

proto nemohou být výsledkem diferenciálních procesů ani kontaminace horninami kontinentální kůry.

Výchozí magma muselo vzniknout parciálním tavením geochemicky velmi anomální domény v subkontinentálním litosférickém plášti. Podle nízkých obsahů CaO, Na<sub>2</sub>O a Sr, vysoké mg-hodnoty a relativně vysokého SiO<sub>2</sub> při daném MgO je nutné předpokládat ekvilibraci s ultramafickou horninou silně refraktorního složení. Zdrojová oblast, odpovídající pravděpodobně harzburgitu, však musela být silně obohacena hygromagmatofilními prvky typu LILE. Podle vysokých poměrů LILE/HFSE byl přínos zprostředkován zejména fluidní fází bohatou vodou, která má velmi malou schopnost přenáset HFSE. Nelze sice vyloučit, že chování HFSE bylo zčásti ovlivněno stabilitou specifických akcesorických minerálů ve zdroji, avšak jako pravděpodobnější se jeví frakcionace prvků během procesů plášťového obohacení. V každém případě byl zdroj magmatu geochemicky zcela extrémní, lišící se od zdrojů všech ostatních mafických magmat známých z Českého masivu.

Subaluminická nebo dokonce peralkalická povaha se nikdy neobjevuje u durbachitických hornin ani u plutonitů s durbachity zjevně příbuzných, ale je charakteristická pro některé zvláštní variety minet (alkalické minety, raabsity) a pro žilné mikrosyenity nebo křemenné mikrosyenity až mikrogranity, označované v moldanubiku jako thuresity a karlsteinity. Přestože afinita nebahovského melasyenitu k variabilní skupině subaluminických až peralkalických žilných hornin (HOLUB 1993) je z povahy amfibolu i makrochemismu zcela zřejmá, mikrochemismus je výrazně odlišný a zcela specifický. Nelze proto předpokládat, že by

nebahovský melakvarcsyenit mohl představovat složení magmatu parentálního k ostatním subaluminickým až peralkalickým žilným horninám moldanubické oblasti. Je to v rámci Českého masivu i ve světovém měřítku hornina geochemicky kuriózní, reprezentující zřejmě jen velmi malou porci mafického magmatu z velmi specifického zdroje. Svými anomálními rysy ukazuje na složitost vývoje subkontinentálního litosférického pláště a jeho silně heterogenní povahu pod moldanubickou oblastí v době variského orogenního cyklu.

Výzkum byl zčásti podporován grantem 205/02/0514, poskytnutým GA ČR.

## Literatura

- HEJTMAN, B. (1975): Biotites and associated plutonic rocks in the Prachatice granulite body and its vicinity. – Acta Univ. Carol. Geol., 4, 265–300.  
 HOLUB, F. V. (1993): Geochemie peralkalických žilných hornin moldanubické oblasti. – Zpr. geol. Výzk. v Roce 1991, 68–70.  
 LEAKE, B. E. et al. (1997): Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. – Amer. Mineral., 82, 1019–1037.  
 NĚMEC, D. (1973): Richterit z alkalického mikrosyenitu u Starče u Třebíče. – Čas. Morav. Muz., 58, 53–56.  
 VENTURELLI, G. – CAPEDRI, S. – DI BATTISTINI, G. – CRAWFORD, A. – KOGARKO, L. N. – CELESTINI, S. (1984): The ultrapotassic rocks from southeastern Spain. – Lithos, 17, 37–54.  
 VOLLMER, R. – OGDEN, P. – SCHILLING, J.-G. – KINGSLEY, R. H. – WAGGONER, D. G. (1984): Nd and Sr isotopes in ultrapotassic volcanic rocks from the Leucite Hills, Wyoming. – Contr. Mineral. Petrology, 87, 359–368.

## Využití izotopových analýz pro ověření zdrojů kontaminace dusíkatými látkami v modelovém území severní části Třeboňské pánve

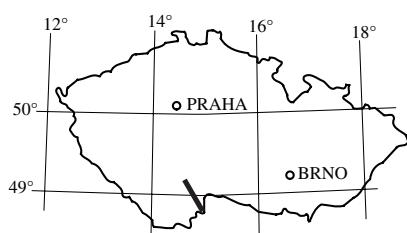
### Isotopic verification of nitrate contamination sources – case study from the northern part of Třeboň Basin

RENÁTA KADLECOVÁ<sup>1</sup> – STANISLAV ČURDA<sup>2</sup> – FRANTIŠEK BUZEK<sup>1</sup> – MARTIN ŠANDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Česká geologická služba, Klárov 3/131, 118 21 Praha 1

<sup>2</sup> Progeo, s.r.o., Tiché údolí 113, 252 63 Roztoky u Prahy

(22-42 Bechyně, 22-44 Hluboká nad Vltavou, 23-31 Soběslav, 23-33 Veselí nad Lužnicí)



**Key words:** Třeboň Basin, groundwater flow, nitrate pollution, oxygen and nitrogen isotopic analyses

**Abstract:** A model study of nitrogen and oxygen stable isotopes was used in the N part of the Třeboň Basin (project No. VaV/510/4/98 "Reduction of surface and groundwater nitrate pollution"). The aim of the study was to test these isotopes as indicators of pollution sources and as a verification of hydrologic and hydraulic models simulating groundwater flow and migration of contaminants.

V rámci projektu VaV/510/4/98 Omezování plošného znečištění povrchových a podzemních vod dusíkatými látkami byly v s. části třeboňské pánve testovány stabilní izotopy dusíku a kyslíku z hlediska možností jejich využití pro identifikaci zdrojů kontaminace, charakteristiky dynamiky podzemních vod v návaznosti na zpracovávané hydrolo-

gické a hydraulické modelové výpočty proudění podzemních vod a šíření kontaminace v této pánevní struktuře.

Severní část třeboňské pánve byla vybrána jako studijní lokalita, neboť představuje významnou vodo hospodářskou strukturu o ploše 290 km<sup>2</sup>, ve které se nachází cca 600 milionů m<sup>3</sup> kvalitní podzemní vody a kde je od 80. let 20. století registrován v podzemní vodě nárůst dusíkatých látek (ŠANTRŮČEK 1991). Hlavním původcem kontaminace dusíkatých látek je plošná aplikace hnojiv a rozvoz kejdy z objektů zemědělské výroby. Ke kontaminaci významně přispívají i lokální zdroje znečištění. K nejvýznamnějším patří bývalý sklad hnojiv v Dyníně a areál velkovýkrmny veprů v Mazelově. Koncentrace dusičnanů v podzemní vodě se např. v okolí bývalého skladu hnojiv v Dyníně po hybovala v roce 2002 okolo 4 794 mg . l<sup>-1</sup>.

Pro celou třeboňskou pánev byl aktualizován model proudění podzemní vody MODFLOW a simulována kontaminace podzemní vody dusíkatými látkami prostřednictvím modelu MT3D v saturované zóně. Zároveň v různých částech struktury proběhlo vzorkování podzemní vody (cca 96 vzorků) na izotopové analýzy kyslíku a dusíku. Výběr vzorkovaných objektů odpovídal hlavním zdrojům kontaminace, směru proudění podzemní vody a pozici vodárensky využívaných objektů. Počet vzorků z jednotlivých hydrogeologických objektů vyplynul z výsledků monitoringu jakosti podzemních vod prováděného ČHMÚ a vodárenskými společnostmi. Z variability vývoje <sup>18</sup>O během sledovaného období byly pomocí hydrochemických modelů YURTSEVERA (1983) a MALOSZEWSKÉHO (MALOSZEWSKI – ZUBER 1996) stanoveny odhady průměrné doby zdržení podzemní vody ve svrchní části pánve. Pro část struktury byl zpracován i bilanční model SWAT, který je zaměřen na proudění vody a transport kontaminantu v ne-saturované zóně v relaci k zemědělské činnosti.

Severní část třeboňské pánve se nachází v Jihočeském kraji mezi Bechyní, Veselím nad Lužnicí, Lomnicí nad Lužnicí, Lišovem a Ševětínem a patří mezi intenzivně zemědělsky využívaná území, kde zemědělská půda pokrývá přibližně 50 % plochy celého hydrogeologického povodí. Intenzivně zemědělsky obhospodařované plochy jsou situovány především v oblastech infiltrace a transportu podzemní vody, zatímco drenážní oblasti jsou většinou spojeny s existencí rašelin (rezervace Borkovická a Mažická blata).

Pánevní strukturu, která dosahuje největší mocnosti u Dolního Bukovska (cca 145 m), vyplňují především svrchnokřídové sedimenty klikovského souvrství v písčitém vývoji. V pánevních sedimentech nelze souvisle vymezit kolektory a izolátory a podzemní voda v prostoru pánve tvoří jedinou komplexní zvodeň, kterou lze charakterizovat jako soustavu vzájemně komunikujících lokálních zvodní. Prostředí pánve charakterizuje převládající průlivová porózita. Jedinou ověřenou významnou hydraulickou nehomogenitou je „mažický zlom“, který tvoří relativně nepropustnou zónu především ve spodní části pánevní výplně. Významnější podíl puklinové porózity nebyl prokázán, i když v omezené míře lze předpokládat existenci preferenčních cest proudění podzemní vody.

Koeficient transmisivity v s. části třeboňské pánve dosahuje nejvyšších hodnot z celé oblasti jihočeských pánví.

V téměř celém centrálním úseku pánve je transmisivita klikovského souvrství vysoká až velmi vysoká (běžně 5,8 . 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> . s<sup>-1</sup> a více, s maximy až kolem 0,02 m<sup>2</sup> . s<sup>-1</sup>). Ve zbyvajícím území je transmisivita většinou vysoká (1,15–5,8 . 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> . s<sup>-1</sup>); pouze v místech s malou mocností pánevní výplně, především podél transgresních okrajů pánve, klesá transmisivita pod uvedené hodnoty (KRÁSNÝ – ČURDA 2001). Koeficient filtrace se pohybuje v rozmezí 10<sup>-5</sup> až 10<sup>-4</sup> m . s<sup>-1</sup>, což podle JETELA (1985) představuje mírně až dosti silně propustné prostředí.

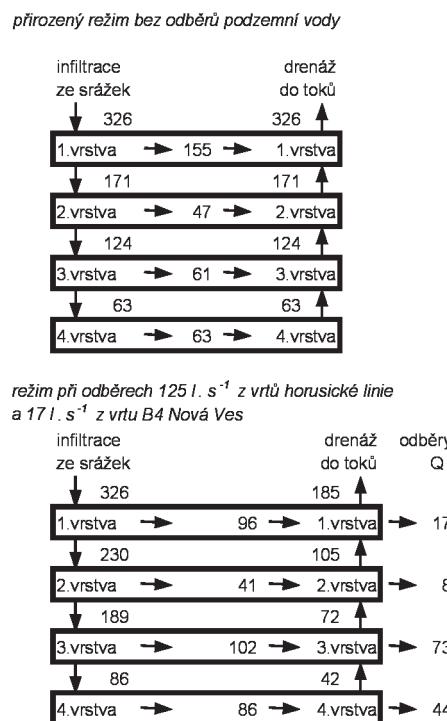
Pánevní sedimenty jsou dotovány především plošně srážkovou infiltrací. K přítokům podzemní vody dochází i z přilehlého krystalinika, zejména v místech tektonického styku krystalinika s klikovským souvrstvím podél drahotešického zlomu. Velikost a plošná distribuce infiltrace v oblasti pánve závisí jak na litologickém charakteru svrchní části pánevní výplně, tak na způsobu hospodaření na tomto území. Drenážní oblasti jsou Mažická a Borkovická blata, odkud jsou podzemní vody drážnovány především do Blatské stoky.

V severní části třeboňské pánve lze rozlišit mělký a hlubší oběh podzemní vody. Mělký, resp. lokální oběh probíhá ve svrchních částech pánevní výplně a směřuje k lokálním drenážním bázím tvořeným místními povrchovými toky. Hlubší, resp. regionální oběh směřuje do regionální drenážní oblasti Borkovice (Borkovická blata) a Mažice (Mažická blata), resp. do Blatské stoky a menším dílem do Lužnice. Hlubšího oběhu podzemní vody se účastní pouze menší část z celkového proudu podzemní vody v úhrnné výši cca 300 l . s<sup>-1</sup>. Při vodárenských odběrech podzemní vody, které jsou realizovány především z hlubší části pánve, se však podíl vody protékající spodní části pánve zvětšuje. V jímacím území Horusice – Dolní Bukovsko je dlouhodobě odebíráno 90–120 l . s<sup>-1</sup> z pěti vrtů tzv. horusické linie, situovaných napříč proudem podzemní vody směřujícího od J do drenážní oblasti Borkovice. Tento odběr významně ovlivňuje přirozený režim proudění podzemní vody při poklesu její hladiny v celé oblasti j. od mažického zlomu. Rovněž odběr o velikosti cca 15 l . s<sup>-1</sup> v jímací oblasti Nová Ves reprezentuje významné lokální ovlivnění přirozeného režimu proudění podzemní vody.

Následující schéma dokumentuje vertikální distribuci proudění podzemní vody zpracovanou na základě výsledků prostorového modelového řešení. Pánev je v modelu diskretizována do čtyř vrstev při bázích 400 m n. m., 380 m n. m., 350 m n. m. a 300 m n. m.

Kontaminace dusíkatými látkami se v podzemní vodě šíří především konvekcí ve směru jejího proudění. Globálně převládá horizontální směr proudění podzemní vody, v oblastech infiltrace se však přidává sestupné proudění a v oblastech drenáže též proudění vzestupné. Z vertikální distribuce přítoků, drenáže a odběrů podzemní vody je patrné, že vodárenské odběry vlivem podpory vertikálního proudění podzemní vody přispívají k lokálnímu zavlékání kontaminace do hlubších částí struktury.

V prostoru pánve jsou kromě dvou významných lokálních zdrojů znečištění registrovány 3 oblasti kontaminace dusíkatými látkami. V území *nad mažickým zlomem v oblasti Vlastiboře*, kde se koncentrace dusičnanů dlouhodobě



Vertikální distribuce přítoků, drenáž a odběrů podzemní vody ( $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

pohybují v rozmezí  $40\text{--}60 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  při zhruba setrvalém trendu vývoje kontaminace. Při z. okraji pánve v oblasti Hartmanice – Dolní Bukovsko lze rovněž konstatovat přibližně setrvalý trend s koncentracemi  $\text{NO}_3^-$  do  $20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  u Hartmanic a do  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  u Dolního Bukovska. V jižní části pánve v oblasti Pelejovice, Neplachov, Ševětín, Mazelov je zřetelná dlouhodobá tendence nárůstu koncentrací dusičnanů přes  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  (např. vrt H7 – Pelejovice  $63 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , vrt H5 – Mazelov  $92 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  v roce 2002).

Výsledky izotopových analýz dusíku identifikovaly plochy v oblasti s. části třeboňské pánve, kde převládá hnojení kejdou (okolí Mazelova) nebo organickými hnojivy (u Neplachova, Dolního Bukovska, v okolí Hartmanic a Vlastiboře), kde jsou směsné zdroje kontaminace a zároveň kde se lokálně projevují průsaky splaškových vod ze sídelních aglomerací či zemědělských provozů (Dolní Bukovsko). Výsledky časových řad poměrů stabilních izotopů dusíku zpřesnily, jaké procesy probíhají v různých částech struktury, kde převažují další vstupy dusíkatých látek, v kterých částech dochází k nařeďování a kde probíhá např. denitrifikace. Dále tyto výsledky dokumentovaly a potvrdily šíření kontaminace od bývalého skladu hnojiv Dynína směrem k S a SV k jímacím vrtům horusické linie. Z variability vývoje

$^{18}\text{O}$  během sledovaného období byly stanoveny hrubé odhadry průměrné doby zdržení podzemní vody ve svrchní části pánve v oblasti Mazelova (přechod mezi I. a II. modelovou vrstvou) na přibližně 1,6 roku. V oblasti Dynína se průměrná doba zdržení podzemní vody ve svrchní části pánve v I. modelové vrstvě pohybuje okolo cca 0,7 roku. Pro hlubší úroveň pánve (II. modelová vrstva) činí průměrná doba zdržení podzemní vody dle než 3 roky. V oblasti Neplachova lze průměrnou dobu zdržení podzemní vody

v pánevních sedimentech na úrovni II. až III. modelové vrstvy očekávat minimálně okolo 5 let. Analýza stabilních izotopů kyslíku v podzemní vodě zachytila dynamiku zejména mělkého oběhu podzemních vod a podíl vstupu srážek.

## Závěr

Při modelovém řešení jsou dostupné vstupní údaje převážně na úrovni souborů neúplných informací, které jsou dále upřesňovány v průběhu ladění použitých modelů. Málo známé jsou většinou parametry prostředí v oboru transportu kontaminantu, kde se často využívají tabelární informace z výsledků indikačních pokusů v analogických přírodních podmírkách. Značný význam mají informace v oblasti vstupu kontaminantu do zvodněného prostředí. V případě plošné zemědělské kontaminace vstupuje znečištění do modelu ve formě koncentrace dusičnanů v přítocích vody z nesaturowané zóny na hladinu podzemní vody. V optimálním případě je možno tento vstup do modelu proudění a kontaminace podzemní vody získat jako výstup modelu SWAT. Pro úspěšné odladění modelové simulace jsou významné kontrolní údaje koncentrací kontaminantu v objektech monitorovacího systému, popřípadě i v povrchových tocích. Vzhledem k tomu, že v objektech monitorovacího systému je sledována souhrnná informace o kontaminaci podzemní vody, jsou v případě existence lokálních zdrojů znečištění významné také co nejúplnejší informace o lokálních zdrojích znečištění v oblasti modelového řešení včetně oblastí přítoků povrchové a podzemní vody do prostoru modelového řešení.

Porovnáním výsledků z jednotlivých modelových řešení a izotopových analýz dusíku a kyslíku se ukázalo, že izotopové analýzy poskytují doplňující informace zejména o dynamice mělkého oběhu podzemních vod. Izotopy dusíku identifikují původ nitrátové kontaminace v podzemních a povrchových vodách a zároveň zpřesňují informace o probíhajících procesech přirozené attenuace. Umožňují také konfrontaci s historicky používanými druhy hnojiv. Izotopové analýzy tedy představují významné zdroje informací pro verifikaci tranzientních bilančních a hydraulických modelů – např. modelu SWAT a modelu MODFLOW/MT3D.

## Literatura

- JETEL, J. (1985): Metody regionálního hodnocení hydraulických vlastností hornin. – Metod. Příruč. Ústř. geol. Praha.
- KRÁSNÝ, J. – ČURDA, S. (2001): Optimální vodárenská exploatace a ochrana povrchových a podzemních vod v Jihočeském regionu. – MS Progeo. Roztoky u Prahy.
- MALOSZEWSKI, P. – ZÜBER, A. (1996): Lumped parameter models for interpretation of environmental tracer data. In: Manual on mathematical models in isotope hydrology. IAEA-TECDOC-910, 9–59.
- ŠANTRŮČEK, J. (1991): Třeboňská pánve – sever. Sledování jakosti vod – závěrečná zpráva. – MS Vodní zdroje Praha-Zličín.
- YURTSEVER, Y. (1983): Models for tracer data analysis. In Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, Tech. Rep. Ser. 91. – Internat. Atomic Energy Agency. Wien.