

Potenciálne zdroje strategických množstiev podzemnej vody v Bratislavskom samosprávnom kraji

JURAJ MICHALKO¹, DUŠAN BODIŠ¹, PETER MALÍK¹, JOZEF KORDÍK¹, KATARÍNA
FAJČÍKOVÁ¹, ZUZANA GROMUSOVÁ^{1, 2} a PAVEL VEIS¹

¹Štátny geologický ústav D. Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava

²Katedra experimentálnej fyziky, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky,
Univerzita Komenského, Mlynská dolina F2, 842 48 Bratislava

Potential sources of strategic amounts of groundwater in the Bratislava region

Alternative sources of the groundwater have strategic importance mainly for urban agglomerations in crisis scenarios. For selection of such sources there were methodically developed quantitative (source of pollution-vulnerability-receptor) and qualitative (safety, chemical state, stable isotope content and tritium activity interpretation) criteria. These criteria were applied in real conditions of the Bratislava region (Slovakia). Via combination of the developed criteria and natural conditions of the Bratislava region, conceptual hydrogeological model, geochemical modelling and contemporary using of the groundwater there were selected two potential areas of the groundwater strategic resources. One is adjacent the Žitný ostrov area, being selected by the transport branch of circulation with a help of stable isotopes of oxygen and hydrogen and chemical composition of the groundwater in Quaternary sediments from depth of 80 m, including Neogene sediments. Second source is the Devínska Kobyla hill massif, selected with a help of reconstruction of the groundwater chemical composition by inverse modelling from precipitation and by characteristic of chemical composition of sulphur in the rock environment and water. Both areas have lower vulnerability than contemporary used sources, they are minimally used and the groundwater fulfils conditions of the local good chemical state. Possibilities of using of these two strategic resources areas are adequate from the point of view of the amount and access of the drinking water supply for the population.

Key words: alternative water resources, conceptual model, isotopic composition, inverse modelling, groundwater quality, groundwater quantity, Bratislava region

Úvod

Náhle kvantitatívne a kvalitatívne zmeny stavu podzemnej vody môžu spôsobiť závažné problémy v zásobovaní obyvateľstva pitnou vodou. V súčasnosti je problematika analýzy rôznych scenárov týchto zmien sústredená najmä na hľadanie alternatívnych zdrojov podzemných pitných vôd, hydrogeologické a hydrogeochemické kritériá ich identifikácie, vrátane štúdie environmentálnych izotopov, zhromažďovanie informácií a ich sprístupnenie v GIS, problematiku ekonomiky, manažmentu a iné aspekty. Záplavy alebo suchá zapríčinené globálnymi klimatickými zmenami, geohazardy a epizódy náhleho kontaminácie vyvolané nukleárnymi alebo industriálnymi nehodami môžu podľa Mela et al. (2008) vážnym spôsobom znížiť dostupnosť pitnej vody pre zásobovanie obyvateľstva. Na predchádzanie uvedeným situáciám je podľa Capelliho et al. (2001) nevyhnutné identifikovať a charakterizovať „strategické zdroje podzemnej vody“ a zhromaždiť ich vo funkčnom GIS systéme ako základ pre manažment kvality podzemných vôd (Canter et al., 1994). Vzťahom náhradných zdrojov podzemných pitných vôd k potrebám zásobovania a zavlažovania, ekonomickými aspektmi a rozpormi v manažmentoch vodných plánov sa zaoberajú

Sheriff et al. (1996), Scawthorn et al. (2000), Lowry et al. (2003), Verjus, P. (2003), Perfler et al. (2007), Schwecke et al. (2008), Carrera-Hernandez a Gaskin (2009) a iní. Bratislava, hlavné mesto Slovenska, v súčasnosti prakticky nepociťuje veľkosť problémov v spojení s náhlými kvantitatívnymi a kvalitatívnymi, ale ani inými zmenami stavu podzemných vôd, ktoré by ohrozovali zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou. Mesto a široké okolie je zásobované pitnou vodou vysokej kvality z fluviálnych sedimentov Dunaja. Identifikácia strategických zásob je však nevyhnutnou súčasťou vodného manažmentu do budúcnosti. Ako perspektívne oblasti strategických zásob podzemných vôd boli vyčlenené hlbšie časti kvartérnych sedimentov a oblasť sútoku riek Dunaja a Moravy. Situovanie záujmového územia v rámci Slovenskej republiky je prezentované na obr. 1.

V príspevku je na základe vypracovaných kritérií sústredená pozornosť na štúdium strategických zdrojov podzemných vôd v dvoch vybraných oblastiach – Žitný ostrov a oblasť sútoku riek Morava – Dunaj. Pri posudzovaní možností využitia týchto oblastí ako strategických zdrojov boli využité moderné metódy hydrogeologického a geochemického prieskumu, vrátane štúdia environmentálnych izotopov.



Obr. 1. Územie Bratislavského samosprávneho kraja.

Fig. 1. Territory of the Bratislava Self Governing Region.

Metodika

Koncept kvantitatívneho hodnotenia strategických zdrojov pitných vôd spočíva v schéme „pôvod – cesta (pôsobenie) – cieľ (receptor, ovplyvnená oblasť)“, ktorá sa používa v environmentálnom manažmente.

V danej schéme v rámci hydrogeologických systémov a hydrogeologických procesov zodpovedá pojmu „cesta“, resp. „pôsobenie“ vlastný transport znečisťujúcej látky od zdroja znečistenia k cieľu (ovplyvnenej oblasti). Relatívna „ľahkosť“ alebo „obtížnosť“, s akou sa tento transport v konkrétnom hydrogeologickom prostredí odohráva, potom určuje zraniteľnosť podzemnej vody v danom prostredí. Pôsobenie hazardu (cesty šírenia sa kontaminantu) teda závisí od zraniteľnosti, resp. je definované zraniteľnosťou podzemnej vody:

hazardy (rôzne zdroje znečistenia) → transport ovplyvnený zraniteľnosťou → podzemná voda, zvrátená, (využívaná) pramene alebo studne

Kvalitatívne kritériá na vyhľadávanie a využívanie strategických zdrojov podzemnej vody v BSK sú nasledovné:

- biologická a mikrobiologická nezávadnosť vody
- dobrý chemický stav
- interpretácia obsahov stabilných izotopov kyslíka, vodíka, dusíka a rádionuklidu trícia.

Hodnotenie chemického stavu bolo urobené v roku 2009 pre všetky vyčlenené kvartérne aj predkvartérne útvary podzemnej vody (ÚPV) na Slovensku (Bodiš et al., 2008). Základom tohto hodnotenia boli výsledky monitoringu kvality podzemných vôd z roku 2007, pričom sa vychádzalo z priemerných hodnôt parametrov bodových údajov premietnutých do plošnej informácie a z hodnotenia rizikovosti ÚPV z roku 2004. Stanovené boli požadové a prahové hodnoty, ktoré sa dajú použiť ako optimálne hodnotiace kritérium kvality podzemnej vody pre všetky ÚPV v BSK. Pre kvalitatívne kritériá je nevyhnutné poznať hydrogeochemické pomery a aplikáciu metód geochemického modelovania.

Veľmi dôležitú úlohu majú pri vyhľadávaní strategických zdrojov podzemných vôd obsahy stabilných izotopov kyslíka, vodíka, dusíka a rádionuklidu trícia. Stabilné

nuklidy deutérium a kyslík sú prírodnými zložkami vody. Izotopovými analýzami vody z rôznych lokalít sveta sa zistilo, že hranice, v ktorých kolíše koncentrácie deutéria, prevyšujú o rád prípadne viac hranice, v ktorých sa pohybujú koncentrácie ťažkého kyslíka. Uvedená skutočnosť sa vysvetľuje tým, že deutérium a vodík sa delia prírodnými procesmi efektívnejšie ako ľubovoľný iný pár stabilných nuklidov v dôsledku veľkého rozdielu v atómových hmotnostiach. Deutérium sa preto považuje za jeden z najzaujímavejších nuklidov z hľadiska procesov, ktorými voda prechádza v hydrologickom cykle a najmä podzemná voda v geologickom prostredí.

Uvedené skutočnosti sa dajú významne uplatniť ako kritériá genézy podzemnej vody, na charakteristiku kolektorov a pri monitoringu týchto stabilných izotopov na zistenie retardácie podzemnej vody za iniciálnou vodou, ktorou sú spravidla zrážky alebo voda povrchového toku.

Prírodné pomery a súčasný stav využívania podzemných vôd

Podunajská panva, do ktorej patrí významné vodohospodárske územie Žitný ostrov, má misovitú brachysynklinálnu stavbu, na okrajoch obmedzenú zlomami. Na horniny predterciérneho podložia, tvorené veporikom, tatrikom a hronikom, ktorých vývoj bol ukončený násunom príkrovov v kriede, sa počas neogénu usadili morské, brakické a sladkovodné sedimenty, tvoriace hlavnú výplň podunajskej panvy. Aj keď sedimentácia v podunajskej panve začala v jej severných častiach už v spodnom miocéne, na území gabčíkovej priehlbiny sa depocentrá otvárali až vo vrchnobádenskej fáze synriftového štádia.

Geologický vývoj územia v kvartéri bol na jednej strane podmienený zložitými neotektonickými pohybmi čiastkových morfotektonických štruktúr podunajskej panvy a Západných Karpát a s tým súvisiacim formovaním a distribúciou akumulácií Dunaja a jeho prítokov – Čiernej vody, Dudváhu a Váhu, čo na strane druhej vo vzájomnej interakcii s periodickými klimatickými zmenami v kvartéri podmienilo litologickú a faciálnu pestrosť sedimentov a ich stratigrafiu. Z celkovej škály kvartérnych sedimentov majú z hľadiska genézy, objemu, plošného rozsahu, stratigrafie

a polôh výskytu na území jednoznačne dominantné postavenie fluválne akumulácie kvartérnych vodných tokov (spodný pleistocén – holocén), na báze miestami s prechodnými fluvio-limnickými súvrstviami (vrchný pliocén/spodný pleistocén). Dovedna tvoria sedimentačnú výplň i v kvartéri subsidujúcej centrálnej časti podunajskej panvy. Kvartérna výplň panvy v oblasti Žitného ostrova je zložená z troch výraznejších súvrství (komplexov). Akumulácie spodného pleistocénu v superpozičnom vývoji boli zistené len v centrálnej časti podunajskej panvy, kde majú bázu v hĺbke až 500 m a ich hrúbka tu dosahuje 340 m (Császár et al., 2000; Scharek et al., 2000). Okrem centra gabčíkovej depresie sú tieto sedimenty uložené diskordantne na podložínych členoch vrchnej stavby neogénu a smerom k okrajom depresie sa ich hrúbka znižuje do cca 10 m. Na povrch nevystupujú.

Pre geologický vývoj územia v strednom a vrchnom pleistocéne je charakteristická rozsiahla fluválna sedimentácia Dunaja a jeho karpatských prítokov, najmä Váhu a Čiernej vody. Panvový vývoj centrálnej gabčíkovej depresie pokračoval synsedimentárnym poklesom, do ktorého boli postupne inkorporované aj stabilnejšie, resp. menej intenzívne poklesávajúce okrajové časti. Pre uvedené obdobie je typické uloženie sedimentov stredného súvrstvia, označovaného ako dunajská štrková séria (Janáček, 1967, 1969). Súvrstvie je tvorené stredno- až vrchnopleistocénnymi fluválnymi sedimentmi Dunaja a Váhu. V centre depresie dosahuje jeho hrúbka až 160 m a pri jej okrajoch smerom k pahorkatinám sa znižuje na 50 až 30 m. Súvrstvie pozostáva zo strednozrnných až hrubozrnných štrkov, piesčitých štrkov, pieskov a ojedinelých hrubých interglaciálnych polôh ílov a hĺn s fosílnou faunou (Pristaš et al., 1996). Holocénne sedimenty vrchného súvrstvia (v širšom zmysle nívna fácia) tvoria litofaciálne pestrý, laterálne sa meniaci povodňový nívny kryt na vrchnopleistocénných piesčitých štrkoch Dunaja, Váhu a ich prítokov i na štrkoch a pieskoch korytovej a prikorytovej fácie. Tvoria podstatnú časť povrchu Žitného ostrova. Reprezentujú ich hlinité a piesčito-hlinité povodňové sedimenty. Ich hrúbka sa zväčšuje od jadra Žitného ostrova smerom k hlavným tokom až na 3,5–5 m. Sedimenty sa vyznačujú zložitou stavbou, ktorá odráža recentné tektonické pohyby, ich genézu spojenú s opakovanými povodňovými vlnami a zmenou konfigurácie tokov. Povrch riečnych nív Žitného ostrova je spretý hustou sieťou mŕtvych ramien, ktoré sa nachádzajú v rozličných štádiách vývoja. Ich vývoj úzko súvisí so zmenou tokov spôsobenou ich častým divočením.

Hydrogeologický kolektor tvoria horniny fluválnych náplavov povrchového toku Dunaja. Kolektor, ktorý reprezentujú štrky, piesčité štrky a piesky, je trvalo zvodnený voľnou hladinou podzemných vôd s veľmi vysokou transmisivitou. Podzemné vody sú v hydraulikej spojitosti s povrchovým tokom a ich úroveň je závislá od prietoku v povrchovom toku. Štrkopiesčité a štrkové sedimenty, ktoré majú v komplexe kvartérnych fluválnych náplavov dominantné postavenie, sú typické vysokou variabilitou obsahu piesčitej frakcie, čím vzniká vrstevná heterogenita prostredia.

Územie v oblasti medzi Devínom a Devínskou Novou Vsou, ohraničené riekami Dunaj a Morava na juhu a západe a vrcholovými časťami kóty Devínska Kobyla (514 m) na západe, pričom severná hranica skúmaného územia prechádza spojnicou lokality Sandberg (j. od Devínskej Novej Vsi) a kótou 514 a východná hranica spojnicou zmienenej kóty a veľkým devínskym kameňolomom, má pomerne zložitý obeh podzemných vôd.

V území vystupujú zvodnené budované horninami kryštalinika, mladšieho paleozoika, nekrasového mezozoika, ako aj mezozoickými skrasovatenými vápencami, medzizrnnými kolektormi bádenského a sarmatského veku a kvartérne zvodnené aluviálnych náplavov Dunaja i Moravy.

Z hľadiska obiehajúcich množstiev podzemných vôd majú v hodnotenom regióne dominantné postavenie holocénne (mladokvartérne) fluválne akumulácie Dunaja a v menšej miere Moravy. Ich materiálové zloženie je veľmi podobné, rozdiely sú však vo veľkosti ich priepustnosti, ako aj v geometrických vlastnostiach – hrúbke a šírke.

Do hodnoteného územia spadá najmä oblasť Sedláčkovho ostrova pri dunajskom ľavobreží medzi obcou Devín a veľkým devínskym kameňolomom. Táto lokalita bola hydrogeológmi dosť podrobne skúmaná s cieľom využívania miestnej kvalitnej vody na hromadné zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou. Tri hydrogeologické vrty dokumentovali výdatnosti 14,0 až 37,4 l · s⁻¹ podzemných vôd s priemernou mernou výdatnosťou až 14,52 l · s⁻¹ · m⁻¹. Sedláčkov (Devínsky) ostrov je významným vodárenským územím s dobrými podmienkami na dopĺňanie množstiev podzemných vôd. Zabudované sú tu štyri širokopriemerové studne, z ktorých sa odoberá okolo 97,0 l · s⁻¹ podzemných vôd na zásobovanie Devína, Devínskej Novej Vsi a Záhorskej Bystrice. Porubský (1973) uvádza, že z ostrova je možné odoberať 250,0 až 300,0 l · s⁻¹ vôd. V súčasnosti (2005) sa z lokality Sedláčkov ostrov využíva ročne zo 4 studní v priemere okolo 13,5 l · s⁻¹ podzemnej vody (Slovenský hydrometeorologický ústav – Štátna vodohospodárska bilancia – Časť podzemné vody, 2005).

Podľa výsledkov hydrogeologických prieskumov v oblasti Sedláčkovho ostrova je štrkový kolektor dunajských náplavov vo svojej spodnej časti geometricky obmedzený kryštalinickým podložím (granitoidy a kryštalické bridlice v hĺbkach 8,3 až 14,7 m pod terénom) a z vrchnej časti prikrytý 1,0 až 3,6 m hrubou vrstvou holocénnych náplavových piesčitých hĺn, pieskov a hlinitých pieskov (Hýroššová, 1967; Jendraššák, 1971; Pospíšil, 1996). Priemerná hrúbka priepustných štrkov a pieskov je okolo 10,0 m. Narazená hladina podzemnej vody sa tu v čase realizácie uvedených prieskumov pohybovala v rozpätí od 2,3 do 8,0 m p. t. v závislosti od morfolologickej pozície vrtu, statická hladina bola zistená v intervale 2,8 do 8,0 m p. t.. Priemerná úroveň hladiny podzemnej vody sa na území pohybuje v intervale 1,52 až 6,70 m pod terénom, pri priemerných vodných stavoch Dunaja to býva zvyčajne na úrovni okolo 2,3 m pod terénom. Hladinový režim podzemných vôd Sedláčkovho ostrova však okamžite reaguje na priebeh zmien hladiny vody v Dunaji.

Analogické informácie o aluviálnom zvodnenci rieky Moravy z úseku medzi Devínom a Devínskou Novou Vsou chýbajú. Dôvodom je absencia písomných údajov o realizovaných vrtných prácach. Predpokladáme však, že hrúbka štrkového kolektora je tu okolo 10,0 m a úroveň hladiny podzemnej vody sa pohybuje okolo 2,0 až 3,0 m pod terénom.

V oblastiach blízko Dunaja i Moravy zmeny hladiny podzemnej vody s istou časovou retardáciou opakujú kolísanie hladiny v Dunaji. V obidvoch alúviách (v dunajskom i moravskom) je režim podzemnej vody ovplyvňovaný zrážkami len nepriamo – sprostredkované cez prietoky, resp. hladiny povrchových tokov. Ide najmä o obdobie letného polroka, keď zvýšené zrážkové úhrny môžu vplývať na zvýšenie prietokov v povrchových tokoch prichádzajúcich do územia a následne i na zvýšenie hladiny podzemnej vody. Začiatok a intenzita nástupu (zvýšenia) hladín podzemnej vody po zvýšení hladiny v povrchovom toku je v čase i čo do veľkosti úmerná najmä vzdialenosti hodnoteného bodu od povrchového toku (Benková et al., 2005).

Generálny smer prúdenia podzemnej vody v alúviách Dunaja i Moravy je subparalelný s hlavnými povrchovými tokmi na území. Lokálne odchýlky od tohto hlavného smeru prúdenia môžeme nájsť v okolí veľkoodberov podzemných vôd (Sedláčkov/Devínsky ostrov), kde sa vektor smeru prúdenia odchyľuje od Dunaja do centra umelo vytváraného depresného kužela.

Hoci sú podzemné vody v alúviách riek Dunaj i Morava vytvárané najmä infiltráciou z povrchových vôd týchto recipientov, nemôžeme predpokladať priamy genetický vzťah medzi povrchovou vodou pri brehu rieky a podzemnou vodou pod týmto brehom. K infiltrácii podzemnej vody môže dochádzať v oblastiach vzdialených i niekoľko desiatok kilometrov proti prúdu rieky a v danom mieste sa podzemná voda i voda rieky môžu (ale nemusia) správať ako dve navzájom izolované entity (Woessner, 1998).

Kolísanie hladiny v Morave pri jej zaústení do Dunaja je navyše ovplyvňované nielen hydrologickými procesmi odohrávajúcimi sa v jej povodí (26 580 km²), ale aj úrovňou rieky Dunaj. Pri niektorých situáciách bráni separátne zvýšená úroveň vody v Dunaji plynulému odvádzaniu vôd Moravy a spätné vzdutie siaha aj niekoľko kilometrov proti jej prúdu, t. j. do koryta Moravy sa pri istých špecifických povodňových situáciách môže dostávať aj dunajská voda.

Vzhľadom na absenciu pravidelne monitorovaných pozorovacích objektov v predmetných úsekoch alúvií Moravy i Dunaja nemôžeme gradienty ani smery prúdenia podzemných vôd bližšie kvantifikovať.

Staršie fluviálne sedimenty v terasovom vývoji sa zachovali na ľavom brehu Dunaja medzi Devínom a Bratislavou a ich význam pre obeh podzemnej vody v hodnotenom území je zanedbateľný.

Zvodnence budujúce západné a južné svahy Devínskej Kobyly sú dotované iba zrážkovými vodami. Tvorba podzemných vôd tu prebieha prevažne počas jarného topenia snehov alebo v menšej miere počas obdobia vytrvalých intenzívnych dažďov. Priemerná veľkosť efektívnych zrážok (t. j. tej časti zrážok, ktorá nie je

v priebehu roka odparená) sa na tomto území pohybuje od 84 mm do 125 mm (priemerne cca 108 mm), resp. $2,68 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ až $3,96 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Švasta a Malík, 2006). Znamená to, že z množstva cca 649 mm zrážok, ktoré tu priemerne spadnú v rámci jedného roka, sa neodparí cca 108 mm a toto množstvo je schopné z plochy 1 km^2 vytvoriť priemerné otekajúce množstvo vody cca $3,41 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Jeho časť sa premení na povrchový odtok, avšak aj hydrografické pomery oblasti napovedajú, že väčšina týchto vôd infiltruje do podzemia a podieľa sa na vzniku odtoku podzemných vôd – „podzemného odtoku“.

Tento podzemný odtok sa vytvára vo všetkých na povrch vystupujúcich zvodnencoch, ale aj v ich podloží. Zvodnence budované horninami kryštalinika, mladšieho paleozoika, nekrasového mezozoika s puklinovým typom priepustnosti, s obehom podzemných vôd viazaným prevažne na zónu pripovrchového rozvolnenia, ale aj skrasovatené vápence mezozoika s možnosťou tvorby hlbšieho obehu podzemných vôd v prostredí s krasovo-puklinovým typom priepustnosti sú totiž prekryté hydrogeologickými kolektormi bádenského a sarmatského veku s medzizrnovou priepustnosťou. Kvantitatívne informácie o transmisivite týchto hornín v danej oblasti k dispozícii nemáme, predpokladáme však, že je násobne vyššia ako prietočnosť podložných predterciérnych hornín – s výnimkou skrasovatených vápencov.

Väčšina z. a j. svahov Devínskej Kobyly je na povrchu budovaná sandberskými vrstvami studienského súvrstvia a devínskonovoveskými vrstvami jakubovského súvrstvia (obidve veku mladší báden). Ide o štrky, konglomeráty, piesky, pieskovce s vložkami štrkov, vápnité aleurity až piesky, riasové vápence sandberských vrstiev a o zlepence a piesky devínskonovoveských vrstiev. Podľa Marcina a Kullmana (in Marcin et al., 1996) možno tieto neogénne sedimenty charakterizovať vysokou priepustnosťou. Vzhľadom na relatívne malú rozlohu a morfológickú polohu však nevytvárajú významnejšie akumulované zdroje podzemných vôd. Preto sa v oblasti Devínskej Kobyly nachádza iba niekoľko menších prameňov vystupujúcich z týchto hornín, s výdatnosťami pod $0,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Najmladšími sedimentmi neogénu, ktoré vystupujú na povrch v nadloží sandberských vrstiev, sú piesky, pieskovce, zlepence a organogénne vápence s nubekulármi karloveských vrstiev skalického súvrstvia (stredný až mladší sarmat). Na základe jedného vrtu je index prietočnosti tohto súvrstvia $Y = 5,61$, čomu zodpovedá odhad koeficientu prietočnosti $T = 4,07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Hanzel et al., 1999). Pre jednotlivé členy sandberských vrstiev uvádzajú Malík et al. (2007) priemerné veľkosti koeficientu prietočnosti od $3,18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ do $9,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a koeficientu filtrácie od $3,16 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $4,88 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, čo síce sú hodnoty odvodené z niekoľkých desiatok hydrogeologických vrtov, avšak len pre analogické miocénne zvodnence na celom území Slovenska.

V typickej morfologickej a geologickej situácii bol v predmetnej lokalite realizovaný iba vrt STD-1 (Senko, 2002). Tento 140 m hlboký hydrogeologický vrt, realizovaný na jz. svahoch Devínskej Kobyly v relatívne vysokej pozícii nad miestnou eróznou bázou, overil do hĺbky 16,75 m

jemnozrnné piesky a až do konečnej hĺbky pieskovce a zlepenice sandberských vrstiev (neogén – stredný bádén). Na neogénnom podloží sa nachádzala iba 0,55 m hrubá vrstva pokryvných hĺn. Narazená hladina podzemnej vody tu bola až v hĺbke 109 m, statická hladina potom vystúpila na úroveň 72,05 m pod terén. Autor odporúčal pre využívanie vody čerpané množstvo s veľkosťou $0,15 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Jednotlivé litologické celky sandberských i devínsko-novoveských vrstiev miocénu s rozdielnymi hydrofyzikálnymi vlastnosťami sa často striedajú, čo rezultuje do značnej filtračnej heterogenity v rámci neogénnych kolektorov. Vcelku však ich priepustnosť možno hodnotiť ako vysokú, čoho dôkazom je ich silný drenážny účinok a hlboko zaklesnuté hladiny podzemnej vody v prípade vyššej hrúbky miocénu. Tá môže lokálne dosahovať do cca 200 m, čo však závisí od dispozície svahu a priestorového rozloženia predneogénneho podložia.

Predneogénne podložie môže na svahoch Devínskej Kobyly vystupovať v dvoch hydrogeologicky odlišných verziách. Zvodnenie s puklinovým typom priepustnosti tvorené horninami kryštalinika (strednozrnné leukokratické muskovitické a dvojsludné granity a granodiority bratislavského typu a fylity s metapelitmi biotitovo-granátovej zóny), mladšieho paleozoika (permské pestré hrubozrnné arkózy a živcové droby, zlepenice, piesčité bridlice devínskeho súvrstvia), nekrasového mezozoika (svetlosivé, ružové alebo červené kremence, kremenné pieskovce, arkózové pieskovce a konglomeráty spodnotriasového lúžňanského súvrstvia) vystupujú prevažne v južnej časti hodnoteného územia, či už v podloží miocénnych kolektorov alebo priamo odkryté na povrchu.

Z týchto hornín však nevyvierajú významnejšie pramene, výdatnosť prevažnej väčšiny puklinových a sutinovo-puklinových prameňov je od $0,01 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Dobrá rozpukanosť, dosah zóny zvetrávania a zóny pripovrchového rozvolnenia so systémom puklín priečnej tektoniky sú dominujúcimi prvkami. Zóna pripovrchového rozvolnenia a zvetrávania reprezentuje zónu zvýšených priepustností. Týmto sú podmienené vysoké výkyvy výdatnosti s maximami až do niekoľko $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. V priebehu roka však výdatnosť takýchto prameňov môže klesnúť až na nulu. Vyššia priepustnosť horninového masívu v tejto zóne môže byť tiež podmienená situáciou, keď puklinový systém zóny pripovrchového rozvolnenia nadväzuje na systém puklín priečnej tektoniky (Hanzel et al., 1999). Merný odtok podzemných vôd stanovený pre tieto horniny v Pezinských Karpatoch (Hanzel et al., 1999) metódou Fostera sa pohyboval od $1,69$ do $6,97 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, v priemere $3,76 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Metódou Killeho bol vypočítaný merný odtok $4,58 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. S týmito údajmi korešpondujú poznatky o mernom odtoku stanovenom metódou Fostera z ďalších 9 povodí budovaných granitoidmi, kde sústavné merania prebiehali iba v rokoch 1992 – 1995 a kde sa zistené hodnoty pohybovali od $3,22$ do $5,78 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Priemerný odtok podzemných vôd z granitoidov Pezinských Karpát bol stanovený na $4,66 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Hanzel et al., 1999). Pre zónu zvetrávania a pripovrchového rozvolnenia v granitoidoch, ktorá siaha do hĺbky cca 30 až 50 m,

bolo urobené aj štatistické vyhodnotenie hydraulických parametrov. Priemerná hodnota indexu prietočnosti Y z 37 vrtov bola 4,63, odhadnutá stredná hodnota koeficientu prietočnosti $4,26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ zodpovedá nízkej prietočnosti (Hanzel et al., 1999). Analogické hodnoty a azda mierne nižšie hodnoty môžeme očakávať aj od fylitov, permských klastík a spodnotriasových kremencov, ktoré však v oblasti vystupujú na výrazne menšej odkrytej ploche. Pre všetky uvedené zvodnenie je charakteristický puklinový typ priepustnosti a obeh podzemných vôd viazaný na zónu pripovrchového rozvolnenia, pričom sa jeho intenzita smerom do hĺbky exponenciálne znižuje.

V prípade prekrytia puklinových zvodnencov miocénnymi sedimentmi sa obeh podzemných vôd realizuje najmä v ich mladšom nadloží v rámci medzizrbovej priepustnosti, podzemné vody však prichádzajú do kontaktu aj s týmto podloží, budovaným prevažne horninami silikátového zloženia. Vzhľadom na prekrytie miocénnymi vrstvami nie je kontakt zmienených puklinových zvodnencov s mezozoickými vápencami jednoznačne priestorovo identifikovateľný. Predpokladať ho môžeme zhruba v oblasti spojnice devínskeho hradného brala a vrcholca kóty 514 Devínska Kobyly. Na sever od tejto spojnice vystupujú buď na povrchu odkryté, alebo v podloží sandberských a devínskonovoveských vrstiev buď stredotriasové tmavosivé a čierne hrubolavicité vrstevnaté červíkovité vápence gutensteinských vrstiev alebo liasové (spodno-jurské) sivé masívne či hrubolavicité beztextúrne jemnozrnné vápence s litoklastmi triasových karbonátov, organodetritické vápence a pieskovce súvrstvia Prepadlého. Tie sú spojené s krasovo-puklinovým typom priepustnosti, s vysokými hodnotami prietočnosti a koeficientu filtrácie. Malík a Švasta (2010) zistili priemernú hodnotu koeficientu prietočnosti z 238 hydrogeologických vrtov v analogickom prostredí s veľkosťou $6,16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, vzhľadom na heterogenitu prostredia však odporúčajú v praxi narábať s hodnotou prietočnosti $1,24 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a hodnotou koeficientu filtrácie $2,64 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Drenážny účinok skrasovatených mezozoických kolektorov sa evidentne prejavuje na veľkých hĺbkach hladiny podzemnej vody v tomto území, avšak smer odtoku podzemných vôd je do dnešného dňa neznámy. Pri ploche takto drenovaného územia cca $3,7 \text{ km}^2$ a priemernej veľkosti efektívnych zrážok $3,41 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ sa dá očakávať celkový skrytý odtok zo severnej časti územia s veľkosťou cca 12 až $13 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Hodnotenú územie patrí z hľadiska hydrogeologickej rajonizácie Slovenska (Šuba et al., 1984) do hydrogeologických rajónov Q 052 „Kvartér JZ časti Podunajskej roviny“ a Q 051 „Kvartér západného okraja Podunajskej roviny“.

V zmysle vymedzenia útvarov podzemných vôd na Slovensku podľa európskej rámcovej smernice o vodách 2000/60/ES (Kullman et al., 2005) možno hodnotené územie začleniť do útvarov SK200010FK „Útvar puklinových a krasovo-puklinových podzemných vôd Pezinských Karpát oblasti povodí Dunaj“, SK2000500P „Útvar medzizrbových podzemných vôd podunajskej panvy oblasti povodí Dunaj“, SK1000200P „Útvar medzizrbových podzemných vôd

Tab. 1

Celkové využívanie podzemnej vody v hydrogeologických rajónoch Q 051 a Q 052 (podľa údajov Slovenského hydrometeorologického ústavu)
Total use of the groundwater in hydrogeologic regions Q 051 and Q 052. (Data of Slovak Hydrometeorological Institute.)

Rok	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Celkový odber (l · s ⁻¹)									
Rajón Q 051	2 988	2 585	2 411	2 233	2 290	2 143	1 957	1 890	1 972
Rajón Q 052	2 666	2 821	2 813	2 855	2 640	2 683	2 574	2 551	2 838
Rok	2004	2005	2006	2007	2008	2009			
Celkový odber (l · s ⁻¹)									
Rajón Q 051	1 984	1 931	1 968	1 898	1 869	1 775			
Rajón Q 052	2 224	2 222	2 246	2 398	2 319	2 426			

kvartérnych náplavov z časti podunajskej panvy oblasti povodí Dunaj, ako aj SK1000100P „Útvar medzizrnových podzemných vôd kvartérnych náplavov viedenskej panvy oblasti povodí Dunaj“.

Prehľad celkového využívania podzemnej vody na príklade hydrogeologických rajónov Q 052 (93,8 % územia), Q 051 (6,2 % územia) dokumentuje tab. 1, kde sú uvedené sumárne odbery za roky 1995 – 2009 podľa údajov SHMÚ.

Štruktúra využívania podzemných vôd podľa účelu využitia je v hydrogeologickom rajóne Q 051 zameraná najmä na odbery pre verejné vodovody (47 % všetkých odberov) a pre potravinársky a ostatný priemysel (cca 33 %). V hydrogeologickom rajóne Q 052 je využívanie podzemných vôd zamerané hlavne na odbery pre verejné vodovody – 96 % všetkých odberov.

Strategické zdroje podzemných pitných vôd

Oblasť Žitného ostrova

V podmienkach Žitného ostrova sú pre identifikáciu alternatívnych zdrojov najvýznamnejšie zmeny vlastností podzemných vôd s hĺbkou v profile kvartérnych a neogénnych sedimentov.

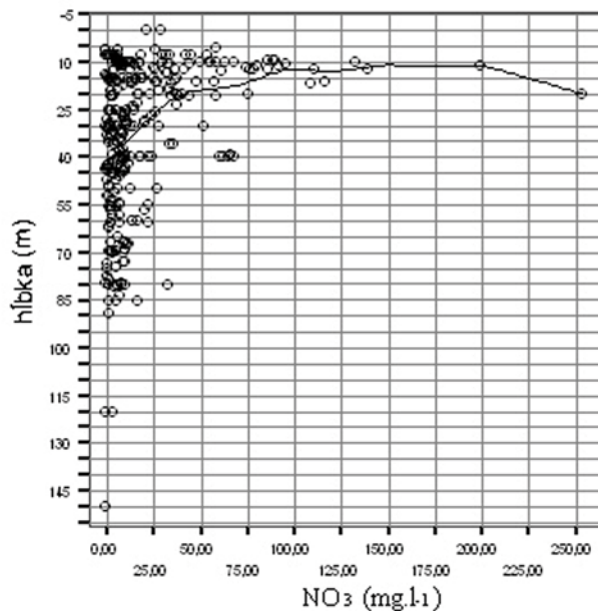
Z kvalitatívneho hľadiska to dokumentuje obr. 2, kde s hĺbkou sa koncentrácia dusičnanov, ktoré sú indikátorom antropogénneho vplyvu difúzných, ale aj bodových zdrojov znečistenia, významne znižuje a všeobecne od hĺbky 25 m hodnoty nepresahujú prípustnú koncentráciu v pitných vodách ($50 \text{ mg} \cdot l^{-1}$).

Ak sledujeme zmeny celkovej mineralizácie podzemných vôd s hĺbkou (obr. 3), sú zrejmé dve závislosti. Prvou sú vysoké hodnoty mineralizácie zapríčinené antropogénnymi vplyvmi do hĺbky približne 25 m a druhou je zvyšovanie mineralizácie, čo je charakteristické pre neogénne kolektory. V tomto prípade je zvyšovanie mineralizácie podmienené ionovými procesmi, vo vode sa zvyšuje hlavne obsah sodíka a hydrogénuhličitanov, čo sa prejavuje aj typovo, vody sú Na-HCO_3 chemického typu.

Celý hydrogeologický celok neogénu sumárne charakterizuje v priemere vysoká prietoknosť (obr. 4) – medián koeficientu prietoknosti T je $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

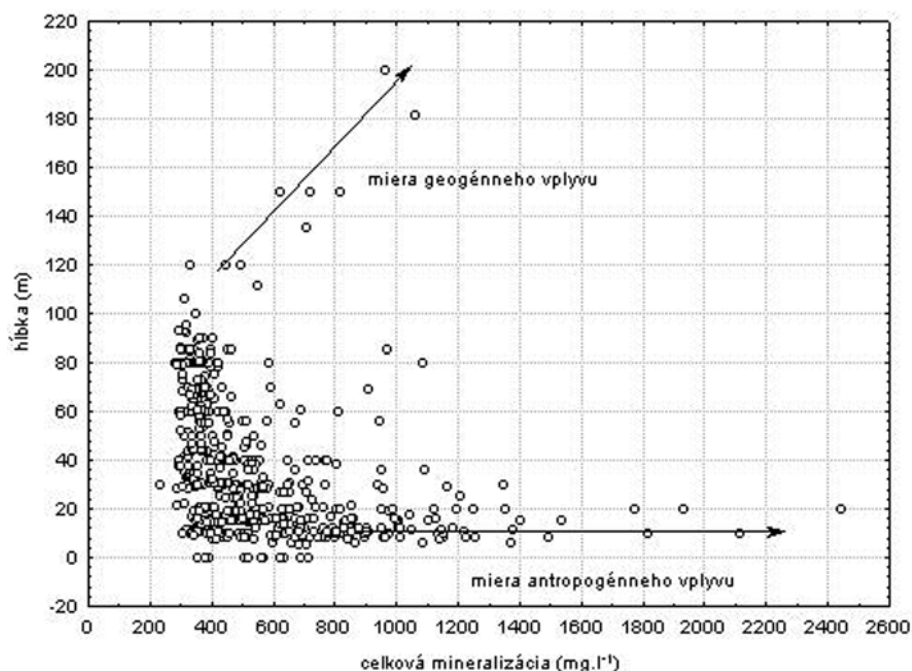
s 2. triedou prietoknosti (Krásný, 1993). Hodnota mediánu indexu prietoknosti Y je 5,85 a koeficientu filtrácie k je $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Benková et al., 2007). Merná výdatnosť vrtov q kolíše v intervale $0,02 - 21,98 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (priemerná hodnota q je $3,00 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). Variabilita prietoknosti – plošná nehomogenita zvodneného horninového prostredia, ktorá je charakterizovaná hodnotou smerodajnej odchýlky indexu prietoknosti Y_{sv} (0,72), priraduje tento celok k značne nehomogénnemu hydrogeologickému prostrediu s veľkou variabilitou (trieda variability c; Krásný, 1993).

Za iniciálny zdroj podzemnej vody v predmetnej oblasti je považovaná voda Dunaja. Túto skutočnosť dokazujú i údaje o jej izotopovom zložení ($\delta^{18}\text{O}$) z monitorovania realizovaného v rokoch 1983 – 1998 v Bratislave, poznatky o izotopovom zložení podzemnej i povrchovej vody v širšom okolí Bratislavy (Kantor et al., 1989) a údaje o izotopovom zložení ($\delta^{18}\text{O}$) podzemnej vody v oblasti Žitného ostrova,



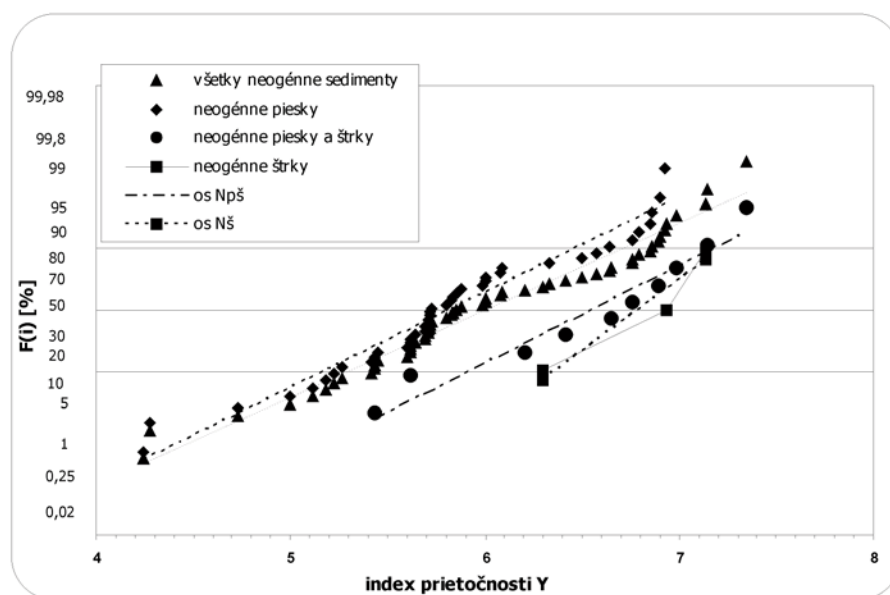
Obr. 2. Závislosť obsahu dusičnanov od hĺbky (podľa Benkovej et al., 2005).

Fig. 2. Dependence of nitrate content on the depth (after Benková et al., 2005).



Obr. 3. Závislosť celkovej mineralizácie podzemných vôd od hĺbky.

Fig. 3. Dependence of the ground-water TDS on the depth.



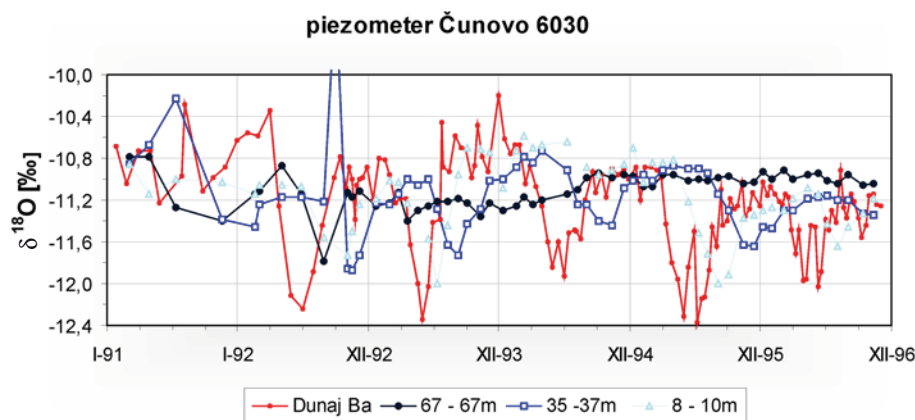
Obr. 4. Kvantilový diagram rozdelenia indexu prietochnosti Y jednotlivých litologických typov hydrogeologického celku neogénu.

Fig. 4. Quantil chart distribution of transmissivity index of individual lithologic types of hydrogeological body of Neogene.

získané v rámci monitoringu (1991 – 1996) cca 30 piezometrov počas napúšťania VDG (Michalko et al., 1995, 1997; Michalko, 1998). Na základe týchto údajov je možné predpokladať, že súčasná dunajská voda infiltruje najmä v preferovaných oblastiach v plytších horizontoch. Rodák et al. (1995) v oblasti Kalinkova predpokladajú prienik vody Dunaja v plytšej zóne až 4 – 6 km za dva – tri roky. Podobne je možné doložiť (obr. 5) pomerne rýchly prienik vody Dunaja (červená) v zóne 8 – 10 m (svetlomodrá), pomalšiu a len čiastočnú vodovýmenu v hĺbke 35 – 37 m (modrá), pričom vplyv izotopového zloženia na podzemnú vodu v hĺbke 67 m je (tmavomodrá) minimálny. Dá sa predpokladať, že súčasná voda Dunaja má minimálny vplyv na podzemnú vodu viazanú na hlbšie časti štruktúry.

Možno pri nej predpokladať vyššiu dobu zdržania a príslušnú dobrú kvalitu.

Všeobecne je možné povedať, že v oblasti Žitného ostrova kvalita podzemných vôd vplyvom špecifických prírodných podmienok a antropogénnych tlakov je do 25 m ovplyvnená a v hlbších častiach sa nachádzajú podzemné vody s veľmi dobrými kvalitatívnymi vlastnosťami. Pretože vodné zdroje exploatujú podzemnú vodu z hĺbok cca 50 až 90 m, sú v súčasnosti zdroje pitných podzemných vôd hlbších zvodnencov v dobrom kvantitatívnom aj chemickom stave. Za strategické zdroje podzemných pitných vôd podľa uvedených kvantitatívnych a kvalitatívnych kritérií považujeme v tejto oblasti podzemné vody z hĺbok väčších ako 80 m a tiež sedimenty neogénu.



Obr. 5. Izotopové zloženie kyslíka vo vode Dunaja a podzemnej vode piezometra 6030 Čunovo.

Fig. 5. Oxygen isotope composition of Danube river water and in the groundwater of the piezometric well 6030 Čunovo.

Oblasť sútoku riek Dunaj a Morava

Táto malá oblasť v okolí bratislavskej mestskej časti Devín je zaujímavá nielen po historickej, ale aj po geologickej stránke a z toho vyplývajúcej hydrogeologickej a hydrogeochemickej rozmanitosti. V súčasnosti sa na zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou používa vodárenský zdroj Sihof a Sedláčkov ostrov (priamo pod Devínom), jeho zdrojom v kvartérnych sedimentoch je rieka Dunaj a zrejme aj Morava. Samotný masív Devínskej Kobyly, na ktorého svahoch sa nachádza záhradkárska oblasť, je z pohľadu využívania podzemnej vody pomerne málo preskúmaný. Ojedinele sa tu však nachádzajú vrtý s hĺbkou okolo 100 m a viac, ktoré zachytili kvalitnú podzemnú vodu. Z jedného z týchto vrtov (hĺbka vrtu 120 m), situovaného v najvrchnejšej časti záhradkárskej oblasti (Štítová ulica č. 729/4), bola v rámci projektu odobraná vzorka vody. Podzemná voda mala hodnotu celkovej mineralizácie $691 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ a bola nevýrazného A_2 chemického typu. Zaujímavý bol 25,3 c. z % podiel $S_2(\text{SO}_4)$ a 9,6 c. z % podiel $S_1(\text{SO}_4)$ zložky, pričom voda nevykazuje antropogénne ovplyvnenie ani v minimálnej miere. Z tejto základnej hydrogeochemickej charakteristiky je zjavné, že genéza vody je zložitá a muselo sa na nej podieľať viacero litotypov a množstvo geochemických procesov pri interakciách voda – hornina – plyn. Uvedené skutočnosti viedli k preskúmaniu genézy podzemnej vody, ktorá môže predstavovať lokálne zdroje strategických množstiev podzemnej vody v danej oblasti. Súčasne využívané vodárenské zdroje, situované v kvartérnych sedimentoch, sú vysoko zraniteľné, najmä z dôvodu malej

hrúbky sedimentov (okolo 10 – 13 m) a iniciálnych zdrojov vody z riek Dunaj a Morava.

Na základe uvedených faktov boli preverené možnosti získania vôd z masívu Devínskej Kobyly ako lokálnych strategických množstiev s oveľa nižšou mierou zraniteľnosti a dobrou kvalitou podzemnej vody. K overeniu došlo prostredníctvom rekonštrukcie geochemického vývoja podzemnej vody z jej chemického zloženia pomocou inverzného modelovania programom PHREEQC (Parkhurst a Appelo, 1999) na základe konceptuálneho hydrogeologického modelu.

Za vstupnú vodu bola považovaná zrážková voda. Chemické zloženie zrážkovej vody bolo imitované pomocou analýzy snehovej pokrývky z roku 2010 v lokalite Železná studnička (tab. 2). Zdrojom informácie bola databáza monitoringu kvality snehovej pokrývky na Slovensku (Klukanová et al., 2011).

Finálne chemické zloženie podzemnej vody predstavovala vzorka odobratá z vrtu na Štítovej ulici (tab. 2). Inverzný model reprezentuje zjednodušenú simuláciu geochemických interakcií tak, aby zo zloženia zrážkovej vody vzniklo zloženie konečnej podzemnej vody s určitými definovanými neistotami.

Scenár modelovania predstavoval prestup zrážkovej vody kyslého charakteru (pozri hodnoty pH a hydrogén-uhličitánov v tab. 2) s veľmi nízkou mineralizáciou cez pôdny pokryv a ďalej prestup cez prostredie kryštalinika, neogénu a mezozoika masívu Devínskej Kobyly s celkovou neistotou všetkých iónov 6 % a neistotami bilancie alkalinity 6 % a vápnika 8 %. Na základe predpokladaného zastúpenia minerálov v horninovom prostredí obehu podzemnej vody

Tab. 2

Chemické zloženie iniciálnej (sneh Železná studnička) a finálnej (vrt na Štítovej ul.) vody
Chemical composition of initial (snow from Železná studnička) and final (well at Štítová street) water

Lokalita	Objekt	pH	Na	K	Mg	Ca	Fe	Mn	Al	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂
Železná studnička	sneh	4,32	0,58	0,25	0,24	0,64	0,084	0,002	0,003	0,56	6,05	0	0,11
Štítová ul.	podzemná voda	7,31	20,3	3,75	42,9	95,7	0,191	0,038	0,02	3,34	147	342	33,7

Poznámka: všetky hodnoty okrem pH sú uvedené v $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$
Note: All values except pH are in $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

boli do rekonštrukcie zahrnuté nasledujúce minerálne fázy:

- albit, kremeň, pyrit, gibbsit (reprezentujú hlavné interakcie v prostredí kryštalinika);
- kalcit, dolomit a sadrovec (reprezentujú hlavné interakcie v prostredí mezozoika);
- ílové minerály (Ca-montmorilonit, K-montmorilonit) ako produkty zvetrávania;
- pyroluzit;
- halit pre imitáciu zvyšovania obsahu chloridov.

Čo sa týka procesov, uvažovalo sa o rozpúšťaní, zrážaní a ionovými reakciách (predpokladané pre prostredie neogénu, ale prebiehajúce aj v pôdnom pokryve). Z plynných fáz sa predpokladal oxid uhličitý.

Tab. 3
Molárny transfer fáz
Molar transfer of phases

Fáza	Vzorec	Množstvo (mol)
kalcit	CaCO_3	-10,2
dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	$0,95 \cdot 10^{-3}$
Ca-montmorilonit	$\text{Ca}_{0,165}\text{Mg}_{0,33}\text{Al}_{1,67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})$	61,6
K-montmorilonit	$\text{K}_{0,33}\text{Mg}_{0,33}\text{Al}_{1,67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-61,6
kremeň	SiO_2	-60,96
albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	20,32
oxid uhličitý	$\text{CO}_2(\text{g})$	10,16
sadrovec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$0,67 \cdot 10^{-3}$
pyrit	FeS_2	$3,86 \cdot 10^{-8}$
pyroluzit	MnO_2	$2,69 \cdot 10^{-7}$
ionovýmenný Na	NaX	-20,3
ionovýmenný K	KX	20,3
halit	NaCl	$2,67 \cdot 10^{-5}$
gibbsit	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-20,3

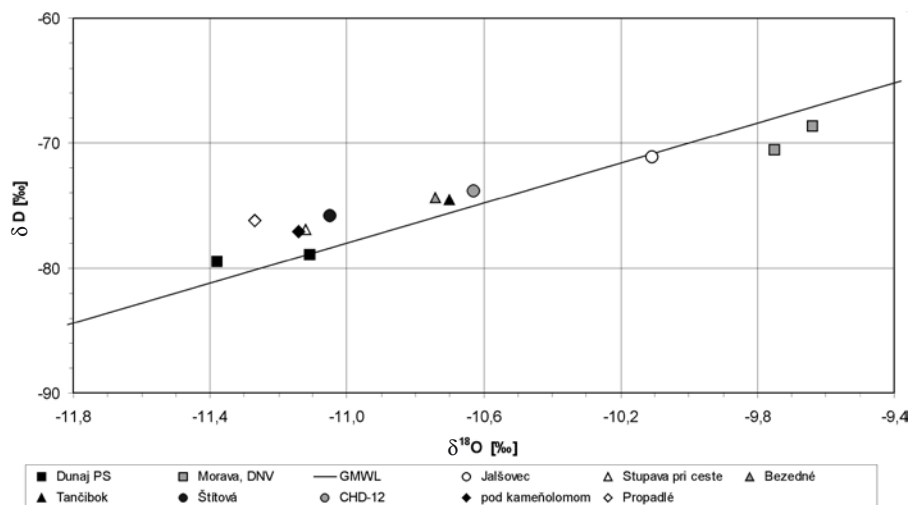
Inverzným modelovaním boli nájdené dva modely vyhovujúce zadaným podmienkam tvorby a neistotám. Výsledkom pomerne zložitého modelu so štrnástimi fázami je mólový transfer fáz (tab. 3), kde záporné znamienko znamená vylučovanie danej fázy a kladné jej rozpúšťanie vo vode. Hodnoty sú modelované na 1 kg

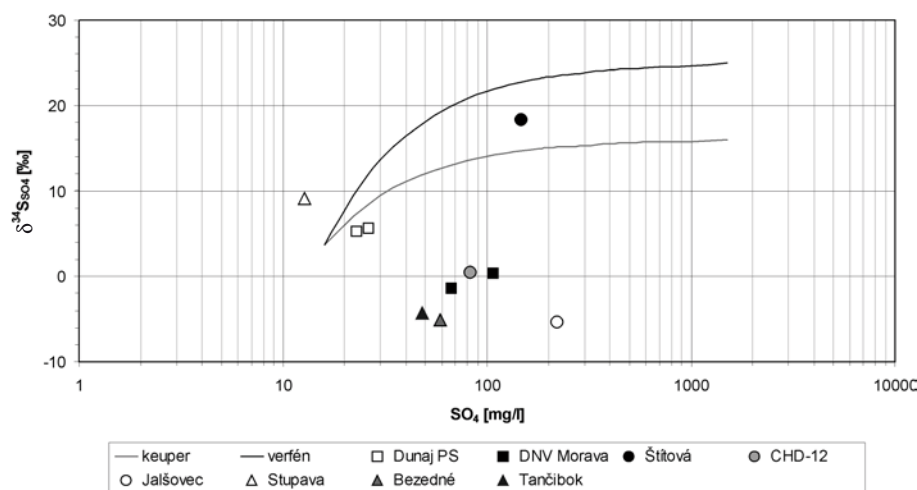
vstupnej aj výstupnej vody. Mólový transfer predstavuje komplex geochemických procesov, ktoré sa podieľajú na tvorbe finálnej podzemnej vody zo Štítovej ulice zo zrážkovej vody. Pri tvorbe podzemnej vody je dominantné vylučovanie kalcitu, K-montmorilonitu, kremeňa, gibbsitu a spotreba Na pri ionovýmiene na ílových mineráloch. Hlavným zdrojom karbonátov v prostredí obehu podzemnej vody sú strednotriasové vápence a dolomity, pričom dochádza k spotrebe 10,16 mólov oxidu uhličitého. Kremeň je voči roztoku presýtený, jeho zdrojom sú kryštalinické horniny a triasové kvarcity, ktoré tvoria vrcholové partie Devínskej Kobyly. Gibbsit vzniká najmä zvetrávaním hornín kryštalinika, pričom vznikajú aj sekundárne ílové minerály, konkrétne K-montmorilonit. Ionovýmienné reakcie prebiehajú zrejme v hlavnej miere v prostredí neogénnych sedimentov, pričom je z roztoku odoberaný ión sodíka (vyjadrené v tab. 3 formou NaX). Zo sorbčných komplexov dochádza k vylučovaniu iónu draslíka do roztoku a tiež k rozpúšťaniu albitu, Ca-montmorilonit je za daných podmienok nestabilný a rozpúšťa sa. Zdrojom síranov v podzemnej vode je najpravdepodobnejšie rozpúšťanie sadrovca a v oveľa menšej miere (tab. 3) aj oxidačná degradácia pyritu. Redox mólový transfer pre sulfidickú síru je $0,67 \cdot 10^{-7}$ mólov. Ostatné fázy, ktoré sa rozpúšťajú, sú zastúpené v menšej miere, ale pri tvorbe konečného zloženia podzemnej vody hrajú dôležitú úlohu.

Na riešenie genézy a vzájomných vzťahov podzemných a povrchových vôd v širšej oblasti sútoku riek Dunaj a Morava boli využité poznatky o izotopovom zložení kyslíka, vodíka a síry sulfátu. Odbery vzoriek sú z mája a júna 2010 (tab. 4). Izotopové zloženie vody Dunaja a Moravy (obr. 5) si zachováva charakteristický režim (Kantor et al., 1985, 1989; Michalko, 1998; Rank et al., 2009; Pawelek et al., 2002). Hlavnými iniciálnymi zdrojmi vody v danom priestore môžu byť Dunaj, Morava, lokálne zrážky, v špeciálnych prípadoch – hlavne vo väčších hĺbkach – ich paleopendants, prípadne voda thalassogénneho pôvodu a jej deriváty. Zdroje síry v podzemných vodách môžeme opäť hľadať vo vode riek, v sedimentárnych evaporitoch príslušného veku s charakteristickým zložením, v sírnikoch prítomných v sedimente, v síre „pozadia“. Dunaj si zachováva svoje

Obr. 6. Izotopové zloženie kyslíka a vodíka.

Fig. 6. Isotope composition of oxygen and hydrogen of water.





Obr. 7. Izotopové zloženie síry rozpusteného sulfátu v závislosti od jeho koncentrácie.

Fig. 7. Isotope composition of dissolved sulphate sulphur in dependence on its concentration.

charakteristické izotopové zloženie, ľahký kyslík i vodík, zrejme vplyvom snehovej a ľadovcovej alpskej zložky, síra zodpovedá bakteriálnej, „pozadovej“ síre tak, ako ju doteraz jediní uvádzajú Pawelek et al. (2002). Morava ako dažďom sytený typ rieky si tiež zachováva typické charakteristiky – vysoké zastúpenie ťažkých izotopov kyslíka a vodíka (obr. 6), zodpovedajúce zloženiu zrážok na území, ktoré odvodňuje. Izotopové zloženie síry je zvláštne a pravdepodobne odráža vplyv sedimentárnej síry neogénu viedenskej panvy. Koncept vývoja izotopového zloženia síry v svetovom oceáne predpokladá v mladších treťohorách hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ okolo 23 ‰; Kantor et al. (1982) na evaporitoch z Devínskej Novej Vsi, Devína a Stupavy dokladajú uniformnú prítomnosť síry s $\delta^{34}\text{S}$ –13 ‰ až –29,7 ‰. To znamená, že evapority vznikli sekundárne tak, že kyselina sírová ako produkt oxidačnej degradácie sulfidov rozpúšťala prítomné karbonáty za vzniku sadrovca.

Prítomnosť sulfidov s takouto izotopicky ľahkou sírou (pyrit s $\delta^{34}\text{S}$ od –6 ‰ do –46,1 ‰) v neogénnych sedimentoch študovanej oblasti preukázali Kantor et al. 1982. V období mezozoika sa hodnoty $\delta^{34}\text{S}$ morského síranu (a z neho odvodených evaporitov) pohybovali v rozmedzí +12 ‰ až +29 ‰, v priestore Západných

Karpát s typickými hodnotami $\delta^{34}\text{S}$ pre verfén okolo 25 ‰ a keuper +16 ‰ až +18 ‰ (Michalko, 2004).

Z uvedeného je zřejmé, že voda z vrtu na úbočí Kobyly v Devíne (Štítová ulica; obr. 7) reprezentuje vodu zo zrážok, síru treba odvodzovať od evaporitov mezozoického veku, do určitej miery ovplyvnených síranmi pochádzajúcimi pôvodne zo sulfidickej síry.

Vplyv vody Moravy na zloženie vody vo vrte CHD-12 zo Sedláčkovho ostrova v Devíne je zřejmý (obr. 6). Zloženie vody v zdroji Jaišovec je ovplyvnené miestnymi zrážkami, prípadne prestupmi z mezozoika Devínskej Kobyly alebo Borinského krasu. Izotopové zloženie síry je jednoznačne ovplyvnené ľahkou sírou prítomnou v neogénnych sedimentoch viedenskej panvy v sulfidickej i sulfatickej forme a má dlhodobější charakter. Michalko et al. (1993) uvádzajú $\delta^{34}\text{S}$ = –5,6 ‰ pri koncentrácii síranov 308,87 mg · l⁻¹. Vplyv vysoko zápornej síry zo sedimentov neogénu je zřejmý, pôvodná voda však musela mať pomerne vysoké obsahy síry s vyšším zastúpením ťažkých izotopov, pravdepodobne v dôsledku vplyvu vôd mezozoika, o čom svedčí aj jej chemické zloženie.

Vplyv vôd Moravy na formovanie podzemnej vody tohto zdroja možno na základe doterajších poznatkov

Tab. 4
Izotopové údaje
Isotope composition data

Lokalita	Zdroj	Dátum odberu	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ SMOW [‰]	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ SMOW [‰]	SO_4 [mg · l ⁻¹]	$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ CDT [‰]
DNV	Morava	23. 05. 10	–9,75	–70,5	66,5	–1,3
DNV	Morava	23. 06. 10	–9,64	–68,7	107,0	0,4
Bratislava PS	Dunaj PS	23. 05. 10	–11,11	–78,9	26,1	5,6
Bratislava PS	Dunaj PS	23. 06. 10	–11,38	–79,5	22,8	5,3
DNV	Jaišovec	23. 05. 10	–10,11	–71,1	221,0	–5,3
Devín	Štítová	15. 06. 10	–11,05	–75,7	147,0	18,4
Devín	CHD-12	24. 05. 10	–10,63	–73,8	82,3	0,5
Stupava	vrt pri ceste	01. 06. 10	–11,12	–76,9	12,8	9,2
Plav. Štvrtek	Bezedné	01. 06. 10	–10,74	–74,4	59,2	–5,2
Plav. Štvrtek	Tančibok	01. 06. 10	–10,70	–74,5	47,9	–4,3
Borinka	pod kameňolomom	01. 06. 10	–11,14	–77,0	91,5	6,7
Borinka	Propadlé	01. 06. 10	–11,27	–76,2	137,0	12,3

pokladať za málo pravdepodobný. Svedčí o tom priebeh zmien izotopového zloženia teploty, vodivosti i izotopového zloženia kyslíka Moravy, prameňa Jalšovce i blízkeho vrtu HP-1 počas ročného monitoringu (Michalko et al., 1993). Podobne komunikáciu podzemnej vody a vôd Moravy v tomto priestore nepotvrdili geofyzikálne ani geotermometrické a konduktivimetrické práce s krokom 1 m na ľavom brehu Moravy (Kadlečíková a Putiška, 2002).

Záver

Náhradné zdroje podzemných vôd majú strategický význam najmä pre mestské aglomerácie v krízových situáciách. Na ich vyhľadávanie boli metodicky vypracované kvantitatívne (zdroj znečistenia – zraniteľnosť – receptor) a kvalitatívne kritériá (nezávadnosť, chemický stav, interpretácia environmentálnych izotopov a trícia). Tieto kritériá boli aplikované na konkrétne podmienky Bratislavského samosprávneho kraja (BSK). Kombináciou vypracovaných kritérií s prírodnými podmienkami, konceptuálnym hydrogeologickým modelom, geochemickým modelovaním a súčasným využívaním podzemných vôd boli vytýpované dve potenciálne oblasti strategických zásob podzemnej vody. Každé územie si však vďaka špecifickým prírodným a sekundárnym podmienkam vyžaduje osobitný prístup a použitie kombinácie rôznych kritérií. Pre časť Žitného ostrova prilahlý k BSK bola na špecifikáciu strategických zásob podzemnej vody použitá hydrogeochemická analýza antropogénnych vplyvov v hĺbkovom profile fluvialných sedimentov Dunaja a neogénnych sedimentov. Na príklade dusičnanov bol zistený všeobecný dosah kontaminácie do hĺbky 25 m. Na základe izotopov kyslíka je v kvartérnom zvodnenci obmedzená rýchla vodovámena okolo hĺbky 70 m. Za strategické množstvá podzemnej vody, ktoré vyhovujú daným kritériám, je možné označiť podzemné vody fluvialných sedimentov od hĺbky 80 m a podzemné vody neogénnych sedimentov v ich podloží. Pre oblasť sútoku Dunaja a Moravy v masíve Devínskej Kobyly bol použitý konceptuálny hydrogeologický model predkvartérnych hornín. Inverzným modelovaním bola rekonštruovaná cesta zrážkovej vody, ktorá interakciu s minerálnymi fázami zastúpenými v kryštaliniku, mezozoiku a neogéne vytvára konečné chemické zloženie podzemnej vody v masíve Devínskej Kobyly. Izotopovým zložením síry bola potvrdená interakcia prestupujúcej vody so sadrovcom a v menšej miere s pyritom. Pri ploche takto drénovaného územia cca 3,7 km² a priemernej veľkosti efektívnych zrážok 3,41 l · s⁻¹ · km⁻² sa dá očakávať celkový skrytý odtok zo severnej časti územia s veľkosťou cca 12 až 13 l · s⁻¹. Aplikovaný postup preveril možnosti získania vôd z masívu Devínskej Kobyly ako lokálnych množstiev strategických zásob s oveľa nižšou mierou zraniteľnosti oproti fluvialným sedimentom a dobrou kvalitou podzemnej vody.

Podakovanie. Tento článok vznikol v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt *Ekotechnológia vyhľadania a hodnotenia náhradných zdrojov pitných podzemných vôd, pilotné územie BSK, ITMS 26240220003*, spolufinancovaného zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

References

- BENKOVÁ, K., BODIŠ, D., NAGY, A., MAGLAY, J., ŠVASTA, J., ČERNÁK, R., MARCIN, D. & KOVÁČOVÁ, E., 2005: Základná hydrogeologická a hydrogeochemická mapa Podunajskej roviny – Žitný ostrov a pravobrzežie Dunaja v mierke 1 : 50 000. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 245 s.
- BODIŠ, D., REPČOKOVÁ, Z., SLANINKA, I. & KRČMOVÁ, K., 2008: Stanovenie pozadových a prahových hodnôt ÚPV a hodnotenie chemického stavu podzemných vôd na Slovensku. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 81 s.
- DE MELO, M. T. C., FERNANDES, J., MIDOES, C., AMARAL, H., ALMEIDA, C. C. DA SILVA, M. A. M. & MENDONÇA, J. J., 2008: Identification and management of strategic groundwater bodies for emergency situations in Portugal (IMAGES). 33rd International Geological Congress, abstracts = Congres Geologique International Resumes, 33.
- CAPELLI, G., SALVATI, M. & PETITTA, M., 2001: Strategic groundwater resources in Northern Latium volcanic complexes (Italy): Identification criteria and purposeful management. *IAHS Press* (272), United Kingdom, 411 – 416.
- CANTER, L. W., CHOWDHURY, A. K. M. M. & VIEUX, B. E., 1994: Geographic information systems: A tool for strategic ground water quality management. *J. Environmental Planning & Management*, 37, 3, 251 – 266.
- CARRERA-HERNANDEZ, J. J. & GASKIN, S. J., 2009: Water management in the Basin of Mexico: Current state and alternative scenarios. *Hydrogeology Journal, Springer New York LLC*, 17, 6, 1 483 – 1 494.
- CSÁSZÁR, G., PISTOTNIK, J., PRISTAŠ, J., ELEČKO, M., KONEČNÝ, V., VASS, D. & VOZÁR, J., 2000: Surface geological Map. In: Császár, G. (ed.): *Danube Region Environmental Geology Programme DANREG Explanatory Notes. Jb. Geol. B. – A. (Wien)*, 4, 421 – 455.
- HANZEL, V., VRANA, K., ŠVASTA, J., KOHÚT, M., NAGY, A., MAGLAY, J., BUJNOVSKÝ, A. & MALÍK, P., 1999: Hydrogeologická a hydrogeochemická mapa Pezinských Karpát v mierke 1 : 50 000. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 179 s.
- HÝROŠOVÁ, E., 1967: Devín – Sedláčkov ostrov, hydrogeologický prieskum. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 16 s.
- JANÁČEK, J., 1967: Výskum tektoniky J časti Podunajskej nížiny s ohľadom na výstavbu VD Dunaj. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 42 s.
- JANÁČEK, J., 1969: Nové stratigrafické poznatky o pliocénnej výplni centrálnej časti Podunajské nížiny. *Geol. Práce, Spr.*, 50, 113 – 131.
- JENDRAŠÁK, E., 1971: Vyhodnotenie definitívnych širokopriemerových vrtaných studní HŠD-1 až HŠD-4 na Sedláčkovom ostrove v Devíne. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 5 s.
- KADLEČIKOVÁ, N. & PUTIŠKA, R., 2002: Groundwaters from NW part of Devínska Kobyla Mts. *Miner. Slov.*, 34, 1, *Geovest.*, 6 – 7.
- KANTOR, J., ĐURKOVIČOVÁ, J., ELIÁŠ, K., RYBÁR, M., GARAJ, M., FERENČIKOVÁ, E. & HAŠKOVÁ, A., 1982: Genetická charakteristika evaporitov Západných Karpát podľa izotopov síry. Čiastková záverečná správa. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 345 s.
- KANTOR, J., ĐURKOVIČOVÁ, J. & MICHALKO, J., 1989: Izotopový výskum hydrogenetických procesov II. časť. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 46 s.
- KLUKANOVÁ, A., IGLÁROVÁ, L., WAGNER, P., HRAŠNA, M., CIPCIAR, A., FRANKOVSKÁ, J., BAJTOŠ, P., SMOLÁROVÁ, H., GLUCH, A., VLČKO, J., BODIŠ, D. & ONDRAŠÍK, M., 2011: Čiastkový monitorovací systém – geologické faktory. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 824 s.
- KRÁSŇÝ, J., 1993: Classification of transmissivity magnitude and variation. *Ground Water*, 31, 2, 230 – 236.
- KULLMAN, E., ml., MALÍK, P., PATSCHOVÁ, A. & BODIŠ, D., 2005: Vymedzenie útvarov podzemných vôd na Slovensku v zmysle rámcovej smernice o vodách 2000/60/ES. *Podzemná voda*, 11, 1, 5 – 18.

- LOWRY, T. S., BRIGHT, J. C., CLOSE, M. E., ROBB, C. A., WHITE, P. A. & CAMERON, S., 2003: Management gaps analysis: A case study of groundwater resource management in New Zealand. *International Journal of Water Resources Development*, 19, 4, 579 – 592.
- MALÍK, P., BAČOVÁ, N., HRONČEK, S., IVANIČ, B., KÁČER, Š., KOČICKÝ, D., MAGLAY, J., MARSINA, K., ONDRÁŠIK, M., ŠEFCÍK, P., ČERNÁK, R., ŠVASTA, J. & LEXA, J., 2007: Zostavovanie geologických máp v mierke 1 : 50 000 pre potreby integrovaného manažmentu krajiny. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 552 s.
- MALÍK, P. & ŠVASTA, J., 2010: Hydraulic properties of carbonate rocks from Slovakian Borehole Database. *Acta carsol. (Ljubljana)*, 39, 2, 217 – 231.
- MARCIN, D., KULLMAN, E., BODIŠ, D., KORDÍK, J. & ZAKOVIČ, M., 1996: Hydrogeologická a hydrogeochemická mapa južnej časti Záhorkej nížiny v mierke 1 : 50 000. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 101 s.
- MICHALKO, J., 1998: Izotopová charakteristika podzemných vôd Slovenska. [Kandidátska dizertačná práca.] *Bratislava, Slov. Akad. Vied*, 94 s.
- MICHALKO, J., 2004: Používanie údajov o izotopovom zložení síry pri interpretácii genézy podzemnej vody. *Podzemná voda*, 1, 115 – 125.
- MICHALKO, J., ĎURKOVIČOVÁ, J., FERENČIKOVÁ, E., RÚČKA, I. & KOVÁŘOVÁ, A., 1995: Správa o výsledkoch meraní izotopového zloženia kyslíka povrchových a podzemných vôd v oblasti Vodného diela Gabčíkovo a Žitného ostrova v roku 1995 a za roky 1991 – 1995. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 32 s.
- MICHALKO, J., FERENČIKOVÁ, E., RÚČKA, I. & KOVÁŘOVÁ, A., 1997: Správa o výsledkoch meraní izotopového zloženia kyslíka povrchových a podzemných vôd v oblasti vodného diela Gabčíkovo a Žitného ostrova v roku 1996. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 76 s.
- MICHALKO, J., ĎURKOVIČOVÁ, J., RÚČKA, I., KOVÁŘOVÁ, A., MALÍK, P., SLÁDKOVÁ, M., FERENČIKOVÁ, E. & HARČOVÁ, E., 1993: Izotopový výskum genézy podzemných vôd. Čiastková záverečná správa. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 81 s.
- PARKHURST, D. L. & APPELO, C. A. J., 1999: User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 p.
- PAWELLEK, F., FREUENSTEIN, F. & VEIZER, J., 2002: Hydrochemistry and isotope geochemistry of the upper Danube River. *Geochim. cosmochim. Acta*, 66, 21, 3 839 – 3 854.
- PERFLER, R., UNTERWAINIG, M., MAYR, E. & NEUNTEUFEL, R., 2007: The security and quality of drinking water supply in Austria: Factors, present requirements and initiatives. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. *Springer-Verlag, Wien*, 59, 9 – 10, 125 – 130.
- PORUBSKÝ, A., 1973: Podzemné vody Bratislavy a jej okolia. *Geogr. Čas.*, 25, 3.
- POSPÍŠIL, P., 1996: Sedláčkov Ostrov – Devín – doplnenie pozorovacích objektov. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 20 s.
- PRISTAŠ, J., HALOUZKA, R., HORNÍŠ, J., ELEČKO, M., KONEČNÝ, V., LEXA, J., NAGY, A., VASS, D. & VOZÁR, J., 1996: Povrchová geologická mapa (Podunajsko – Danreg) 1 : 100 000, M-33-143. In: Kováčik, M., Tkáčová, H., Caudt, J., Elečko, M., Halouzka, R., Hušták, J., Kubeš, P., Malík, P., Nagy, A., Petro, M., Pristaš, J., Rapant, S., Remšík, T., Šefara, J. & Vozár, J., 1996: Podunajsko – Danreg. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 135 s.
- RANK, D., PAPESCH, W. & TESCH, R., 2009: Isotopic composition of river water in the Danube Basin: Results from the joint Danube survey 2 (2007) 2009. *Austria Journal of Earth Science*, 102, 2, 170–180.
- RODÁK, D., ĎURKOVIČOVÁ, J. & MICHALKO, J., 1995: The use of stable oxygen isotopes as a conservative tracer in the infiltrated Danube river water. Gabčíkovo part of the hydroelectric power project – environmental impact review, Faculty of Natural sciences, Comenius University, Bratislava, 82.
- SCAWTHORN, C., BALLANTYNE, D. B. & BLACKBURN, F., 2000: Emergency water supply needs lessons from recent disasters. *Water Supply. IWA Publishing, London, United Kingdom*, 18, 3, 69 – 77.
- SENKO, D., 2002: Bratislava – Devín – chatová oblasť Dolné koruny, obec, rodinný dom, Bratislava – Lamač – rodinný dom, Bratislava – Dúbravka – rodinný dom, hydrogeologický prieskum. *Manuskript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ*, 23 s.
- SCHAREK, P., HERRMANN, P., KAISER, M. & PRISTAŠ, J., 2000: Map of genetic types and thickness of Quaternary sediments. In: Császár, G. (ed.): *Danube Region Environmental Geology Programme DANREG Explanatory Notes. Jb. Geol. B. – A. (Wien)*, 4, 447 – 455.
- SHERIFF, J. D., LAWSON, J. D. & ASKEW, T. E. A., 1996: Strategic resource development options in England and Wales. *Chartered Institution of Water and Environmental Management*, 10, 3, 160 – 169.
- SCHWECKE, M., SIMONS, B., MAHESHWARI, B. & RAMSAY, G., 2008: Integrating alternative water sources in urbanised environments. 2nd International Conference on Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies, Sustainable Irrigation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 112, WITPres, United Kingdom, 351 – 359.
- ŠUBA, J., BUJALKA, P., CIBULKA, L., FRANKOVIČ, J., HANZEL, V., KULLMAN, E., PORUBSKÝ, A., POSPÍŠIL, P., ŠKVARKA, L., ŠUBOVÁ, A., TKÁČIK, P. & ZAKOVIČ, M., 1984: Hydrogeologická rajonizácia Slovenska. 2. vydanie. *Hydrofond*, 14, SHMÚ Bratislava, 308.
- ŠVASTA, J. & MALÍK, P., 2006: Priestorové rozloženie priemerných efektívnych zrážok na území Slovenska. *Podzemná voda*, 12, 1, 65 – 77.
- VERJUS, P., 2003: Albian-Neocomien underground water resources. How to safeguard and manage an emergency strategic resource for drinking water. *Societe Hydrotechnique de France, Paris, France*, 51 – 56.
- WOESSNER, W. W., 1998: Changing views of stream-groundwater interaction. In: Brahana, J. V., Eckstein, Y., Ongley, L. K., Schneider, R., Moore, J. E. (eds.): *Gambling with Groundwater – Physical, Chemical, and Biological Aspects of Aquifer – Stream Relations. Proceedings of the XXVIII Congress of the International Association of Hydrogeologists, Las Vegas, October 1998*, 1 – 5.

Rukopis doručený 5. 9. 2011

Revidovaná verzia doručená 1. 12. 2011

Rukopis akceptovaný red. radou 13. 9. 2011

Potential sources of strategic amounts of groundwater in the Bratislava region

The developed quantitative assessment concept consists in the scheme “origin – way (action) – target (receptor, affected area)”, used in environmental management. In the given scheme in the frame of hydrogeological systems and hydrogeochemical processes the transport of the pollutant from the source of pollution to the target (affected area) responds to the concept of “way” respectively “influence”. Relative “easiness” or “robustness” of this transport in the real hydrogeological environment subsequently determines the groundwater vulnerability in the given environment.

Qualitative criteria for selection and use of strategic sources of the groundwater are biologic and microbiologic safety of the groundwater, good chemical state of groundwater with the current interpretation of the stable isotopes of H, O, N contents and tritium activity. To specify these criteria, there is necessary to know hydrogeochemical conditions and to apply geochemical modelling methods. Coming out from this complex interpretation, there were selected two areas with potential strategic resources of the groundwater in the Bratislava region (Slovakia).

First one represents from the viewpoint of the water management the important area Žitný ostrov. Žitný ostrov has a brachysynclinal shape, on the margin limited by faults. Hydrogeological aquifer is formed by fluvial sediments of the Danube river. Aquifer represented by gravels, sandy gravels and sands is permanently watered, with free groundwater level and very high transmissivity. Groundwater is in hydraulic link with the river and their level depends on discharge of surface flow. For dominant gravel-sandy and gravel sediments there is characteristic a high variability of sandy fraction content. Owing this, the layer heterogeneity of sediments environment has formed. Overview of the total use of groundwater on example of hydrogeologic regions Q 052 (93.8 % of territory) and Q 051 (6.2 % of territory) is documented in Tab. 1, where a total withdrawal is shown during years 1995–2009 (data from SHMU). Whole groundwater body of Neogene sediments is in total characteristic by high transmissivity (Fig. 4) – median of transmissivity index T is $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (second degree of transmissivity). Value of transmissivity index Y median is 5.85 and hydraulic conductivity k median $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Benková et al., 2005). Wells specific discharge q varies between $0.02 - 21.98 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, with mean value $3.00 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

For the identification of alternative sources in real conditions of the Žitný ostrov area there are the most important changes of the groundwater with depth in the Quaternary and Neogene sediments cross-section. From the qualitative aspects this is a fact documented in Fig. 2, where nitrates concentration (indicator of anthropogenic influence of diffusion sources as well as point sources of pollution) significantly reduces and generally from 25 m level not exceeds the maximum concentration in drinking waters (50 mg per liter). In TDS changes with depth two dependencies are apparent. (1) High values of mineralization caused by anthropogenic influence up

to some 25 m and (2) the mineralization increase what is characteristic for Neogene aquifers. In this case TDS increase is caused by the ion exchange processes – in water mainly the increase of the Na and HCO_3 contents. This might be visible on the type of water presenting a clear Na- HCO_3 chemical type.

Coming out from oxygen isotope composition, it is possible to assume that contemporary Danube water infiltrates mainly in preferred areas in shallower horizons. Relatively quick recharge (Fig. 5) of the Danube river water (red) in zone 8–10 m (light blue), more slow and only partly water exchange in depth 35–37 m (blue) and Danube water influence at the groundwater in 67 m depth (dark blue) is practically minimal. It is possible to assume that nowadays the Danube water has a minimal influence on the groundwater in deeper parts of the structure. Due to the fact that the groundwater sources exploit groundwater from depths from 50 to 90 m, the sources of drinking waters in deeper horizons are in good quantitative and as well as chemical state. As strategic sources of the fresh groundwater in this area after shown qualitative and quantitative criteria we consider groundwater from the depths over 80 m in Quaternary sediments as well as Neogene sediments.

Second investigated territory is located between the villages of Devín and Devínska Nová Ves, bordered at south and west by the rivers Danube and Morava and by top parts of the Devínska Kobyla Mt. (514 m a.s.l.) at west. Aquifers present in the area are formed by crystalline basement, Upper Paleozoic and non karst Mesozoic rocks as well as Mesozoic karstified limestones, intergranular aquifers of Badenian and Sarmatian ages and Quaternary aquifers of fluvial accumulations of the Danube and Morava rivers. Dominant amounts of circulating groundwater of assessed area have the Holocene (Upper Quaternary) fluvial accumulations of the Danube river, and Morava river to a lesser extent. Their material composition is very similar, differences are in permeability and geometrical features – thickness and width. Attention has been focused on aquifers creating western and southern slopes of Devínska Kobyla Mt. recharged by the precipitations water only. Pre-Neogene basement can outcrop here on the surface in two hydrogeologically different versions. Aquifers with fissure type of permeability created by crystalline, Upper Paleozoic and non karst Mesozoic outcrop mainly in southern part of assessed area as the basement of Miocene aquifers or directly on surface.

In these rocks there are not present more important springs, discharge of vast of majority fissure and talus-fissure springs is from $0.01 - 0.3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. High fissure density, reach of weathering zone and zone of loosening of rock massif with system of fissures of transversal tectonics are dominant elements. Higher permeability of rock massif in this zone could be conditioned by situation where loosening of rock massif fissure system is hydraulically connected with the transversal tectonic fissures system (Hanzel et al.,

1999). Groundwater specific discharge estimated for these rocks in the Malé Karpaty Mts. by Foster method was from 1.69 to $6.97 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, mean value $3.76 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Kille method shows $4.58 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. In situation when the fissure aquifers are covered by Miocene sediments, the circulation of groundwater is realized mainly through these younger superjacent rocks due to intergranular permeability, but the groundwater is sometimes in contact with the basement, mainly formed by silicate rocks. Contact of mentioned aquifers with Mesozoic limestones is not possible to clearly identify due to Miocene cover. Contact could be assumed in the area of joining line between Devín castle and Devínska Kobyla summit. North of this line directly at the surface, or as the basement of the Sandberg and Devínska Nová Ves beds there crop out the Middle Triassic dark grey and layered black Gutenstein Limestones or Liasic (Lower Cretaceous) grey, massive, aphanitic fine-grained limestones with lithoclasts of Triassic carbonates, organodetritic limestones and sandstones of Prepadlé Beds. These are connected with the karst-fissure type of permeability with the high values of transmissivity and filtration index. Drainage influence of karstified Mesozoic aquifers is evident at depth of groundwater levels in this area, but direction of the groundwater flow is unknown yet. With the area of 3.7 km^2 and mean value of effective precipitation of $3.41 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ there could be from the northern part of the area expected a total hidden runoff of 12 to $13 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Coming out from mentioned situation, an attempt to verify local amounts of the groundwater strategic resources with the lower degree of vulnerability and good quality from Devínska Kobyla massif was done. Based on the conceptual hydrogeological model, the verifying was done by reconstruction of the geochemical evolution of the groundwater from its chemical composition with help of inverse modelling by PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999).

Chemical composition of precipitated water was imitated by the snow cover analyses (2010) at Železná studnička near Bratislava (Tab. 2). Final chemical

composition of the groundwater was represented by the sample of groundwater taken from well at Štítová street in the Devín village (Tab. 2). Modelling scenario represented penetration of precipitation water of acid character with the very low content of TDS through the soil followed by penetration through the crystalline, Neogene and Mesozoic rock environment of the Devínska Kobyla massif with total uncertainty of all ions 6 % and uncertainty of alkalinity balance 6 % and calcium 8 %. Two models convenient with given conditions and uncertainties were found through inverse modelling.

Molar transfer of phases is a result of relatively complex model (Tab. 3). Dominant precipitation of calcite, K-montmorillonite, quartz, gibbsite and consumption of Na during ion exchange at clay minerals are dominant processes at the groundwater formation. Middle Triassic limestones and dolomites represent the main source of carbonates in the groundwater circulation environment, where 10.16 moles of carbon dioxide are consumed. Quartz is oversaturated against the solution. It originates in crystalline rocks and Triassic quartzites forming the summit parts of the Devínska Kobyla Mt. Gibbsite is formed mainly due to the weathering of crystalline rocks, while secondary clay minerals (namely K-montmorillonite) formed as well. The ion exchange reactions occur probably in Neogene sediments environment where Na ion is taken from the solution (in Tab. 3 shown as NaX). Potassium ion is deliberated from sorption complexes and due to the albite dissolution as well: Ca-montmorillonite is unstable in such conditions and it is dissolved. Dissolution of gypsum appears most likely to be a source of sulphate in the groundwater and to much lesser extent the oxidation degradation of pyrite (Tab. 3). Redox molar transfer for sulphidic sulphur is $0.67 \cdot 10^{-7}$ moles. From the isotopes composition of oxygen and hydrogen (Fig. 6), there is clear that water from the well at Devínska Kobyla Mt. slope (Štítová street) represents a water of meteoric origin, but sulphur (Fig 7.) could be derived from Mesozoic evaporates, its final composition is to some extent affected by sulphates originated from sulphidic sulphur.