

Primljen / Received: 10.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 7.2.2018.

Prihvaćen / Accepted: 23.2.2018.

Dostupno online / Available online: 10.5.2018.

Procjena onečišćenja podzemnih voda na području bivšeg vojnog aerodroma

Autori:



Lubomír Petrula, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište u Brnu
petrula.l@fce.vutbr.cz



Prof.dr.sc. **Jaromír Říha**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište u Brnu
riha.j@fce.vutbr.cz



Doc.dr.sc. **Tomáš Julínek**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište u Brnu
julinec.t@fce.vutbr.cz

Stručni rad

Lubomír Petrula, Jaromír Říha, Tomáš Julínek

Procjena onečišćenja podzemnih voda na području bivšeg vojnog aerodroma

Rad se bavi analizom onečišćenja podzemnih voda na području bivšeg vojnog aerodroma uzrokovanog curenjem goriva iz spremnika te drugim slučajnim izlivanjem onečišćivača, uglavnom policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH). Modeliranjem je zamijećeno da nakon prestanka crpljenja zagađivač zaobilazi brtveni zid oko njegovih rubova te se nastavlja kretati prema području gdje se zahvaća voda. Ovim modelom zaključeno je da postoji niska razina opasnosti od zagađenja, uglavnom zbog utjecaja raspada (razgradnje) zagađivača te sorpcije.

Ključne riječi:

onečišćenje podzemnih voda, modeliranje transporta zagađivača, sorpcija, hidraulična barijera

Professional paper

Lubomír Petrula, Jaromír Říha, Tomáš Julínek

Evaluation of groundwater contamination in former military airport area

The analysis of groundwater contamination at the former military airport, due to fuel tanks leakage and other accidental spills, mainly involving polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), is presented in the paper. It was observed by modelling that, after termination of pumping, the contaminant by-passes the slurry wall around its edges and proceeds towards the withdrawal area. The modelling showed that the water contamination hazard is quite low, which is mainly due to pollutant deterioration (decay) and sorption.

Key words:

groundwater pollution, contaminant transport modelling, sorption, hydraulic barrier

Fachbericht

Lubomír Petrula, Jaromír Říha, Tomáš Julínek

Beurteilung der Grundwasserverschmutzung auf dem Gebiet des ehemaligen Militärflughafens

Die Abhandlung befasst sich mit der Analyse der Grundwasserverschmutzung auf dem Gebiet des ehemaligen Militärflughafens, verursacht durch das Auslaufen von Treibstoff aus dem Tank sowie durch anderes zufälliges Auslaufen von Verschmutzern, hauptsächlich polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK). Durch die Modellierung wurde beobachtet, dass der Verschmutzer nach Beendigung des Abpumpens die Dichtungswand um seine Ränder umgeht und seinen Weg zu dem Gebiet fortsetzt, wo das Wasser beeinflusst wird. Anhand dieses Modells kam man zu dem Schluss, dass die Gefahr der Verschmutzung hauptsächlich aufgrund des Einflusses der Zersetzung (Abbau) des Verschmutzers sowie der Sorption gering ist.

Schlüsselwörter:

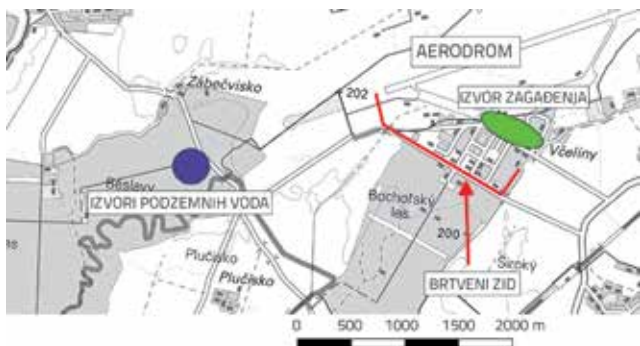
Grundwasserverschmutzung, Modellierung des Transports der Verschmutzer, Sorption, hydraulische Barriere

1. Uvod

Postoji mnogo područja gdje zagađenje uzrokovano prethodnim industrijskim, vojnim i drugim aktivnostima ugrožava podzemne vodne resurse. Pronos zagađenja kroz podzemlje uzrokovan je tokom podzemne vode te faktorima poput disperzije, razgradnje onečišćenja, sorpcije i sl. [1, 2]. Prethodnim istraživanjima provedenim u pješčanim poroznim tlima uz prisutnost mikroorganizma, zabilježena je biodegradacija zagađivača te rast broja mikroorganizama. Naknadno su utvrđeni parametri razgradnje zagađivača te utjecaj otopljenog zraka [3, 4]. Rad se usredotočuje na pitanje pronosa otopljene tvari. Uglavnom se bavi modeliranjem tečenja i transporta zagađivača pod utjecajem kemijskih reakcija i adsorpcije. Osim toga, obavlja se provjera valjanosti modela te se daje prikaz nekoliko različitih scenarija.

1.1. Opis područja

Područje analize nalazi se u Češkoj, u regiji Olomouc. Jugozapadno od vojnog aerodroma nalazi se vodozahvat podzemne vode (slika 1.). Voda iz ovog izvorišta koristi se potrebe stanovništva obližnjih naselja (općina). Tijekom 1970-ih primijećena je prisutnost nekoliko zagađivača u uzorcima podzemne vode [5]. Veći dio zagađenja uzrokovan je curenjem iz podzemnih spremnika goriva te slučajnim izlivanjima. Kako bi se zaštitio izvor podzemne vode, izgrađen je brtveni zid debljine 0,6 m, hidraulične vodljivosti 10^{-9} m/s, stvarajući time gotovo nepropusnu barijeru u odnosu na vodonosnik.



Slika 1. Karta područja

Za opis poroznog medija korišteni su arhivski geološki podaci iz 14 bušotina [6]. Radi izrade modela, geološki sastav na području je podijeljen na sljedeće slojeve:

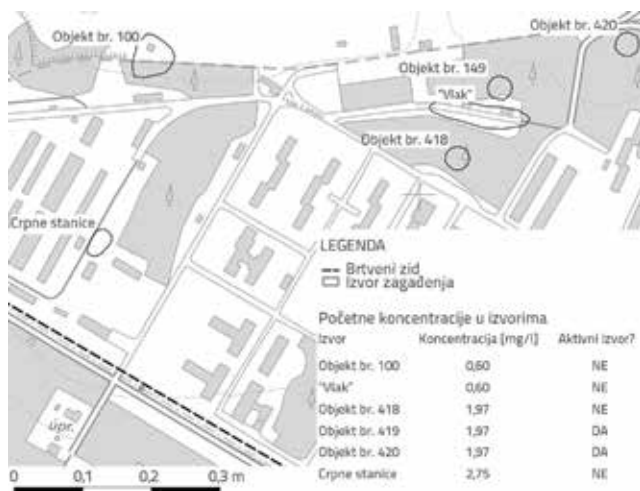
- površinski sloj (uglavnom od gline slabe propusnosti, $1,2 \cdot 10^{-9} - 9,0 \cdot 10^{-5}$ m/s),
- vodonosnik (pijesak, pješčani šljunak ili šljunak, visoke propusnosti, $5,0 \cdot 10^{-4} - 2,3 \cdot 10^{-3}$ m/s).

Površinski brtveni sloj debljine je oko 2,5 m, a debljina vodonosnika je oko 50 m.

1.2. Izvori zagađenja

Curenje zagađivača u podzemlje zabilježeno je više puta otkako postoji aerodrom. Svi izvori zagađenja prikazani su na slici 2. Obavljene analize potvrdile su prisutnost sljedećih zagađivača u području [5]:

- ugljikovodici $C_{10} - C_{40}$,
- benzen, toluen, etilbenzen, ksilen – BTEX,
- metil tert-butil eter – MTBE.



Slika 2. Karta izvora zagađivača

Neke su mjere zaštite i sanacije okoliša provedene kako bi se zaustavilo daljnje zagađenje. Te mjere uključuju brtveni zid i crpne zdence. Prema [5], na području zračne luke postoje dva objekta koji predstavljaju aktivne izvore zagađivača. Nadalje, tu su i tri objekta koji su neaktivni (sa stajališta proizvodnje zagađivača); u njima su zabilježene određene koncentracije zagađivača, premda ne postoji unos "novog" zagađivača. U ovom su radu simulacije pronosa provedene samo za ugljikovodike $C_{10} - C_{40}$.

2. Metode

Izrađen je 3D numerički model podzemlja koji se sastoji od dva glavna sloja. Gornji sloj predstavlja relativno nepropustan, izrazito onečišćen površinski sloj tla, a donji sloj predstavlja vodonosnik. Numerički model tečenja podzemne vode izrađen je pomoću računalnog programa MODFLOW uz primjenu MT3DMS modula za rješavanje problema pronosa zagađenja. Rješavanje problema podijeljeno je u dvije faze. Prvo je izrađen model toka podzemne vode, nakon čega je primijenjen modul za proračun pronosa zagađenja.

2.1. Tok podzemne vode

Kao prvo, uvedene su određene konceptualne pretpostavke prilikom modeliranja tečenja podzemne vode. Nakon toga, definirana je i modelirana prostorna domena te su određeni

rubni uvjeti (eng. *boundary condition* - BC). Konačno, pristupilo se verifikaciji i kalibraciji modela. Izračunani su različiti scenariji tečenja podzemne vode. Model toka podzemne voda izrađen je pod sljedećim pretpostavkama:

- laminarno i stacionarno tečenje,
- dimenzionalnost modela: 3D,
- homogena i izotropna sredina.

Jednadžba tečenja podzemne vode glasi [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \cdot \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) = Q_D \quad (1)$$

gdje je x_i odgovarajuća duljina u koordinatnom sustavu, k_i je hidraulična vodljivost [m/s], H je razina podzemne vode [m], a Q_D je izvor [m³/s].

Za dobivanje rješenja potrebno je definirati rubne uvjete. Na granicama modela koje čine okolni vodotoci primijenjen je Dirichletov rubni uvjet, [7]:

$$H(x, y, z) \Big|_{\Gamma_1} = \bar{H}(x, y, z) \quad [m] \quad (2)$$

gdje H je razina podzemne vode [m, m n.m.], \bar{H} je poznata razina vodnog lica u vodotoku [m, m n.m.] a Γ_1 je granica područja. Vrijednosti razine vodnog lica preuzete su od [8], po potrebi izračunane ili procijenjene.

Tečenje kroz dno vodonosnika je onemogućeno primjenom Neumannovog rubnog uvjeta [7]:

$$k_i \cdot \frac{\partial H}{\partial x_i} \cdot n_i = q_n \Big|_{\Gamma_2} = 0 \quad [m/s] \quad (3)$$

gdje n_i je kosinus vanjske normale na granicu Γ_2 [-], q_n je protok [m²/s] i Γ_2 je granica područja.

2.2. Transport i kemijske reakcije

Transport naftnih derivata teoretski se može opisati procesom kod kojeg su dvije stvari koje se ne mogu miješati prisutne u poroznom mediju. Zbog nedostataka dovoljne količine podataka, simuliran je pronos samo ugljikovodika C_{10} - C_{40} . Za te stvari uzeti su uzorci te su obavljena laboratorijska ispitivanja. Zbog nedostatka dodatnih informacija, bilo je potrebno nastaviti s pretpostavkom da su te stvari otopljene u vodi. Proces transporta je u osnovi nestacionaran. Jednadžba koja opisuje pronos s obzirom na advekciju, disperziju i kemijske reakcije glasi [1]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij}^H \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_{s,i} c) + q_s c_s + \sum R_n \quad (4)$$

Gdje je c koncentracija tvari [kg/m³], c_s je koncentracija tvari u izvoru [kg/m³], t je vrijeme [s], D_{ij}^H je hidrodinamička disperzija [m²/s], v_s je brzina vode u porama [m/s], q_s je protok na mjestu

izvora/ponora [m/s] a R_n predstavlja kemijske reakcije [kg/m³/s]. Jednadžba (4) definira promjenu koncentracije u vremenu. S desne strane izraza nalaze se faktori koji definiraju pronos tvari: advekcija, disperzija, izvori i kemijske reakcije. Sljedeće kemijske reakcije su razmatrane u simulacijama:

- sorpcija
- razgradnja (raspad)

Sorpcija opisuje prijenos zagađivača na površinu zrna poroznog medija. Pretpostavljena je ravnoteža između otopljene tvari i sorpcijske tvari. Brza reakcija tvari s okolinom u modelu je prikazana kao trenutačna konstitutivna promjena. Linearna izoterma je korištena za pronalazak rješenja. Raspad je u modelu opisan pomoću nepovratne reakcije prvog reda. Ovaj proces je opisan izrazom (5):

$$-(\lambda_1 n c + \lambda_2 \rho_b c') \quad [kg/m^3/s] \quad (5)$$

gdje je λ_1 brzina raspada otopljene tvari [s⁻¹], λ_2 je brzina raspadanja tvari koja podliježe sorpciji [s⁻¹], ρ_b je gustoća [kg/m³] i c' je relativna koncentracija tvari koja podliježe sorpciji [-]. U simulacijama je korištena pretpostavka da su brzine raspada λ_1 i λ_2 jednake.

Izvori zagađivača su prikazani kao skup Dirichletovih rubnih uvjeta:

$$c(x, y, z) \Big|_{\Gamma_3} = \bar{c}(x, y, z) \quad [kg/m^3] \quad (6)$$

gdje je c koncentracija [kg/m³], a \bar{c} je poznata koncentracija [kg/m³].

Početni uvjet glasi [7]:

$$c(x, y, z, t=0) \Big|_{\Omega} = c_0(x, y, z) \quad [kg/m^3] \quad (7)$$

gdje c_0 predstavlja koncentraciju na početku transporta [kg/m³] a Ω područje modela. Početni uvjet je također korišten za opis preostalog zagađenja u neaktivnim objektima (slika 2.).

2.3. Postavljanje modela

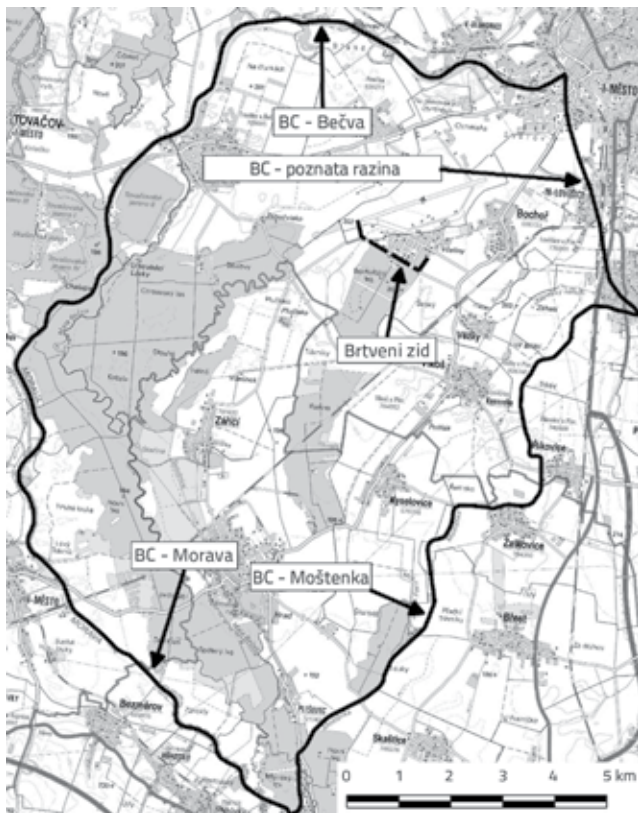
Prostorni model područja izrađen je pomoću GMS softvera. Granice područja predstavljaju potoci Beca, Morava i Mostenka (slika 3.). Područje je diskretizirano u pravilnu pravokutnu mrežu (10×10 m). Zbog geoloških karakteristika područja, model je sastavljen od dva sloja: vodonepropusnog sloja na površini i vodonosnika ispod njega. Rubni uvjet na mjestu brtvenog zida simuliran je kao barijera horizontalnom strujanju podzemne vode. Scenariji tečenja podijeljeni su u sljedeće skupine:

- kalibracije (usvojeno od [8]),
- verifikacije (usvojeno od [8]),
- nove scenarije (izvedeno iz [5, 8] ili nedavno predloženo).

Novi scenariji definirani su razinom vode na granicama područja (potocima). U prvom scenariju korištene su razine vode koje

odgovaraju protoku manjem od godišnjeg prosjeka (Q_d). U trećem scenariju razine vode odgovaraju protocima bliskim jednogodišnjem povratnom periodu. Razine vode u drugom scenariju nalaze se između vrijednosti prvog i trećeg scenarija.

- WS1: niske razine vode ($Q < Q_d$),
- WS2: više razine vode ($Q = 81,3 \text{ m}^3/\text{s}$, $h = 2,20 \text{ m}$),
- WS3: razine vode bliske protoku Q_1 ($Q = 190,6 \text{ m}^3/\text{s}$, $h = 3,20 \text{ m}$).



Slika 3. Modelirano područje i njegove granice

Dva scenarija crpljenja (SC) su uzeta u obzir:

- SC1: maksimalno dopušteni protok crpljenja na svim lokacijama crpljenja u području,
- SC2: maksimalno dopušteni protok crpljenja na svim lokacijama osim na zdencima smještenim u blizini brtvenog zida

Kombiniranjem razina vode i scenarija crpljenja izrađeno je 6 scenarija tečenja podzemne vode.

Transport C_{10} - C_{40} je modeliran pomoću modela tečenja podzemnih voda koji je prethodno kalibriran. Izvori zagađivača prikazani su na slici 2. Koncentracije C_{10} - C_{40} usvojene su od [5]. Bilo je potrebno odrediti vrijednosti sljedećih parametara kako bi se mogao izraditi model [5]:

- poroznost: gornji sloj: 0,16
donji sloj: 0,12
- uzdužna disperzivnost: 10 m
- koeficijent difuzije: $0,864 \text{ m}^2/\text{dan}$
- gustoća: $1650 \text{ kg}/\text{m}^3$

Kako bi se utvrdilo potrebno vrijeme simulacije, izračunan je pojednostavljeni scenarij koji ne uzima u obzir kemijske reakcije. Rezultati te simulacije su pokazali da je nakon perioda od 25 do 30 godina još uvijek prisutno zagađenje podzemnih voda. S obzirom na to, odabrano ukupno vrijeme simulacije iznosi 25 godina. Ustanovljeno je da kemijske reakcije predstavljaju važan faktor u procesu transporta onečišćenja u ovom području. Kao što je prije spomenuto, u naknadnim simulacijama uzeti su obzir utjecaji sorpcije i raspada. Varijante koeficijentata raspršenja prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Varijante koeficijentata raspršenja

Varijanta	Koeficijent raspršenja [m^3/kg]
S1	$1,34 \cdot 10^{-3}$
S2	$1,95 \cdot 10^{-3}$
S3	$3,90 \cdot 10^{-3}$
S4	$8,23 \cdot 10^{-3}$

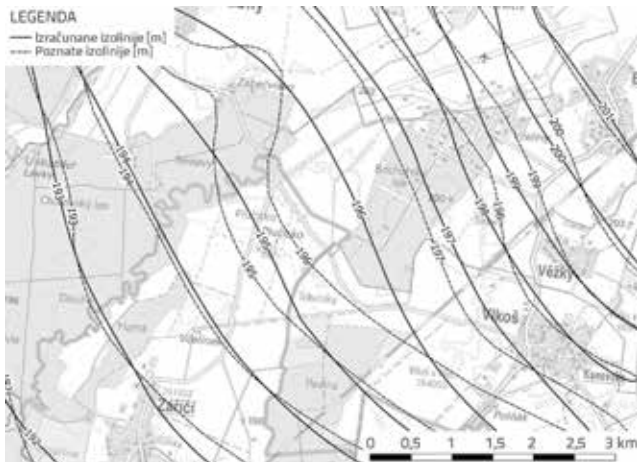
Raspad je definiran vrijednostima konstanta $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,092 \text{ godina}^{-1}$. Korištenje raspada u simulaciji obilježeno je slovom D. Ako se uzme u obzir isključivo utjecaj sorpcije ili raspada, moguće je definirati 5 scenarija transporta zagađivača. Kombiniranjem utjecaja sorpcije i raspada, moguće je definirati dodatna 4 scenarija: S1 + D, S2 + D, S3 + D i S4 + D. Dakle, u konačnici je korišteno 9 scenarija transporta koji su primijenjeni na svaki proračun tečenja. Ukupno su provedene 54 simulacije u kojima se uzima u obzir utjecaj kemijskih reakcija.

2.4. Kalibracija i verifikacija

Za kalibraciju modela korišten je scenarij s razinama vode temeljenima na podacima iz [8] pomoću kojih su izračunane izolinije razina podzemne vode. Crpljenje na području simulacije nije uzeto u obzir. Kalibracija je provedena za stanje prije izgradnje brtvenog zida. Kao što je spomenuto, cijela regija se sastoji od dva sloja (vodonepropusnog površinskog sloja i vodonosnika).

Za svrhe kalibracije, prostor je podijeljen u makroelemente. Hidraulična vodljivost dodijeljena je kao konstanta svakom od makroelementa. Konvergencija izmjerenih vrijednosti [8] postignuta je mijenjanjem vrijednosti hidraulične vodljivosti. Najprije su ugrubo procijenjene hidraulične vodljivosti metodom pokušaja, nakon čega je izvedena optimizacija u MODFLOW modulu PEST. Konačna usporedba izolinija razina podzemne vode prikazana je na slici 4. Nakon kalibracije, točnost modela provjerena je primjenom različitih scenarija razina vode iz [8].

Kalibracija modela transporta zagađivača nije izvršena zbog nedostatka podataka. Rezultati simulacije su samo kvalitativno uspoređeni sa starijim modelima [5]. Također, brojne simulacije su provedene kako bi se kvantificirala osjetljivost rezultata na različite ulazne varijable.



Slika 4. Konačna usporedba izolinija razina podzemnih voda

3. Rezultati i rasprava

3.1. Tečenje podzemne vode

Primjer izračuna piezometarskih visina (izohipsa) za scenarij WS1 + SC1 prikazan je na slici 5.



Slika 5. Primjer izračunanih razina podzemnih voda, WS1 + SC1

Vidi se da brtveni zid djeluje kao relativno nepropusna struktura. Kada bi se aktivirala hidraulična barijera, rad crpki bi zarobio sve zagađenje koje dolazi iz zračne luke. U slučaju gašenja crpki može se očekivati da će zagađivači prolaziti uz brtveni zid te preko njegovih rubova prema području zahvata vode.

3.2. Rezultati – pronos C_{10} - C_{40}

Teoretski, najgori mogući scenarij jest onaj za koji ne postoji hidraulična prepreka te kemijske reakcije nisu uzete u obzir. U ovom slučaju, model je pokazao da je zagađenje u stanju dospjeti do mjesta zahvata vode otprilike u 25 godina. Međutim, ova konzervativna pretpostavka

daleko je od stvarnosti. Stoga su u idućim simulacijama uzeti u obzir učinci konstitutivnih promjena i kemijskih reakcija, koje vjerojatno predstavljaju značajan utjecaj u ovom slučaju. S obzirom na vrstu konstitutivnih promjena, simulacije su podijeljene u dvije kategorije:

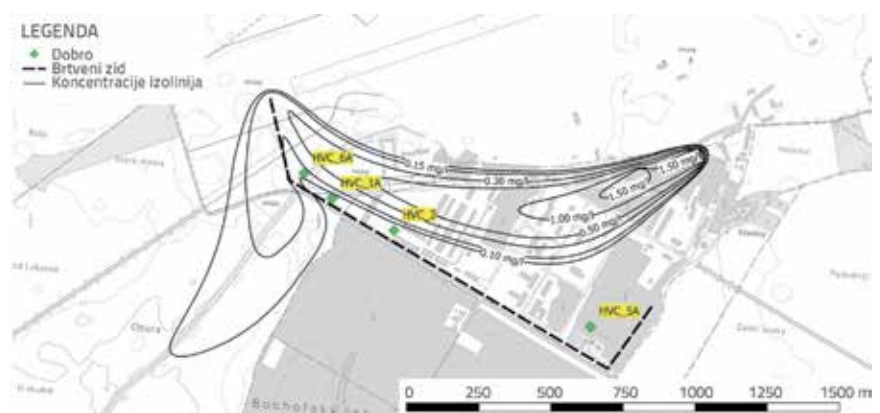
Simulacije koje uzimaju obzir samo raspad:

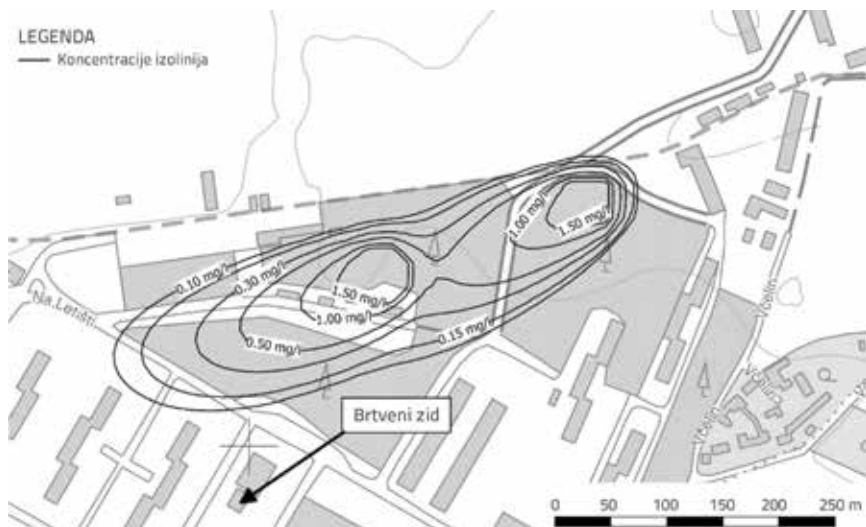
Primijećeno je da rezultati tih simulacija ne ovise o odabranom slučaju tečenja podzemne vode. Rezultati mnogo više ovise o odabranom scenariju crpljenja na mjestu hidraulične barijere i na području zahvata vode. Primjer ove simulacije u slučaju deaktiviranja hidraulične prepreke prikazan je na slici 6. Kao što je bilo očekivano, zagađivač je prolazio oko rubova brtvenog zida. Na nekim mjestima primijećen je i prodor kroz brtveni zid (kao što je objašnjeno u poglavlju 3.3). U scenarijima gdje je omogućeno crpljenje u blizini zida primijećen je prolazak zagađivača prema brtvenom zidu (ili čak i izvan njega), čime zagađenje ostaje zarobljeno djelovanjem crpnih zdenaca.

Simulacije koje uzimaju o obzir raspad i sorpciju:

Rezultati tih simulacija ne ovise o scenarijima razina voda na rubnim uvjetima niti o scenarijima crpljenja. Dominantan utjecaj sorpcije i raspada uzrokuje brzu imobilizaciju zagađivača. Crpljenje vode u blizini brtvenog zida se pokazalo kao nevažan utjecaj na rezultate simulacije jer se gotovo sve zagađenje razgradi prije nego što doprije do zida. Rezultati značajno ovise samo o vrijednosti koeficijenta raspršenja. Primjer ovakvog rezultata prikazan je na slici 7. Izračunane prijedene udaljenosti su reda nekoliko stotina metara (tablica 2.). Ti rezultati proturječe motrenjima onečišćenja podzemnih voda u bunarima u blizini barijere u kojima nije primijećeno nikakvo zagađenje do prije nekoliko godina.

Jedan od ciljeva ovog istraživanja bio je procijeniti postoji li mogućnost onečišćenja vodozahvatnog područja. Simulacijama su procijenjene udaljenosti koje zagađenje prijeđe ako koncentracije zagađenja iznose 0,10 mg/l, 0,50 mg/l. Također je procijenjeno i bočno širenje zagađivanja. Dobivene vrijednosti su prikazane u tablici 2., gdje je vidljivo da veća vrijednost koeficijenta raspršenja dovodi do manjih prijednih udaljenosti i bočnog širenja.

Slika 6. Koncentracije C10-C40; hidraulična barijera onemogućena (SC2); kemijske reakcije: D; $t = 25$ godina



Slika 7. Koncentracije C10-C40; hidraulična barijera onemogućena; kemijske reakcije: S1 + D; t = 25 godina

Tablica 2. Simulirane vrijednosti transporta; t = 25 godina

Simulacijska varijanta	Prijeđena udaljenost pri c = 0,50 mg/l [m]	Prijeđena udaljenost pri c = 0,10 mg/l [m]	Bočno širenje zagađenja [m]
SC1 – D	950	1340	990
SC2 – D	1100	2530	280
SC2 – S1 – D	150	450	140
SC2 – S2 – D	115	400	110
SC2 – S3 – D	75	325	100
SC2 – S2 – D	55	90	90

3.3. Rasprava

Jedan od problema predstavljala je kalibracija modela. Podaci za kalibraciju su usvojeni prema [8]. U tom se radu, međutim, nalaze tumačenja starijih i vremenski nedosljednih podataka. Osim toga, podaci o crpljenju nisu navedeni za ovaj scenarij. Za precizniju kalibraciju potrebni su novi podaci s terena. Rezultati su pokazali da utjecaj crpljenja predstavlja samo manji utjecaj na rezultate proračuna tečenja podzemne vode. Najjači utjecaj na rezultate simulacije imali su parametri procesa sorpcije i raspada.

Drugi je problem predstavljalo pronos brtvenog zida. Tečenje se oko zida u modelu moglo dobro prikazati, ali se procesi pronosa zagađivača mogu ispravno opisati samo ako se koriste parametri koji odgovaraju materijalu od kojeg je zid izveden. Svojstva brtvenog zida koja utječu na pronos zagađivači (npr. poroznost i disperzivnost) bila bi značajno drugačija kada bi se u model uvrstile vrijednosti koje odgovaraju mješavini cementa i gline. Nažalost, određivanje točnih vrijednosti parametara koji utječu na pronos zagađivača je rijetko kad moguće. Zbog toga u modelu

dolazi do pojave pronosa zagađivača kroz brtveni zid procesom disperzije makar je onemogućeno tečenje kroza zid. Ipak, zbog konzervativno odabranih ulaznih vrijednosti, rezultati simulacije se nalaze na strani sigurnosti.

Drugo pojednostavljenje je vezano uz kemijske reakcije. Nekoliko uzoraka tla su uzeti [5] i analizirani kako bi se odredile vrijednosti koeficijenta raspršenja i brzine raspada. Vrijednosti u simulacijama odgovaraju prosječnim vrijednosti tih parametara [5].

4. Zaključak

Proračun numeričkog modela proveden pod pretpostavkom da nema konstitutivnih promjena pokazao je da nakon prekida crpljenja, zagađivač može zaobići brtveni zid oko njegovih rubova i doći do područja zahvata vode u vremenu od približno 25 godina. U sljedećim simulacijama uvršten je efekt konstitutivnih promjena, čime su dobiveni realističniji scenariji.

Rezultati modela su pokazali da je pronos zagađivača u zračnoj luci pod snažnim utjecajem kemijskih reakcija koje se odvijaju u poroznom mediju. U nedostatku tih reakcija, područje zahvata vode bilo bi zagađeno unutar nekoliko desetljeća. Kada se kemijske reakcije

uzmu u obzir, model pokazuje da zagađivač ne bi dosegao područje zahvata vode čak i ako se prekine crpljenje vode koje stvara hidrauličnu barijeru. Također je utvrđeno da čak i kada se u modelu koriste najmanje vrijednosti koeficijenta raspršenja zagađivač se imobilizira već na području zračne luke. Područje zahvata vode nije bilo ugroženo ni jednim od simuliranih scenarija. Na temelju rezultata modela donesene su sljedeće preporuke:

- uspostaviti sustavno, pouzdano i dugoročno praćenje kvalitete podzemne vode,
- hidraulična barijera uz brtveni zid može biti uklonjena,
- napraviti analizu troškova kojom se uspoređuju izdaci za uklanjanje izvora onečišćenja i utjecaj onečišćenja vodonosnika,
- napraviti detaljnu analizu koeficijenata raspršenja i brzine raspada na zahvaćenom području kako bi se poboljšala pouzdanost simulacije,
- izraditi 3D model lokalnog pronosa zagađivača u okolini brtvenog zida i napraviti precizniju analizu osjetljivosti parametara vezanih uz procese sorpcije i raspada

Zahvala

Ovaj rad je pripremljen u sklopu projekta br. LO1408 AdMaS UP *Napredni materijali, struktura i tehnologija* i

FASTS163655 *Alati za procjenu rizika kvalitete površinskih vode pod ekstremnim hidrološkim situacijama*. Autori zahvaljuju Češkoj geološkoj službi i VaK Prerovu za ustupljene podatke.

LITERATURA

- [1] Bear, J., Verruijt, A.: Modeliranje tokova podzemnih voda i zagađenja: s računalnim programima za primjere, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, U.S.A., 1987, ISBN 9781556080159.
- [2] Wood, B., Dawson, C., Szecsody, J., Streile, G.: Modeliranje transporta i razgradnje zagađivača u slojevitim poroznim medijima, *Water Resources Research*, 30 (1994) 6, pp. 1833-1846.
- [3] Javadi, A., AL-Najjar, M.: Modeliranje transporta zagađivača u tlu uključujući učinak kemijskih reakcija metodom konačnih elementa, *Journal of Hazardous Materials*, 143 (2007) 3, pp. 690-701.
- [4] Simmons, C., Fenstermaker, T., Sharp Jr., J.: Tok podzemnih voda promjenjive gustoće i transport otopljene tvari u heterogenim poroznim medijima: pristupi, rješenja i budući izazovi, *Journal of Contaminant Hydrology*, 52 (2001) 1-4, pp. 245-275.
- [5] LOM PRAHA s.p. Dopuna obnovljenoj analizi rizika Prerov aerodroma. Prag, 2015.
- [6] Češka geološka agencija [online]. Dostupno na: <http://www.geology.cz/extranet/>.
- [7] Duchan, D., Říha, J., Zachoval, Z.: Hidraulični aspekti infiltracije oborinskih voda: hidraulika infiltracije oborinskih voda, Tehnološko sveučilište Brno, Građevinski fakultet, Brno, 2014, ISBN 9788021450172.
- [8] Kouřil, Z.: Podzemna voda u dolini rijeke Morave, Institut za geografiju ČSAV, *Studia geographica*, Brno, 1970.