systémy sú založené na recirkulácii znečistenej vody. Možno ich vytvoriť pomocou minimálne dvoch studní dvoma spôsobmi.

V prvom spôsobe odčerpávame znečitenú vodu z čerpacej studne a potrubím ju vháňame do nasávacej studne v smere proti prúdeniu. Kontaminovaná voda cirkuluje medzi čerpacou a nasávacou studňou, čím je kontaminant dočasne uzatvorený. Vplyvom filtračných podmienok resp. difúznych javov však postupne preniká do okolia a rozhranie medzi čistou a kontaminovanou vodou sa stráca. Podľa povahy znečistenia (rozpadavosť, degradácia) môže však vplyvom samočistiacich procesov dochádzať k jeho postupnej eliminácii.

Druhý spôsob recirkulácie vzniká vháňaním odčerpávanej kontaminovanej vody do nasávacej studne v smere prúdenia, lokalizovanej za chránenou oblasťou. V tomto prípade nie je dočasne "uzatvorený" kontaminant, ale medzi čerpacou a vsakovacou studňou vzniká chránená oblasť.

Treba mať na zreteli, že závisí od charakteru znečistenia, filtračno - migračných charakteristik a vytvoreného prúdového poľa ako dlho sú účinné recirkulačné systémy.

TESNIACE OCHRANNÉ SYSTÉMY

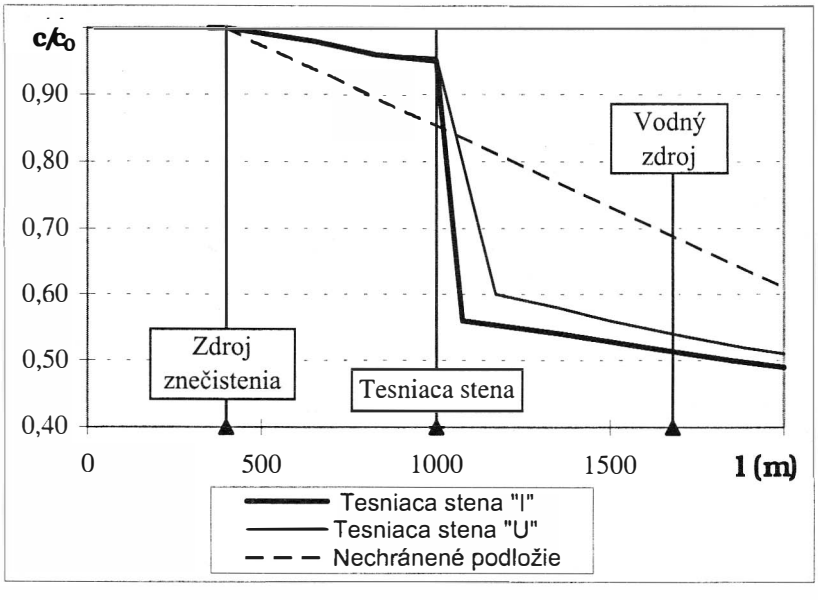
Tesniace ochranné systémy sa vytvárajú pomocou tesniacich podzemných stien s rôznymi hrúbkami a technológiami. Sú ekonomicky vhodným geotechnickým opatrením hlavne pri kontinuálnych resp. opakujúcich sa havarijných znečisteniach, kde by boli čerpacie systémy energeticky mimoriadne náročné. S výhodou ich možno aplikovať aj v prípade dostupného, málo priepustného až nepriepustného podložia kedy by sa mohol stať nereálny návrh čerpacieho systému.

MKP bola aplikovaná k analýze optimálneho tvaru tesniacej steny (modelovaný bol tvar „I“ a „U“) na redukciu znečistenia. Matematický model, predpoklady výpočtu vo filtračnom i v transportnom modeli (filtračno - migračné charakteristiky, okrajové podmienky atď.) sú totožné so skôr ilustrovaným spôsobom ochrany vodného zdroja

pomocou čerpacích systémov. Podzemná tesniaca stena tvaru „I" resp „U" hrúbky 0,7 m celkovej dĺžky 700 m bola modelovaná ako nepriepustná, kolmá na smer prúdenia, vzdialená 600 m od zdroja znečistenia. Riešenie bolo uskutočnené za predpokladu kontinuálneho a havarijného znečistenia s dĺžkou trvania 150 dní.

Je zrejmé, že intenzita znečistenia chránenej oblasti je závislá predovšetkým od jej vzdialenosti od zdroja znečistenia. Na obr. 3 je znázornený vývoj koncentrácie znečistenia podzemných vôd v osi riešenej oblasti v smere prúdenia pre dva pôdorysné tvary tesniacej steny - tvar "I" a "U". Pre porovnanie je tu zobrazený aj vývoj koncentrácie pre prípad nechránenej oblasti. Oblasť medzi priamkou, vyjadrujúcou šírenie sa znečistenia v nechránenom prostredí, a polygónmi, vyjadrujúcimi šírenie sa znečistenia v dôsledku tesniacich stien tvaru "I" resp. "U", predstavuje ochranný účinok zodpovedajúcej tesniacej steny v rôznych polohách medzi stenou a chráneným zdrojom. Z analýzy dosiahnutých výsledkov vyplýva, že:

- vplyv pôdorysného tvaru tesniacej steny z hľadiska redukcie znečistenia je minimálny, rozhodujúca je dĺžka jej kolmého priemetu na smer prúdenia
- miera redukcie PTS je závislá od polohy chránenej oblasti k tesniacej stene; v bezprostrednej blízkosti za ňou nastáva prudká redukcia, ktorá sa v smere prúdenia mierne zmenšuje
- PTS je pri havarijnom znečistení vysoko efektívnym geotechnickým opatrením. Z ekonomického hľadiska je však prijateľné iba za predpokladu výskytu opakovaných havárií. V tomto prípade je veľmi dôležitá dĺžka trvania a frekvencia výskytu havárie. Pri častých opakovaniach resp. dlhodobých sanáciách je vhodné ju doplniť dočasným odčerpávaním kontaminovanej vody.



Obr. 3: Vývoj koncentrácie znečistenia v osi riešenej oblasti v smere prúdenia
Fig. 3: Pollution Concentration Time Development in the Axis of Calculated Area in the Flow Direction

Prezentované výsledky v tejto časti príspevku boli predmetom skúmania grantovej úlohy č.1/6307/99

ZÁVER

Primárnym opatrením na ochranu podzemných vôd je odstránenie príčin ich znečistenia t.j. zamedzenie úniku kontaminantu. Nakoľko aj pri súčastnom rozvoji vedy a techniky (alebo dokonca jeho príčinou) dochádza k ohrozovaniu vodných zdrojov, je dôležité venovať pozornosť prognózam šírenia sa kontaminantu v snahe minimalizovať riziko ich znečistenia čo najoptimálnejšie. Prezentovaný článok poukazuje na možnú aplikáciu metódy konečných prvkov pri analýze problémov uvedeného charakteru.

LITERATÚRA

THOMAS,S..D., YUAN,F.: Groundwater and the environment. The 2nd Annual Environmental Engineering Workshop. Groundwater modeling case studies. Oxford Geotechnica International. University of Durham, 1996
SEFTRANS. A Simple and Efficient Two – Dimensional Groundwater Flow and Transport Model. Oxford Geotechnica International. Oxford, Durham, Prague, Dublin, 1996
HULLA, J. a kol.: Geotechnické systémy ochrany podzemných vôd, účinky priesakov na vzdúvacie konštrukcie a ich podložie. Hodnotiaca správa o riešení grantového projektu, SvF STU Bratislava 1996
MUCHA, I., ŠESTAKOV, V. Hydraulika podzemných vôd. Vydavateľstvo Alfa, Bratislava 1987

WATER SOURCE PROTECTION AGAINST POLLUTION BY GEOTECHNICAL GROUNDWATER PROTECTION SYSTEMS

RESUMÉ

The apprehension of drink-water deposits is continuously rising due to the influence of negative aspects of the environment. The protection of water resources facing the pollution, therefore, has been becoming an important object of the investigation. The ways to solve this protection are affected by many factors such as geological component of subsoil; filtration-migration characteristics; intensity, length and range of pollution; and others. This paper is mentioned one of the possibilities that the finite element method can be used to decide whether it is necessary and effective to make some geotechnical remediation to the protection of water resources. The need of creating this protection structures was analysed from the view of protective effect of ground layers during flood (Fig. 1a–1d, Fig. 2). From the geotechnical treatment the attention was concentrated on the pumping and sealing systems. The pumping systems were analysed in term of amount of pumping water, position of well considered the contaminated and protected area, number and distribution of wells. The efficiency of cut-off wall was evaluated by its shape (Fig. 3). The solution has been done by finite element method, using Seftrans software - Seftrans (1996). Filtration-migration characteristics in the numerical model were estimated in accordance with knowledge from literature literatúry – Thomas (1996), Hulla (1996), Mucha (1987).

Recenzovala: RNDr. Z. Ženišová, PhD.