

VYUŽITIE MODELOVANIA V SÚVISLOSTI S ANALÝZOU RIZIKA PRE LOKALITU JADROVEJ ELEKTRÁRNE A-1 JASLOVSKÉ BOHUNICE

MODELLING USE IN NPP A-1 JASLOVSKÉ BOHUNICE SITE RISK ANALYSIS

Juraj Benko, Tibor Kovács, Miloš Kostolanský, Július Plško

ABSTRACT

Geological environmental pollution at the NPP A-1 site occurred in 1976/77 plant accidents and subsequent handling of radioactively contaminated material. The major NPP A-1 groundwater contaminant is the tritium ${}^3\text{H}$ water molecule particle with $<10^5 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ volumetric activity penetrating groundwater. The threat of other radionuclides such as tritium to groundwater outside NPP Bohunice is eliminated and the main sources of contamination in the locality have been continuously remediated since 2000 by $6 \text{ dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ N-3 borehole pumping. This article utilizes the model developed for remediation of radioactively contaminated groundwater to provide calculated results for pollution risk analysis in the A-1 Bohunice nuclear power plant surrounds. Results detail pollution source characteristics, prognosis for remediation intervention and possible decontamination completion. Modelling results were thus utilized in site environmental risk assessment.

KEY WORDS

A-1 Jaslovské Bohunice Nuclear power plant, groundwater, monitoring, modelling, prediction

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Jadrová elektráreň A-1 Jaslovské Bohunice, podzemná voda, monitoring, modelovanie, prognóza

ÚVOD

Priemyslový areál s jadrovoenergetickými zariadeniami Jaslovské Bohunice (JZB) je vlastnícky i plošne rozdelený na 3 subjekty. Slovenské elektrárne, a. s. prevádzkujú 2 bloky jadrovej elektrárne (JE) V-2. Štátnej akciová spoločnosť JAVYS, a. s. vlastní dve vyradované JE (JE A-1, JE V-1), a tiež jadrové zariadenia (JZ) na spracovanie a skladovanie rádioaktívnych odpadov a medzisklad vyhoreného paliva (MSVP). JE A-1 bola odstavená v roku 1977, prvý blok JE V-1 bol odstavený na konci roku 2006 a druhý blok JE V-1 bol odstavený na konci roku 2008. V časti areálu JE A-1 sa v roku 2009 vyčlenila nová spoločnosť JESS a. s., ktorá zabezpečuje projekt výstavby Nového jadrového zdroja.

V príspevku sú uvedené výsledky modelových

výpočtov radiačného ohrozenia podzemných vód realizovaných pre potreby analýzy rizika znečisteného územia vypracovanej k stavu v roku 2011 (Kostolanský et al., 2012) v súvislosti so sanáciou rádioaktívne kontaminovaných podzemných vód v areáli JE A-1. Cieľom bolo stanoviť kritériá, za ktorých by bolo možné ukončiť sanáciu podzemných vód.

CHARAKTERISTIKA ÚZEMIA

Na geologickej stavbe územia sa podielajú sedimenty kvartéru a v ich podloží ležia sedimenty neogénu. Kvartér je v najvrchnejšej časti zastúpený sprašovým pokryvom würmského veku, sprašami, sprašovými hlinami a hlinami veku ris-würm. Spraše

Mgr. Juraj Benko, Mgr. Miloš Kostolanský, Ing. Július Plško

Ing. Július Plško EKOSUR Piešťany, prevádzka 919 31 Jaslovské Bohunice, benko@ekosur.sk

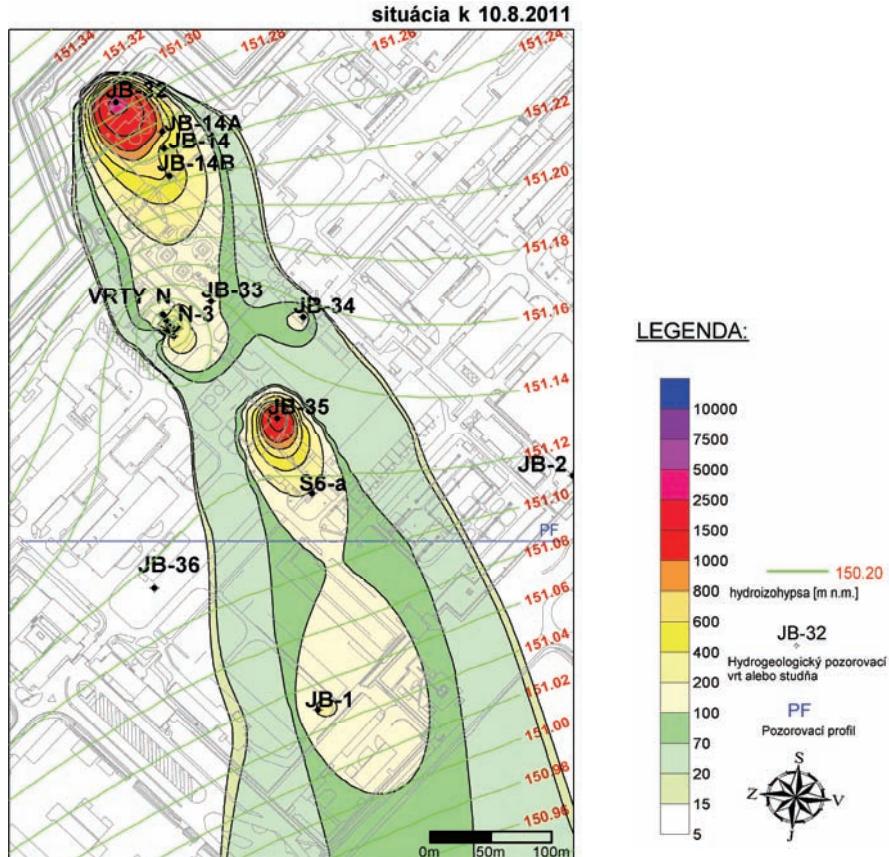
RNDr. Tibor Kovács

NuSi s.r.o., Svätoplukova 5, Bratislava, nusi@nusi.sk

a sprašové hliny majú premenlivú hrúbku – v areáli JZB a jeho okolí približne 20 m. V ich podloží sa nachádzajú spodnopleistocénne (ris, mindel) až vrchnopleistocénne (ruman) štrky, piesčité štrky a piesky, tvoriace I. zvodnenú vrstvu s mocnosťou v priemere okolo 20 m. Bázu týchto sedimentov tvoria zelenomodré až modrozelené plastické īly najvrchnejšieho pontu. Piesčité štrky, ktoré sú kolektorom kontamináciou najohrozenejšej I. zvodnenej vrstvy v predmetnej oblasti (ďalšie kolektory nachádzajúce sa v neogenných īloch vzhľadom na ich veľmi malú prieplustnosť znečistenie nemôže ohrozíť), sú dobre prieplustné a zvodnené. Hladina podzemnej vody je voľná a v priestore JZB sa nachádza približne 20 m pod terénom. Podzemná voda v záujmovom území má generálny smer prúdenia severozápad – juhovýchod až sever-juh. Priemerná rýchlosť prúdenia podzemných vód v prvej zvodnenej vrstve v areáli JE A-1 je $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Podzemná voda je v širšom okolí využívaná len obmedzene, pretože všetky okolité obce sú centrálnie zásobované vodou z vodovodu zo vzdialého zdroja pitnej vody. Stav podzemných vód v území je dostatočne známy. V oblasti JZB prebieha dlhodobý radiačný monitoring všetkých zložiek životného prostredia (Kostolanský et al., 2012).

Rádioaktívne znečistenie podzemných vód a analýza rizika

Znečistenie geologickej prostredia v areáli elektrárne JE A-1 je prítomné ako dôsledok havarijnych udalostí v elektrárni (1976, 1977) a následnou manipuláciou s rádioaktívne kontaminovanými látkami. Podzemné vody areálu JE A-1 sú dlhodobo kontaminované tríciom (^{3}H) s objemovou aktivitou v pravdepodobnom mieste prieniku kontaminácie do podzemných vód $< 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$ (obr. 1). Okrem trícia boli zistené aj ďalšie, slabovo migrujúce nuklidy ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K (prírodný rádionuklid). Trícto je na rozdiel od ostatných uvažovaných rádionuklidov nesorbujúci a v podzemnej vode je prenášaný ako súčasť molekuly vody. Ohrozenie podzemných vód mimo areál JZB inými rádionuklidmi ako je trícto sa podľa vykonaných modelových výpočtov, ako aj podľa výsledkov dlhodobého pravidelného monitorovania, vylučuje. Všetky činnosti v rámci areálu JZB (po dobu priemyselnej činnosti zariadení v areáli) pri ktorých môže dôjsť do styku s rádioaktívnymi látkami, resp. priestory v ktorých sa rádioaktívne látky nachádzajú, podliehajú špeciálnym legislatívnym podmienkam (radiačná, resp. zdravotnícka legislatíva) a obmedzeniam (režim kontrolovaného pásma).



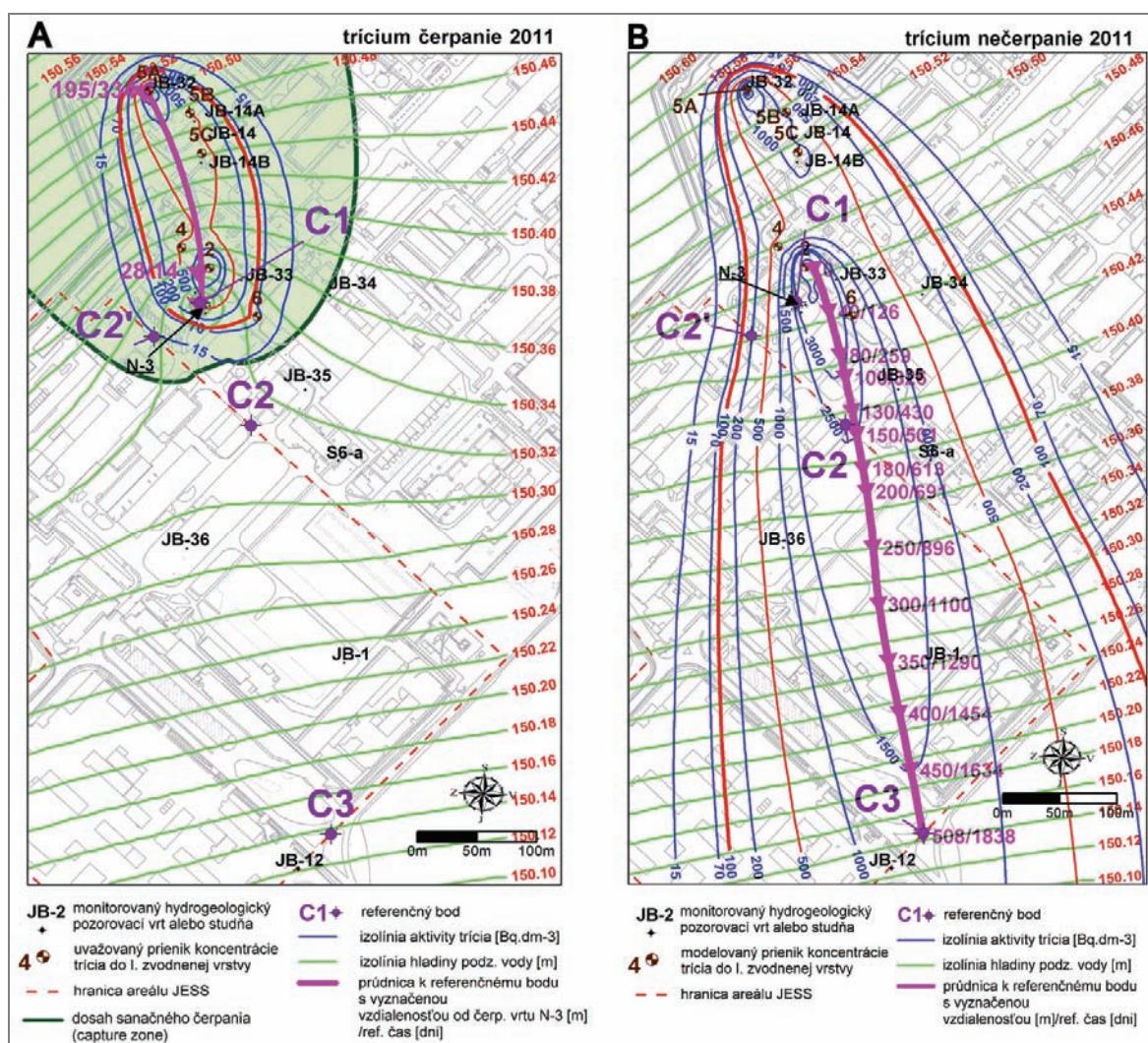
Obr. 1 Monitorovanie podzemných vod v areáli JE A-1: izolínne objemových aktivít trícia ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$) – III. štvrtrok 2011
Fig. 1 Groundwater monitoring in the NPP A-1 area: tritium volume activity isolines ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$) – III. quarter 2011

METODIKA

Zdroje rádioaktívneho znečistenia sú čiastočne lokalizované. Za historické primárne zdroje znečistenia možno považovať technologické objekty a potrubné inžinierske siete v severnej časti areálu JE A-1. V priebehu ich činnosti sa vygenerovali súčasné sekundárne zdroje prienikov rádioaktívnej kontaminácie do podzemných vôd. Ide o zeminy, nasiaknuté kvapalnými rádioaktívnymi médiami, kde prebiehajú sorbčno-desorbčné procesy závislé tiež na prieniku a pohybe externých vôd v ich telese (okrem trícia). V podzemných vodách 1. zvodnej vrstvy sa kontaminujúce rádionuklidy šíria v závislosti na hydraulických podmienkach a ich interakcií s geologickým skeletom tvoriacim zvodnenú vrstvu. Predpoklad prítomnosti kontaminácie je dlhodobý

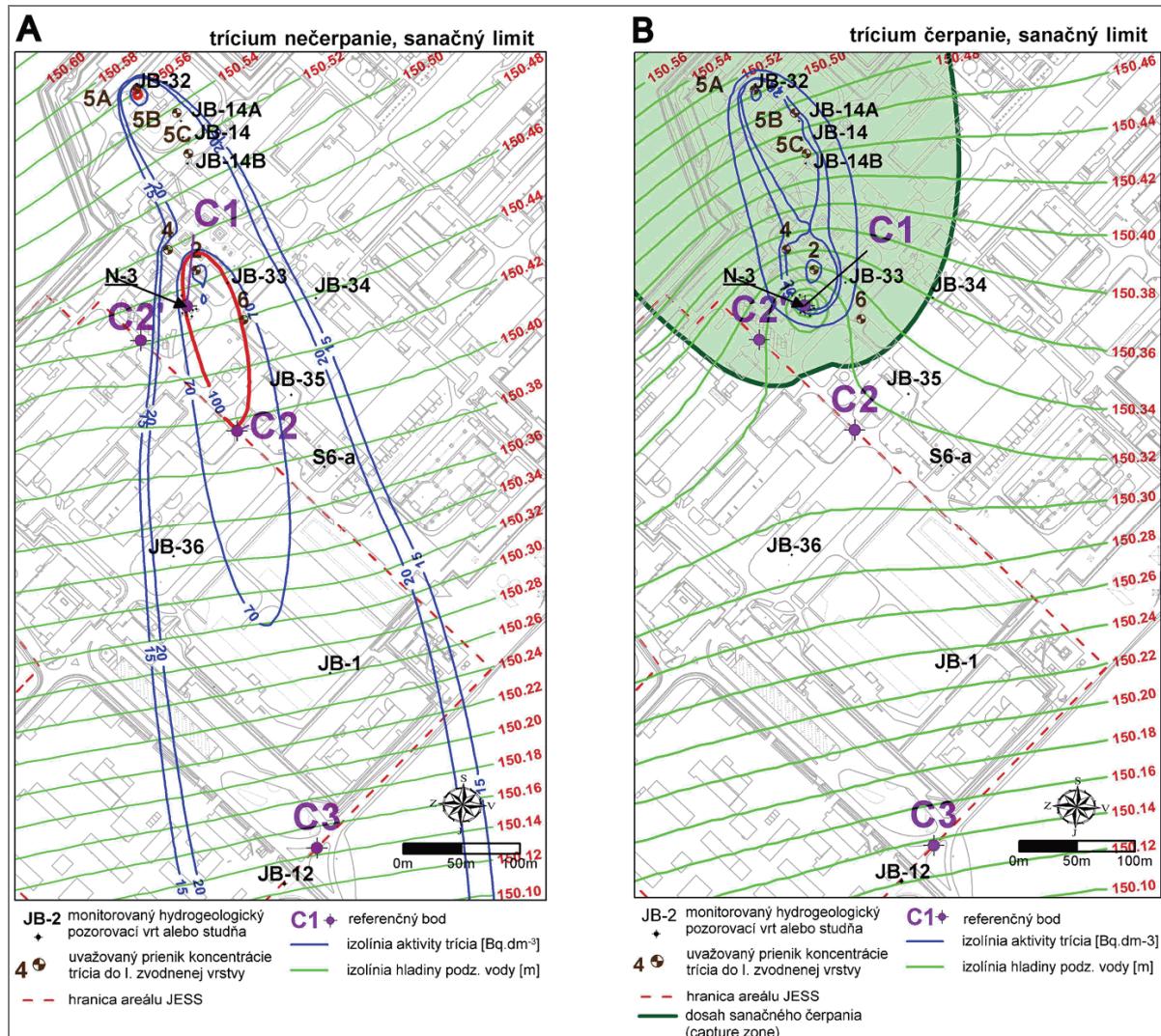
(i s uvážením likvidácie zdrojov, sanačných opatrení a prirodzeného rozpadu). V zmysle platnej legislatívy bola radiačná situácia v podzemných vodách definovaná ako mimoriadne zhoršenie kvality podzemných vôd, ktoré je nutné riešiť vhodne zvolenými opatreniami na nápravu. V oblasti hlavných zdrojov kontaminácie podzemných vôd je z toho dôvodu od roku 2000 v prevádzke kontinuálne sanačné čerpanie podzemných vôd z vrchu N-3. Intenzita čerpania je optimalizovaná na cca $6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Sanačné čerpanie zásadne pozitívne ovplyvňuje situáciu v oblasti.

Z hodnotenia aktuálnosti environmentálneho rizika pre danú lokalitu vyplynula na základe Metodického pokynu (Metodický pokyn MŽP SR z 27. 1. 2012 č. 1/2012-7) potreba zrealizovať výpočty rizika šírenia znečistenia.



Obr. 2 Modelová situácia kontaminácie podzemných vôd trícium v areáli JE A-1 pre situáciu v roku 2011: **A** Sanačné čerpanie vrtu N-3 v prevádzke (čerpané množstvo $6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); **B** Sanačné čerpanie nie je v prevádzke

Fig. 2 Modelled scenario of tritium contamination in the NPP A-1 area groundwater in 2011: **A** Remediation pumping of borehole N-3 operating at $6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ flow rate; **B** Remediation pumping not operating



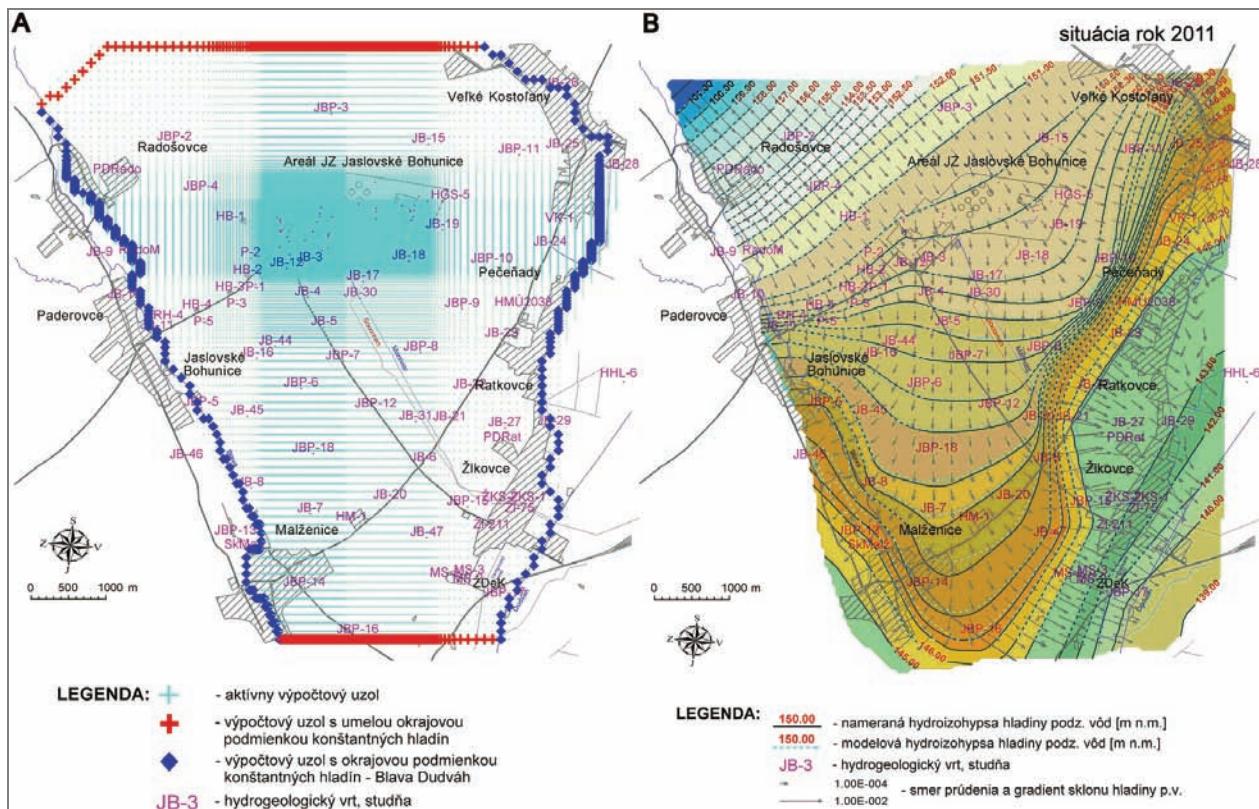
Obr. 3 Modelová situácia kontaminácie podzemných vôd tríom: v bode C2 $\leq 100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$ - cieľový stav sanácie.
A Sanačné čerpanie nie je v prevádzke; **B** Sanačné čerpanie je v prevádzke, čerpané množstvo $6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v čerpanom vrte.

A Sanačne cerpamie nie je v prevadzke; **B** Sanačne cerpamie je v prevadzke, cerpamie množstvo $6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, v cérpanom vŕte dosiahnutý sanačný limit

Fig. 3 Modelled scenario of tritium contamination activity in the groundwater: activity at $C2 \leq 100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$ – target of remediation; **A** Remediation pumping not operating; **B** Remediation pumping at $6 \text{ dm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ flow rate, sanitation limit reached in the pumped borehole

Určenie umiestnenia referenčných bodov C1, C2, C3, popísané v Metodickom pokyne, ovplyvnila skutočnosť, že v lokalite prebieha dlhodobé sanačné čerpanie vrtu N-3. Z toho dôvodu boli hodnotené dva hydraulické stavy: 1. sanačné čerpanie je v prevádzke a 2. sanačné čerpanie nie je v prevádzke. Taktiež bola zohľadnená reálna situácia kontaminácie podzemných vód areálu. Hodnotený bol sumárny účinok parciálnych príspevkov jednotlivých miest prienikov znečistenia, pričom referenčné miesta boli umiestňované do osi oblaku s najvyššou úrovňou kontaminácie podzemných vód. Bod C1 pre oba stavy bol umiestnený do čerpaného vrtu N-3 a bod C3 pre oba stavy bol umiestnený na

hranicu areálu s jeho okolím. Pre stav, keď sanačné čerpanie nie je v prevádzke (prirodzené prúdenie podzemných vôd) bol určený bod C2 na vnútornej hranici areálu JE A-1 a JESS, a. s. Pre stav, keď sanačné čerpanie je v prevádzke (vynútené prúdenie podzemných vôd), bol určený bod C2' ako analógia bodu C2 v zmenenom prúdení. Umiestnenie referenčných bodov je uvedené na obr. 2. a obr. 3. Z analýzy zdravotných rizík vyplýva, že pri uvažovaných expozičných cestách využívaní kontaminovanej podzemnej vody obyvateľstvom na pitné účely a závlahy (resp. aj konzumácia mäsa a mlieka), je riziko v skúmanej oblasti prípustné



Obr. 4 Záujmové územie: **A** Modelová siet výpočtových uzlov, **B** Hydroizohypy podzemnej vody [m n.m.] - porovnanie monitorovanej a modelovanej situácie

Fig. 4 Study area: **A** Model grid with computing nodes, **B** Groundwater hydro-isohyps [m a.s.l.] - monitored and modelled comparisons

(akceptovateľné), ak objemová aktivita trícia podzemných vôd nepresiahne úroveň $500 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$. Prevádzkovateľom bolo toto kritérium sprísnené na úroveň objemovej aktivity trícia $100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$, ktoré nesmie prekročiť hranicu areálu JAVYS, a. s., čo je v súlade s platnou legislatívou (Pokyn Ministerstva pre správu a privatizáciu národného majetku SR a MŽP z 15. 12. 1997, č. j. 1617/min., Nariadenie vlády SR č. 496/2010 Z. z.). To znamená, že toto kritérium je uplatňované na referenčné body C2 a C3. V ďalšom postupe bolo toto kritérium pomocou modelových výpočtov v určených referenčných bodoch testované, so zámerom získať cielové hodnoty sanácie pre dané referenčné body.

VÝSLEDKY

Modelové výpočty

Pre účely hodnotenia migrácie znečisťujúcich látok podzemnou vodou boli využité modelové výpočty. Použité boli dve nezávislé modelové simulácie pre hydraulickú a transportnú časť. Model bol zostavený a verifikovaný v širšom okolí tak, aby zvolené okrajové

podmienky situované do vodných tokov neovplyvňovali posudzovanú lokalitu areálu JE A-1 (obr. 4). Vstupnými parametrami boli výsledky terénnych, experimentálnych a modelových prác, ktoré sa v lokalite realizovali do času riešenia tejto úlohy.

V prvej časti bola riešená hydraulická situácia pomocou programu MODFLOW. Parametre modelového riešenia boli kalibrované na situáciu prúdenia podzemnej vody v 08/2011 (obr. 4). Hydraulická situácia v areáli JE A-1 je ovplyvnená kontinuálnym sanačným čerpaním z vrchu N-3. Hydraulický režim bol riešený ako stacionárny, dvojrozumný s voľnou hladinou. Do výpočtu neboli zahrnuté vplyvy evapotranspirácie a zrázok, napäťko z dlhodobého hydrogeologického prieskumu sa priamy vplyv na režim podzemných vôd neprekázal. Hydraulické parametre modelu boli upresňované tiež vo fáze kalibrácie transportného modelu, pri nastavovaní smerov hlavných osí kontaminačného oblaku z areálu JE A-1.

V druhej časti bola riešená, transportná časť úlohy pomocou programu MT3D s využitím hydraulických parametrov z MODFLOW-u. Parametre boli kalibrované na plošné rozloženie aktivít trícia

v pozorovacích vrtoch pred začiatkom sanačného čerpania v roku 2000 a aktuálnej situácie získané monitorovaním. Kalibrácia modelu bola spresnená aj vzhľadom na celkový priebeh čerpanej intenzity trícia z vrchu N-3. Intenzita čerpania trícia z vrchu N-3 podľa predpokladov predstavuje integráciu zdrojového člena v oblasti kritických objektov JE A-1. V priebehu kalibrácie transportnej časti modelu sa dospelo k poznatku, že poloha reálnych prienikov kontaminácie z nadložnej nesaturovanej vrstvy do podzemných vôd nemusí byť vzhľadom na značnú mocnosť nadložia a prítomnosť inžinierskych sietí totožná s polohou historických primárnych zdrojových objektov. Referenčným rádionuklidom pre kalibráciu modelu bol neretardujúci izotop trícia s polčasom rozpadu 12,3 roka. Pre transportné parametre zvodneného prostredia vo výpočtoch boli použité hodnoty: efektívna pôrovitosť 0,2, koeficient pozdĺžnej disperzivity 4,5 (m), koeficient priečnej disperzivity 4,05 (m). Pomerne vysoká hodnota koeficientu priečnej disperzivity bola použitá za účelom zahrnutia potvrdených režimových zmien v smeroch prúdenia podzemných vôd, ktoré tiež spôsobujú priečny rozptyl oblaku trícia v podzemnej vode.

Úlohou modelových výpočtov bolo stanoviť cieľové hodnoty sanácie, t.j. kedy bude možné sanačné čerpanie podzemných vôd v lokalite ukončiť. Modelovými výpočtami boli v oblasti areálu elektrárne JE A-1 riešené dve situácie pre dva rôzne stavky.

Prvá situácia zodpovedala roku 2011. Nakol'ko v lokalite je dlhodobo v prevádzke sanačné čerpanie

vrtu N-3 (vynútené prúdenie), boli parametre zdrojov kontaminácie kalibrované na monitorovaný stav rozšírenia kontaminácie v roku 2011 (obr. 2A). Rozsah depresného kužeľa dokladuje predpoklad, že sanačným čerpaním vrtu N-3 (výkon čerpania $6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) sú zasahované predpokladané zdroje prieniku kontaminácie do podzemných vôd. V ďalšom kroku sa pri zachovaní parametrov zdrojov kontaminácie počítala hypotetická situácia ustáleného stavu prirodzeného prúdenia v podzemnej vode keby sanačné čerpanie nebolo v prevádzke (obr. 2B).

Druhá situácia zodpovedá ustálenému stavu prirodzeného prúdenia (bez sanačného čerpania), keď by v referenčnom bode C2 bol dosiahnutý požadovaný cieľový stav – koncentrácia trícia v podzemnej vode $\leq 100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$ (obr. 3A). Za účelom získania cieľovej hodnoty sanácie (podmienka: koncentrácia trícia v referenčnom bode C2 $\leq 100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$) bola modelovaná koncentrácia trícia v čerpanom vrte N-3 (bod C1) pri realizácii sanačného čerpania výkonom $6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 3B).

Výsledky výpočtov

Vypočítané cieľové hodnoty sanácie sú nasledovné: objemová aktivita trícia v referenčnom bode C1 (vrch N-3) v stave počas prevádzky sanačného čerpania by bola $\leq 26 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$. Tento stav by umožnil ukončiť prevádzku sanačného čerpania s výsledkom následného udržania situácie v bode C2 $\leq 100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$ (tab.1).

Tab. 1 Hodnoty modelovej koncentrácie trícia ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$) v podzemnej vode v referenčných bodoch
Tab. 1 Modelled values of referenced-points groundwater tritium concentration

Ozn.	Stav v roku 2011		Cieľ sanácie	
	poz. bod	stav s čerpaním N-3	stav bez čerpania N-3	stav s čerpaním N-3
C1 ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$)	693	3155	26,24	120
C2 ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$)	3,7	2636	0,14	99
C2' ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$)	13,6	190	0,52	7.2
C3 ($\text{Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$)	0,8	1398	0,03	52

ZÁVER

Výsledky výpočtov pre hodnotenie environmentálneho rizika vyplývajúceho z tríciovej kontaminácie podzemných vôd v oblasti JE A-1 poukazujú na skutočnosť, že v súčasnom stave (r. 2011) nie sú dosiahnuté podmienky akceptovateľnosti rizika vyplývajúce z rizikovej analýzy, t.j. koncentrácia trícia v podzemnej vode na hranici areálov JESS a.s.

a JAVYS a.s. nie je udržateľná na úrovni $< 100 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$. Situácia vyžaduje aktívne sanačné opatrenia, ktoré sú realizované vo forme sanačného čerpania vrchu N-3. Podmienka akceptovateľnosti rizika bude splnená ak objemová aktivita trícia v čerpanom vrte N-3 klesne na úroveň $26 \text{ Bq} \cdot \text{dm}^{-3}$ a sanácia bude môcť byť ukončená.

LITERATÚRA

- KOSTOLANSKÝ, M., BENKO, J., PLŠKO, J. 2012: Monitorovanie a ochrana podzemných vód jadrovoenergetickej lokality Jaslovské Bohunice. Ročná súhrnná správa za rok 2011. Manuskript – EKOSUR, Jaslovské Bohunice.
- Pokyn Ministerstva pre správu a privatizáciu národného majetku SR a MŽP z 15. 12. 1997, č. j. 1617/min. na postup pri vyhodnocovaní záväzkov podniku z hľadiska ochrany životného prostredia v privatizačnom projekte predkladanom podnikom v rámci privatizácie.*
- Nariadenie vlády SR č. 496/2010 Z. z., ktorým sa mení a dopĺňa nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 354/2006 Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na vodu určenú na ľudskú spotrebu a kontrolu kvality vody určenej na ľudskú spotrebu.*
- Metodický pokyn MŽP SR z 27. 1. 2012 č. 1/2012-7 na vypracovanie analýzy rizika znečisteného územia.*

SUMMARY

Geological environmental pollution at the NPP A-1 site occurred in 1976/77 plant accidents and subsequent handling of radioactively contaminated material. The major NPP A-1 groundwater contaminant is the tritium ${}^3\text{H}$ water molecule particle with $< 10^5 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ volumetric activity penetrating groundwater. The threat of other radionuclides such as tritium to groundwater outside NPP Bohunice is eliminated and the main sources of contamination in the locality have been continuously remediated since 2000 by $6 \text{ dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ N-3 borehole pumping.

Updated environmental risk assessment includes calculations of risks posed by contamination transport. Herein, the following two hydraulic conditions were evaluated: (1) with remediation pumping operating and (2) remediation pumping not operating. Analysis of human health risk indicates that groundwater tritium levels less than $500 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ is acceptable for drinking water and for milk and meat production irrigation. This limit has now been tightened to $100 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ by the NPP Bohunice operator. The following models evaluated pollutant migration through the groundwater (1) MODFLOW calculations solved hydraulics and (2) MT3D catered for transport. Our model computations determined remediation values where remediation pumping could be terminated; with calculations centred on the “stop” and “go” alternatives of remedial pumping. The “stop” situation corresponds to the state in 2011, and “go” corresponds to a hypothetical condition for achieving remediation criteria of tritium concentration at $\text{C2-3} \leq 100 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$. The calculated remediation target values are as follows: tritium volume activity at borehole N-3 reference point C1 during pumping operation $\leq 26 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$. This state defines terminated pumping with subsequent tritium concentration in the natural flow maintained at the C2 point level $\leq 100 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$. Calculated results of tritium groundwater contamination in the NPP A-1 surrounds highlight that the acceptable risk was not achieved in the current 2011 state. Further, the desired tritium in groundwater concentration at the inner NPP A-1 border is unsustainable at the $< 100 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ level. This situation requires active remediation via borehole N-3 pumping. In conclusion, risk will attain acceptable levels only when tritium volume activity in pumped borehole N-3 decreases to $26 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ and remediation can be completed.