HYDROGEOCHEMICKÁ CHARAKTERISTIKA PUKLINOVO-KRASOVÝCH VÔD JUHOVÝCHODNEJ ČASTI VEĽKEJ FATRY

Renáta Ffaková

ABSTRACT

Karst-fissure water, genetically related to the Mesozoic komplexes of carbonate minerals, is significant for the formation of drinking-water supplies in Slovakia.

There were evaluated 13 significant drinking-water sources representing an important part of the water supply "Pohronský skupinový vodovod" in the mountain range "Veľká Fatra". As starting data were used chemical analyses of the process checking for the period from 1981 to 1994. Basic hydrogeochemical characteristic was showed that observed sources represented the typical carbonatogenic water. Evaluation of carbonate equilibrium confirmed the assumption supposing that in conditions of the karst-fissure and karst circulation the water is not saturated with carbonate. Based on obtained data investigated regime of groundwater quality was evaluated. Chemical composition of groundwater shows a typical changes in certain time of year, short-term, seasonal and long-term changes can be observed.

KEY WORDS

fissure-karst water, hydogeochemical characteristic, carbonate equillibria, groundwater quality, antrophogenic influences

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

puklinovo-krasové vody, hydrogeochemická charakteristika, karbonátové rovnováhy, kvalita podzemných vôd, antropogénne vplyvy

ÚVOD

Podzemné vody puklinovo-krasových obehov, ktoré sú geneticky viazané na mezozoické komplexy karbonátových hornín, sa výrazne podieľajú na tvorbe zásob pitnej vody na Slovensku. Tieto vody sú významné nielen z hľadiska kvantity, ale hlavne z hľadiska ich veľmi dobrej kvality. Na druhej strane charakter obehu v puklinovom až puklinovo-krasovom prostredí je veľmi špecifický a vytvára určité riziká z hľadiska ochrany a zraniteľnosti podzemných vôd.

Na Slovensku sú puklinovo-krasové vody viazané predovšetkým na mezozoické komplexy obalových jednotiek a príkrovov jadrových pohorí, pričom hydrogeologicky priaznivé kolektory tvoria asi 33% územia. Najvýznamnejšie kolektory sú viazané na vápence a dolomity stredného a vrchného triasu (Kullman 1990).

Chemické zloženie podzemných vôd je určované mineralogickým zložením hornín. Pri jeho formovaní sú dominantné najmä procesy rozpúšťania vápencov a dolomitov. Čiastočne sa na tvorbe chemického zloženia vôd podieľajú aj

Mgr. Renáta Ffaková
Katedra hydrogeológie, Prírodovedecká fakulta UK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

rozpúšťanie sadrovcov, oxidácia sulfidov a hydrolytický rozklad silikátov.

Genéza chemického zloženia puklinovo-krasových vôd sa prejavuje aj na režime ich kvality, ktorý je odrazom zmien chemického zloženia vôd v určitom časovom rozpätí. Objasnenie režimu kvality podzemných vôd je dôležité pre zistenie antropogénneho ovplyvnenia vôd a zabezpečenie ochrany zdrojov a má praktický význam najmä z vodohospodárskeho hľadiska.

CHARAKTERISTIKA ZÁUJMOVÉHO ÚZEMIA

Záujmové územie patrí sčasti do povodia Starohorského potoka a sčasti do povodia Bystrického a Harmaneckého potoka. Tieto povodia orograficky zaberajú z juhovýchodnej časti výbežky Veľkej Fatry, ktorá je z východu ohraničená Nízkymi Tatrami, z juhu Starohorskými vrchmi.

Povodie Starohorského potoka po Staré Hory budujú horniny obalovej jednotky a Krížňanského príkrovu. V oblasti Motyčiek vystupuje Chočský príkrov. Donovalskú obalovú jednotku tvoria súvrstvia spodného triasu s pieskovcami, kremencami, ílovito-piesčitými bridlicami a súvrstvia stredného triasu s guttensteinskými vápencami. Obalovú sériu ukončujú malmské hrubolavicové vápence. Krížňanský príkrov zastupujú dolomity anisu-ladinu a vápence. Tiež je zastúpené súvrstvie keupra s pestrými ílovcami, pieskovcami a dolomitmi. Najväčšiu časť povrchu povodia zaberajú slienité vápence a bridlice titon-neokomu. Chočský príkrov je zastúpený súvrstviami guttensteinských vápencov a dolomitov. K hydrogeologicky najpriaznivejším súvrstviam s puklinovou priepustnosťou patria vápence a dolomity stredného a vrchného triasu a liasu, ktoré patria krížňanskému a chočskému príkrovu.

Povodie Bystrice a Harmaneckého potoka je z väčšej časti budované chočským príkrovom, ktorý leží v zložitej tektonickej pozícii na Krížňanskom príkrove. Krížňanský príkrov je zastúpený slienitými bridlicami a vápencami titon-neokomu. Chočský príkrov zastupujú dolomity anis-karnu, guttensteinské a wetterstein-ské vápence až dolomitické vápence ladin-karnu. Karbonáty chočského príkrovu sú spolu s titon-neokomom krížňanského príkrovu zvrásnené do synklinál a antiklinál, najznámejšia je harmanecká synklinála. Tento hydrogeologický systém je z podstatnej časti odvodňovaný harmaneckým tunelom, ďalšie významné výstupy sú v Zalámanej doline (Némethy 1996).

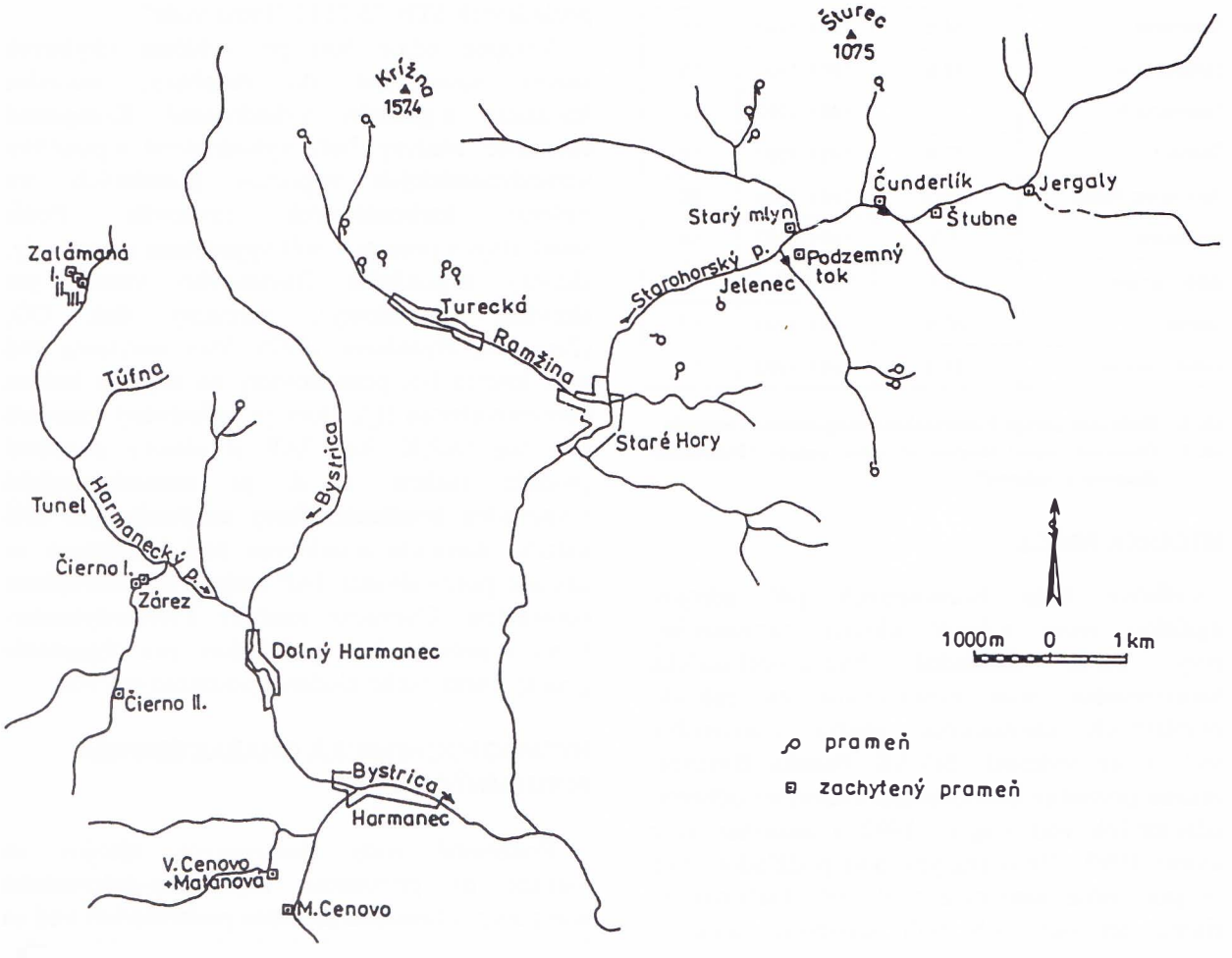
Z klimatického hľadiska patria povodia do oblasti mierne teplej až chladnej s priemerným ročným úhrnom zrážok 800 až 1100 mm. Najchladnejším mesiacom je január s priemernou teplotou -3,1° C, najteplejším júl s priemernou teplotou 18,1° C. Zrážkovo najbohatšie mesiace sú máj, jún, júl s priemernými mesačnými úhrnmi viac ako 100 mm. Zrážkovo najchudobnejšie sú mesiace január, február a marec. Na zrážkovo-odtokové vzťahy má veľký vplyv jarné topenie snehov (Fendeková 1996).

Obeh podzemných vôd prebieha v prostredí s puklinovou až puklinovo-krasovou priepustnosťou. Nositeľmi puklinovej priepustnosti sú rozpukané dolomity. V prostredí s prevahou vápencov sa vytvárajú puklinovo-krasové systémy s privilegovanými kanálovými cestami. Na povrch podzemné vody prirodzene vyvierajú vo forme prameňov. Najvýznamnejšie pramene boli zachytené a sú využívané ako zdroje pitnej vody v rámci Pohronského skupinového vodovodu (PSV).

V povodí Starohorského potoka sa nachádzajú vodné zdroje Jergaly, Štubne, Čunderlík, Starý mlyn a Podzemný tok, ktoré tvoria jergalskú vetvu PSV. V povodí Bystrice a Harmaneckého potoka sa nachádzajú zdroje Zalámaná I, Zalámaná II, Zalámaná III, Harmanec-Tunel, Čierno I, Čierno II, Veľké Cenovo, Matanová, Malé Cenovo, ktoré tvoria harmaneckú vetvu PSV (obr. 1). Zdroje sa nachádzajú v nadmorskej výške 570 až 900 m n.m. Výdatnosť týchto zdrojov sa pohybuje od jednotiek až po stovky l/s. Najvýdatnejšie sú zdroje Jergaly a Harmanec-Tunel (tab. 1).

V povodí Starohorského a Harmaneckého potoka je celkove využívaných 13 zdrojov, ktoré boli od roku 1981 postupne zapájané do PSV. Tieto zdroje sú spravované Stredoslovenskými vodárňami a kanalizáciami, š.p. (StVAK)

v Banskej Bystrici. StVAK zabezpečuje meranie výdatností a odberných množstiev zdrojov, ako aj kontrolu kvality vody. Prevádzková kontrola kvality vody sa vykonáva mesačne, u niektorých zdrojov iba dva razy do roka v závislosti od využívania zdroja. Od roku 1981 boli s najväčšou hustotou sledované Jergaly a Harmanec-Tunel (tab. 1). U týchto dvoch zdrojov je prevádzková kontrola robená spravidla jeden raz za mesiac. U ostatných zdrojov pravidelnosť kontroly nie je dodržiavaná. V posledných rokoch boli menšie zdroje sledované iba dvakrát do roka a v roku 1994 bola robená prevádzková kontrola v harmaneckej vetve iba pre Harmanec-Tunel.



Obr. 1: Sledované zdroje Pohronského skupinového vodovodu
Fig. 1: Observed sources of water supply Pohronský skupinový vodovod

Vodné zdroje PSV	priem. mes. odbery (l/s)	sledované obdobie	počet analýz
Jergalská vetva:			
Jergaly	232,5	1982-1994	120
Štubne	-	1987-1994	79
Čunderlík	23,4	1984-1994	18
Starý mlyn	60,3	1981-1994	52
Podzemný tok	37,2	1981-1994	60
Harmanecká vetva:			
Zalámana I	34,5	1981-1993	15
Zalámaná II	18,9	1981-1993	15
Zalámaná III	-	1981-1993	10
Čierno II	83,8	1981-1993	15
Harmanec-Tunel	236,8	1981-1994	90
Matanová	7,3	1981-1993	16
Malé Cenovo	18,5	1981-1993	14
Čierno I	80,5	1981-1993	17
Veľké Cenovo	37,3	1981-1993	17

Tab. 1: Sledované zdroje Podhronského skupinového vodovodu
Tab. 1: Observed water sources of water supply "Pohronský skupinový vodovod"

METODIKA PRÁCE

Celkove bolo hodnotených päť zdrojov jergalskej vetvy a deväť zdrojov harmaneckej vetvy PSV. Základná hydrogeochemická charakteristika bola vypracovaná na základe kompletných chemických analýz z novembra 1991, ktoré vykonali StVAK Banská Bystrica. Získané poznatky boli overené vlastnými odbermi podzemných vôd v apríli 1992 a následne aj v októbri 1995. Tieto analýzy boli podkladom tiež pre posúdenie nasýtenia vôd voči karbonátom. Priamo pri odberoch boli stanovené niektoré ukazovatele chemického zloženia - teplota vody, pH, merná elektrická vodivosť (EC), rozpustený kyslík, $KNK_{4,5}$ a $ZNK_{8,3}$. Základné chemické ukazovatele boli stanovené v laboratóriu Katedry hydrogeológie, alkalické a stopové prvky v laboratóriu Geologického ústavu Prírodovedeckej fakulty UK. Doplňujúce odbery na stopové prvky boli vykonané v apríli 1993.

Najväčším zdrojom vstupných údajov boli analýzy prevádzkovej kontroly, ktoré boli podkladom pre zhodnotenie kvality podzemných vôd a jej režimu. Celkove bolo vyhodnotených 538 analýz za obdobie rokov 1981 - 1994. Stabilita chemického zloženia bola hodnotená na základe trendových analýz HCO_3^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^-, $ChSK_{Mn}$ a rozpusteného O_2 v zdrojoch s najväčšou hustotou kontroly (Jergaly, Štubne, Starý mlyn, Podzemný tok, Harmanec-Tunel). Tieto údaje umožnili posúdiť aj antropogénne vplyvy na sledované zdroje a charakterizovať zraniteľnosť podzemných vôd z hľadiska ohrozenia ich kvality. Kvalita podzemných vôd bola hodnotená aj podľa požiadaviek STN 75 7111 "Pitná voda".

Vstupné údaje boli po vylúčení chybných analýz spracované do databázy, následne štatisticky a graficky vyhodnotené. Kompletné chemické analýzy boli vyhodnotené s použitím termodynamických výpočtov potrebných pre riešenie karbonátových rovnováh. Podľa štandartných postupov boli vypočítané iónové sily, aktivity (s použitím Daviesovho vzorca pre aktivitné koeficienty), parciálny tlak CO_2 (Ženišová, Hyánková 1997). Stav nasýtenia vôd voči kalcitu bol posudzovaný na základe indexu nerovnovážnosti (I_c), ktorý je definovaný vzorcom $I = \log IAP/K$, kde IAP je iónový aktivitný produkt reakcie a K je termodynamická rovnovážna konštanta. Stavy nasýtenia vôd voči kalcitu, dolomitu a sadrovcu boli hodnotené na základe porovnávania IAP reakcie s rovnovážnou konštantou. Chemické analýzy s termodynamickými výpočtami boli podkladom pre objasnenie genézy chemického zloženia podzemných vôd.

HYDROGEOCHEMICKÁ CHARAKTERISTIKA PODZEMNÝCH VÔD

Podzemné vody sledovaných zdrojov sú viazané na priepustné vápencovo-dolomitické komplexy. Chemické zloženie podzemných vôd sa formuje v podmienkach puklinového a puklinovo-krasového obehu. Pôvodom sú to zrážkové vody a z genetického hľadiska sa označujú ako petrogénne karbonátogénne vody. Chemické zloženie podzemných vôd je určované kvalitou zdrojových vôd a procesmi, ktoré prebiehajú pri interakcii vôd s horninovým prostredím.

Chemické zloženie zdrojových vôd charakterizuje kvalita zimných zrážok, ktoré boli sledované v rokoch 1976 až 1985 na lokalite Donovaly (tab. 2). Priemerné pH, zväčša nižšie ako 4,5,

a zvýšená celková mineralizácia naznačujú určitú kontamináciu zrážok (Vrana et al. 1989).

V harmaneckej vetve je väčšie zastúpenie dolomitov na obehových cestách, čo dokumentujú

	pH	M	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Mn	Fe	Al	Zn	Cu	Pb
		(mg/l)									(μg/l)					
min.	3,90	8,81	0,08	0,07	0,16	0,07	0,29	0,85	0,00	2,41	700	33	23	22	1	9
max.	5,15	37,71	1,05	0,70	0,93	3,60	13,00	9,12	4,15	7,30	720	1450	490	310	15	20
priem.	4,36	15,29	0,41	0,19	0,63	0,49	2,15	2,82	1,93	4,19	94	251	122	94	6	14

Tab. 2: Kvalita snehov na lokalite Donovaly (1976 -1985) (podľa Vrana et al., 1989)
Tab. 2: Snow pack quality of locality Donovaly (1976-1985) (according to Vrana et al. 1989)

Základným mineralizačným procesom je rozpúšťanie vápencov a dolomitov. V menšej miere sa na formovaní chemického zloženia podzemných vôd podieľajú i procesy rozpúšťania sádrovca, oxidácie sulfidov a hydrolytického rozkladu silikátov. Intenzita týchto procesov sa prejavuje v chemickom zložení vôd.

Podľa Gazdovej klasifikácie sú vody základného výrazného Ca-HCO_3 až Ca-Mg-HCO_3 typu (Gazda 1974). Najvýraznejší karbonátogénny charakter majú vody zo zdrojov Malé Cenovo a Čierno I, s A_2 nad 87 c z (tab. 3). Najvýraznejšie zastúpenie kalcium-sulfátovej zložky je vo vyššie položených zdrojoch jergalskej vetvy. Zdrojom Ca-SO_4 zložky sú súvrstvia keupra so sadrovcom, ktorých prítomnosť bola preukázaná v povodí Starohorského potoka (Kullman 1990).

Mineralizácia vôd dosahuje 230 až 510 mg/l. Najvyššie hodnoty majú zdroje s výraznejším zastúpením síranov. Po zohľadnení tejto skutočnosti mineralizácia zodpovedá charakteru obehu v puklinovom až puklinovo-krasovom prostredí s relatívne rýchlym pretekaním vôd a bez významnejšej dotácie CO_2 na obehových cestách. Z katiónov najväčšie koncentrácie dosahuje Ca^{2+}, menej Mg^{2+}. Z aniónov má prevahu HCO_3^-, ďalší v poradí je SO_4^{2-}. Ostatné ióny nedosahujú vyššie koncentrácie.

Napriek spoločným znakom predstavujú podzemné vody harmaneckej a jergalskej vetvy rôzne hydrogeologické celky a vykazujú určité rozdiely v chemickom zložení. Rozdiely sú najmä v teplote vôd, celkovej mineralizácii, zastúpení HCO_3^-, SO_4^{2-} a H_4SiO_4 vo vodách. Rozdiely je možné vysledovať aj medzi podzemnými vodami viazanými na horniny Krížňanského príkrovu a Chočského príkrovu.

vyššie hodnoty koeficientu Mg/Ca. Hodnoty vyššie ako 0,80 v zdrojoch Čierno II, Tunel, Matanová sú typické pre čisté dolomity. Podzemná voda cirkuluje v podmienkach puklinového prostredia. Podzemné vody jergalskej vetvy sa formujú v podmienkach puklinovo-krasového až krasového prostredia, ktoré je typické pre vápence. Nižšie hodnoty Mg/Ca v jergalskej vetve sú ovplyvnené aj určitým podielom Ca^{2+} iónov z Ca-SO_4 zložky, ktorá tu má vyššie zastúpenie (tab. 3).

Vody jergalskej vetvy sú vyššie mineralizované s netypickou priamou závislosťou mineralizácie a nadmorskej výšky. Pravdepodobne sa tu prejavuje rozdiel medzi podzemnými vodami Krížňanského a Chočského príkrovu. Vyššie položené zdroje (Jergaly, Štubne, Čunderlík) sú viazané na horniny krížňanského príkrovu.

Teplota vody je v jergalskej vetve vyššia (7,2 - 10,3°C) ako v harmaneckej vetve (5,8 - 8,0°C) s výraznou najvyššou hodnotou v zdroji Jergaly. Vysoký stupeň mineralizácie a teplota poukazujú na hlbší obeh vôd v Jergaloch.

Na mineralizácii podzemnej vody sa najviac podiela ión HCO_3^-, ktorého koncentrácie sú pomerne vyrovnané vo všetkých zdrojoch jergalskej vetvy a dosahujú 244 až 302 mg/l (tab. 3). V harmaneckej vetve sú koncentrácie HCO_3^- viac rozkolísané, dosahujú 140 až 260 mg/l. Vody jergalskej vetvy majú napriek puklinovo-krasovému obehu vyššie koncentrácie HCO_3^- ako vody harmaneckej vetvy. Táto skutočnosť spolu s vyššími teplotami taktiež poukazuje na podstatne hlbší obeh vôd jergalskej vetvy.

Vodné zdroje PSV	m.n.m	M (mg/l)	t_{vody} (°C)	Mg/Ca	A_2 (c.z %)	$S_2(SO_4)$ (c.z %)	Gazdova klasifikácia	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	H_4SiO_4 (mg/l)
Jergalská vetva:																
Jergaly	708	510	10,3	0,60	74,6	23,2	zv. Ca-Mg-HCO_3	1,9	1,1	86,2	31,6	302,0	3,9	2,8	74,0	5,46
Štubne	680	450	7,2	0,49	71,1	25,4	zv. Ca-HCO_3	1,7	1,2	78,2	23,1	256,2	7,0	3,2	72,0	3,37
Čunderlík	631	410	8,0	0,50	75,9	20,3	zv. Ca-HCO_3	1,8	1,1	72,1	21,9	247,1	6,8	3,2	52,0	6,26
Starý mlyn	600	390	7,7	0,44	81,7	14,2	zv. Ca-HCO_3	1,6	0,5	68,1	18,2	256,2	7,5	3,2	35,0	3,69
Podzemný tok	571	370	7,7	0,63	83,8	11,2	zv. Ca-Mg-HCO_3	5,1	1,0	58,1	22,4	244,0	6,7	4,3	26,0	3,37
Harmanecká vetva:																
Zalámaná I	900	280	5,8	0,47	84,4	10,2	zv. Ca-HCO_3	0,4	0,1	49,1	14,1	189,1	8,9	1,8	18,0	0,00
Zalámaná II	890	298	6,2	0,53	85,1	9,1	zv. Ca-Mg-HCO_3	0,4	0,2	50,1	16,3	201,3	10,5	1,8	17,0	0,80
Zalámaná III	885	342	6,2	0,77	87,5	7,5	zv. Ca-Mg-HCO_3	0,4	0,1	50,1	23,6	237,9	10,6	1,8	16,0	1,60
Čierno II	725	230	6,3	0,80	83,7	9,8	zv. Ca-Mg-HCO_3	1,5	1,2	29,1	14,1	140,3	6,9	2,1	13,0	27,16
Harmanec-Tunel	655	348	7,4	0,82	80,8	8,6	zv. Ca-Mg-HCO_3	6,7	0,5	46,1	23,1	225,7	8,1	12,4	19,0	7,06
Matanová	640	278	6,7	0,81	82,6	12,4	zv. Ca-Mg-HCO_3	1,2	1,0	37,1	18,2	173,8	6,8	2,1	20,5	21,34
Malé Cenovo	610	377	7,7	0,65	87,8	8,2	zv. Ca-Mg-HCO_3	0,4	0,4	60,1	23,6	259,3	8,7	1,8	19,0	4,17
Čierno I	605	263	7,0	0,77	87,1	8,7	zv. Ca-Mg-HCO_3	1,2	1,1	36,1	17,0	170,8	5,7	1,4	13,5	20,53
Veľké Cenovo	605	353	8,0	0,67	85,3	10,7	zv. Ca-Mg-HCO_3	1,0	0,5	54,1	21,9	231,8	7,1	2,1	23,0	14,12

Tab. 3: Základná hydrogeochemická charakteristika podzemných vôd (na základe analýz z nov. 1991)
Gazdova klasifikácia: zv. - základný výrazný typ

Tab. 3: Basic hydrogeochemical charakteristic of groundwater (according to anylysis from nov. 1991)
Gazda clasification: zv. - basic distinct type

Okrem toho chemické zloženie týchto vôd sa formuje v podmienkach väčšieho vplyvu oxidu uhličitého, ktorého rozhodujúci vplyv na mineralizačné procesy vôd v karbonátoch je dnes už všeobecne známy. Relatívne vyššie koncentrácie v rámci zdrojov harmaneckej vetvy sú v podzemných vodách najvyššie položených zdrojov Zalámaná I, II, III. Keďže tu nemožno očakávať vyššiu dotáciu CO_2, dá sa usudzovať na dlhšiu dobu obehu a priaznivejšie podmienky pre kontakt vody s karbonátmi.

Koncentrácie SO_4^{2-} sú podstatne vyššie v jergalskej vetve a poukazujú na prítomnosť sadrovcov na obehových cestách. V zdrojoch Jergaly a Štubne dosahujú hodnoty nad 70 mg/l. Zastúpenie SO_4^{2-} vo vode vykazuje rovnakú netypickú závislosť od nadmorskej výšky zdrojov ako mineralizácia. V zdrojoch harmaneckej vetvy je zastúpenie SO_4^{2-} nízke a je možné predpokladať ich sulfidický pôvod (tab. 3).

Z ostatných aniónov sú v podzemných vodách zastúpené chloridy a dusičnany v nízkych koncentráciách. Výnimkou je zdroj Harmanec-Tunel, kde obsahy Cl^- prekračujú 10 mg/l a sú pravdepodobne sekundárneho pôvodu (tab. 3). Koncentrácie NO_3^- sú veľmi nízke, iba v zdrojoch Zalámaná I, Zalámaná II, Zalámaná III presahujú 10 mg/l. Získané poznatky o zastúpení hlavných aniónov potvrdili aj analýzy prevádzkovej kontroly (tab. 4). V týchto analýzach boli zistené aj vyššie obsahy NO_3^- v zdrojoch Starý mlyn a Podzemný tok, ktoré môžu naznačovať vplyv povrchového toku.

Z katiónov má prevahu vápnik a horčík. Vyššie zastúpenie Ca^{2+} a Mg^{2+} je vo vodách jergalskej vetvy (tab. 3). Sodík a draslík dosahujú nízke koncentrácie, čo súvisí s genézou chemického zloženia vôd. Koncentrácie Na^+ nepresahujú 2 mg/l s výnimkou zdroja Harmanec-Tunel (6,7 mg/l). Vyššie koncentrácie Na^+ korešpondujú s vyššími koncentráciami Cl^- v tomto zdroji. Koncentrácie K^+ sú nižšie ako 1,5 mg/l vo všetkých zdrojoch (tab. 3).

Z hľadiska genézy podzemných vôd je zaujímavé zastúpenie H_4SiO_4 vo vodách. Vo všetkých zdrojov jergalskej vetvy sú obsahy H_4SiO_4 veľmi nízke, čo poukazuje na minimálny vplyv silikátov na obehových cestách (tab. 3). Naproti tomu v jednotlivých zdrojoch harmaneckej vetvy sú koncentrácie H_4SiO_4 rôzne. Koncentrácie H_4SiO_4 vyššie ako 20 mg/l sú v zdrojoch Čierno II, Matanová a Čierno I. Pri pomerne nízkej mineralizácii vody to poukazuje na ďalšie vplyvy pri formovaní chemického zloženia vôd. Okrem rozpúšťania karbonátov sa na tvorbe chemického zloženia podzemných vôd pravdepodobne podieľajú aj procesy hydrolytického rozkladu silikátov. Tieto poznatky môžu poukazovať na prestup vôd z neovulkanitov.

Maximálne obsahy rozpusteného kyslíka sú vyššie ako 10 mg/l (tab. 4). Kyslíkové nasýtenie vôd je veľmi vyrovnané a takmer u všetkých zdrojov prekračuje 70 , čo poukazuje na veľmi malé zastúpenie organického uhlíka na obehových cestách. K spotrebe kyslíka dochádza prakticky iba pri oxidácii sulfidov.

Zastúpenie stopových prvkov vo vodách nie je významné a zodpovedá podmienkam puklinových a puklinovo-krasových obehov. Napriek tomu je možné pozorovať určité rozdiely medzi jednotlivými zdrojmi harmaneckej a jergalskej vetvy (tab. 5).

Koncentrácie Ag a As sú nízke, čo zodpovedá pozaďovým koncentráciám typickým pre karbonáty. Zaujímavé je rozdielne zastúpenie Ba vo vodách harmaneckej a jergalskej vetvy. V zdrojoch jergalskej vetvy s vyšším zastúpením síranov sú vo vodách dosiahnuté nižšie koncentrácie Ba (4,9 - 11,5 µg/l), čo je možné vysvetliť nízkou rozpustnosťou $BaSO_4$ v porovnaní s rozpustnosťou $BaCO_3$ (Fľaková, Kubová 1996). Vyššia koncentrácia Ba v najnižšie položenom zdroji Podzemný tok môže byť druhotne ovplyvnená, keďže je preukázané jeho prepojenie s povrchovým tokom. V zdrojoch harmaneckej vetvy sú až rádovo vyššie koncentrácie Ba (6,9 - 96,8 µg/l). Najvyššia koncentrácia je v zdroji Veľké Cenovo, ktorý má najvyššiu mineralizáciu a zvýšený obsah H_4SiO_4.

Zastúpenie Cd v podzemnej vode nie je vysoké, koncentrácie Cd dosahujú 0,2 až 1,69 µg/l a sú vyrovnané vo všetkých zdrojoch (tab. 5). Pôvod Cd vo vodách je pravdepodobne primárny, ale nie je možné vylúčiť ani sekundárne vplyvy vzhľadom na určité navýšenie voči primárnym obsahom v karbonátoch (Fľaková, Kubová 1996).

Vodné zdroje	EC (mS/m)		O_2 (mg/l)		O_2 (%)		$ChSK_{Mn}$ (mg/l)		HCO_3^- (mg/l)		NO_3^- (mg/l)		Cl^- (mg/l)		SO_4^{2-} (mg/l)	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Jergaly	51,0	67,0	6,4	10,2	57,9	93,8	0,4	2,4	280,6	359,9	2,4	6,2	2,1	7,4	35,5	100
Štubne	42,0	56,0	7,7	11,4	63,4	93,9	0,4	2,1	213,5	256,2	1,4	8,4	0,5	6,8	62,0	96,0
Čunderlík	39,2	51,0	8,4	11,2	67,8	92,7	0,4	1,8	231,8	265,3	3,8	9,4	2,1	5,7	50,5	67,0
Starý mlyn	38,0	51,0	8,4	11,4	71,6	97,3	0,6	3,0	231,8	298,9	3,3	14,3	1,1	6,4	24,0	48,5
Podzemný tok	37,2	46,0	9,0	11,3	82,6	95,4	0,6	2,2	225,7	265,3	3,2	12,9	1,1	6,4	20,0	45,0
Zalámaná I	31,5	40,0	9,8	12,3	77,6	99,7	1,0	2,2	189,1	222,6	8,9	12,9	1,1	3,5	12,5	18,0
Zalámaná II	33,0	40,0	9,7	11,2	78,0	95,8	0,9	2,0	201,3	228,7	10,5	13,5	1,1	4,2	12,0	18,0
Zalámaná III	33,5	38,5	10,0	11,5	81,3	92,2	1,0	2,4	219,6	237,9	10,6	13,6	1,4	4,2	12,0	17,0
Čierno II	23,5	28,5	9,9	12,1	83,3	99,3	0,5	1,4	140,3	158,6	2,6	7,6	0,4	4,2	9,5	19,0
Harmanec-Tunel	134,0	42,0	8,0	16,8	83,2	98,6	0,6	2,8	207,4	237,9	5,0	9,8	3,2	12,9	11,0	29,0
Matanová	17,5	31,0	8,1	11,5	66,0	94,8	0,5	1,7	100,6	173,8	3,5	8,9	1,4	4,6	11,5	20,5
Malé Cenovo	33,0	43,0	9,8	11,7	85,9	99,0	0,4	0,8	207,4	271,4	1,0	8,7	1,4	5,3	10,0	26,0
Čierno I	25,0	36,0	9,4	11,7	78,3	95,5	0,6	1,7	161,6	195,2	4,0	7,2	1,4	4,2	9,0	17,0
Veľké Cenovo	34,8	40,6	9,0	12,1	77,3	99,0	0,4	1,5	219,6	268,4	2,6	7,3	1,4	4,6	10,5	25,0

Tab. 4: Chemické zloženie podzemných vôd (1981-1994)
Tab. 4: Chemical composition of groundwater (1981-1994)

Vodné zdroje	Ag (µg/l)	As (µg/l)	Ba (µg/l)	Cd (µg/l)	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Pb (µg/l)	Zn (µg/l)
Jergaly	0,68	0,69	7,1	0,20	2,54	2,54	< 2	6,80
Štubne	1,05	0,47	6,2	1,05	1,66	1,66	< 2	5,70
Čunderlík	1,05	0,52	5,6	1,27	3,80	3,80	< 2	6,20
Starý mlyn	1,05	0,33	4,9	1,18	4,70	4,73	< 2	8,64
Podzemný tok	0,50	0,50	11,5	1,26	4,50	4,45	< 2	14,60
Zalámaná I	1,50	0,49	60,2	1,49	1,20	1,16	< 2	8,0
Zalámaná II	2,02	0,49	6,9	0,92	4,60	4,58	< 2	1,40
Zalámaná III	1,89	0,53	73,1	1,56	3,20	3,19	< 2	11,27
Čierno II	1,19	0,54	48,6	1,59	<0,1	<0,1	< 2	4,25
Harmanec-Tunel	0,90	0,73	27,6	1,69	2,50	2,50	< 2	3,80
Matanová	1,02	0,63	47,6	0,93	2,92	2,92	< 2	5,20
Malé Cenovo	1,01	0,73	13,6	1,05	3,00	3,00	< 2	17,20
Čierno I	1,16	0,56	6,9	1,36	4,40	4,40	< 2	4,00
Veľké Cenovo	1,88	0,48	96,8	1,27	2,30	2,30	< 2	10,60

Tab. 5: Stopové prvky v podzemných vodách (nov. 1991)
Tab. 5: Trace elements in groundwater (nov. 1991)

Zastúpenie Cr je nízke a dosahuje najvyššie koncentrácie 4,7 µg/l v zdroji Starý mlyn. Obsahy Cr korelujú s obsahmi Cu vo vodách a sú takmer totožné. Zastúpenie Cu vo vodách je porovnateľné s obsahmi v zrážkach.

Koncentrácie Pb sú vo všetkých zdrojoch nižšie ako 2 g/l, limitované aj nízkou rozpustnosťou $PbSO_4$ a $PbCO_3$. Zastúpenie Zn je nízke, koncentrácie sa pohybujú od 1,4 do 17,2 µg/l. Väčšie kolísanie hodnôt je evidentné v zdrojoch harmaneckej vetvy, čo by mohlo poukazovať na sekundárne vplyvy (Fľaková, Kubová 1996).

Pri porovnaní zrážok a podzemných vôd je možné pozorovať výrazný úbytok Zn a Pb v podzemných vodách. Vysvetlením môže byť adsorpcia týchto prvkov na karbonátoch, ktorá je popisovaná aj v literatúre (Stumm 1992).

STAVY NASÝTENIA PODZEMNÝCH VÔD

Intenzita procesov rozpúšťania karbonátov je výrazne podmienená teplotou, pH, druhom karbonátu a predovšetkým prítomnosťou CO_2 na obehových cestách. Teplota podzemných vôd sledovaných zdrojov nie je vysoká, vyššie hodnoty dosahuje vo vodách s hlbším obehom. Hodnoty pH vo vodách nevykazujú väčšie rozdiely v jednotlivých zdrojoch, viac rozkolísané sú vo vodách harmaneckej vetvy. V jesenom období (november) dosahuje pH hodnoty od 7,0 do 7,1 v jergalskej vetve a od 7,0 do 7,5 v harmaneckej vetve (tab. 6). V jarnom období (apríl) je pH vyššie.

Parciálne tlaky CO_2 v jesennom období dosahujú hodnoty $1{,}51.10^{-3}$ až 2,39.10-3 MPa v jergalskej vetve a hodnoty $0{,}56.10^{-3}$ až $1{,}84.10^{-3}$ MPa v harmaneckej vetve. V jarnom období boli zistené nižšie hodnoty. Parciálne tlaky CO_2 poukazujú na jeho atmosferický a biogénny pôvod. Celkove sú p_{CO2} vyššie vo vodách jergalskej vetvy s maximom v Jergaloch, čo je zaujímave vzhľadom na málo vyvinutý pôdny pokryv a krasový typ obehu. Zvýšená dotácia oxidu uhličitého na obehových cestách, hlavne pri hlbšom obehu v Jergaloch, je pravdepodobná.

Na základe hodnôt pH, obsahov HCO_3^-, prípadne p_{CO2} možno hodnotiť karbonátové systémy z hľadiska dotácie oxidu uhličitého ako zatvorené alebo otvorené. Pre zatvorené systémy sú charakteristické vyššie hodnoty pH, nižšie HCO_3^- a pokles p_{CO2} pozdĺž obehu. Otvorené systémy majú naopak nižšie pH, vyššie obsahy

HCO_3^- a konštantné p_{CO2} pozdĺž obehových ciest podzemnej vody (Appelo, Postma 1993). V našich prírodných podmienkach prevládajú otvorené systémy.

Nižšie hodnoty pH a vyššie obsahy HCO_3^- u vôd jergalskej vetvy poukazujú na otvorenejší charakter v porovnaní s harmaneckou vetvou.

na odvodňovanie rozsiahleho územia a priaznivé podmienky interakcie vôd s karbonátmi. Keďže obeh vôd je viazaný na dolomity, je možné predpokladať ich veľké porušenie a teda lepšie podmienky styku vody s prostredím. Nízky stupeň nasýtenia voči kalcitu dosahujú vody zo zdrojov Čierno II a Matanová, pričom u zdroja Čierno II aj

Vodné zdroje	t_{vody} (°C)	pH	pCO_2 (MPa)	iónový aktivitný produkt kalcitu	dolomitu	sadrovca
Jergaly	10,3	7,00	$2,39\ 10^{-3}$	1,792	- 17,711	- 6,158
Štubne	7,2	7,10	$1,57\ 10^{-3}$	1,793	- 17,852	- 6,189
Čunderlík	8,0	7,10	$1,53\ 10^{-3}$	1,751	- 17,910	- 6,351
Starý mlyn	7,7	7,10	$1,59\ 10^{-3}$	1,751	- 17,971	- 6,533
Podzemný tok	7,7	7,10	$1,51\ 10^{-3}$	1,665	- 17,984	- 6,724
Zalámaná I	5,8	7,10	$1,16\ 10^{-3}$	1,501	- 18,463	- 6,918
Zalámaná II	6,2	7,20	$0,98\ 10^{-3}$	1,637	- 18,139	- 6,942
Zalámaná III	6,2	7,00	$1,84\ 10^{-3}$	1,498	- 18,257	- 6,987
Čierno II	6,3	7,20	$0,69\ 10^{-3}$	1,271	- 18,696	- 7,251
Harmanec-Tunel	7,4	7,50	$0,56\ 10^{-3}$	1,939	- 17,327	- 6,948
Matanová	6,7	7,00	$1,36\ 10^{-3}$	1,252	- 18,722	- 6,976
Malé Cenovo	7,7	7,20	$1,28\ 10^{-3}$	1,805	- 17,695	- 6,847
Čierno I	7,0	7,20	$0,84\ 10^{-3}$	1,437	- 18,364	- 7,162
Veľké Cenovo	8,0	7,20	$1,15\ 10^{-3}$	1,718	- 17,851	- 6,789

Tab. 6: Stupeň nasýtenia vôd kalcitu, dolomitu a sadrovca
Tab. 6: Degree of saturation with calcite, dolomites and gypsum

Z hľadiska nasýtenia vôd voči kalcitu a dolomitu sú podzemné vody všetkých zdrojov nenasýtené (tab. 6). Podzemné vody jergalskej vetvy sú nenasýtené voči kalcitu a taktiež voči dolomitu. Stupeň nasýtenia vôd je približne rovnaký u všetkých zdrojov a dosahuje vyšší stupeň v porovnaní s harmaneckou vetvou. V harmaneckej vetve sú výrazné rozdiely medzi jednotlivými zdrojmi v stupni nasýtenia vôd. Najvyšší stupeň nasýtenia voči kalcitu dosahujú podzemné vody zo zdrojov Harmanec-Tunel a Malé Cenovo. Pritom voda najvýdatnejšieho zdroja Harmanec-Tunel je najviac nasýtená voči kalcitu zo všetkých sledovaných zdrojov. Vzhľadom na charakter zdroja, ktorý tvorí veľký počet výverov s rôznou výdatnosťou a mineralizáciou, vysoký stupeň nasýtenia pri pomerne nízkom p_{CO2} a obsahu HCO_3^- poukazuje voči dolomitu. Nízky stupeň nasýtenia vôd voči karbonátom a vyššie zastúpenie H_4SiO_4 v týchto vodách naznačuje vplyv iných procesov pri tvorbe chemického zloženia vôd.

Nasýtenie vôd voči dolomitu je nižšie v zdrojoch harmaneckej vetvy, okrem zdroja Harmanec-Tunel, ktorý má celkove najvyšší stupeň nasýtenia (tab. 6). Podzemné vody všetkých zdrojov sú výrazne nenasýtené voči sadrovcu.

Zistené poznatky poukazujú na to, že bez výraznej dotácie hlbinného CO_2 nedochádza v podmienkach puklinovo-krasových obehov k nasýteniu vôd voči karbonátom, predovšetkým vzhľadom na pomerne veľké rýchlosti pohybu podzemnej vody, krátku dobu zdržania v horninovom prostredí a menej priaznivé podmienky kontaktu vody s horninami.

REŽIM KVALITY VÔD

Pri komplexnom spracovaní vstupných dát boli zistené zaujímavé poznatky o režime kvality podzemných vôd, ktorý je špecifický pre puklinové a puklinovo-krasové obehy. Tieto poznatky následne umožnili posúdiť zraniteľnosť podzemných vôd z hľadiska ohrozenia ich kvality.

Chemické zloženie vôd v určitých časových obdobiach vykazuje krátkodobé, sezónne a dlhodobé zmeny. Tieto zmeny boli v najväčšom rozsahu posúdené pre dva najväčšie zdroje, Jergaly a Harmanec-Tunel, ktoré predstavujú dve odlišné hydrogeologické štruktúry s rôznym typom obehu.

Krátkodobé zmeny kvality vôd sa prejavujú v období vyšších úhrnov zrážok, najmä následkom jarného topenia snehov a letných prívalových dažďov, kedy dochádza k prudkému nárastu výdatností zdrojov. Nárast výdatností sa prejavuje po 4 až 7 dňoch od začiatku topenia sa snehu. Výsledkom je v prvej fáze riedenie vôd, čo sa prejavuje poklesom mineralizácie. V druhej fáze dochádza k náhlemu zhoršeniu kvality podzemných vôd vplyvom prieniku organického a mikrobiálneho znečistenia. Obdobné zmeny boli popísané aj na iných lokalitách Slovenska (Kullman, Vrana 1991).

Sezónne zmeny kvality podzemnej vody sa prejavujú počas roka určitým kolísaním primárnych zložiek chemického zloženia. Najvhodnejším pre posudzovanie režimových zmien kvality je ión HCO_3^- ako jeden z hlavných produktov rozpúšťania karbonátov. Jeho zastúpenie v podzemnej vode nie je ovplyvnené ďalšími mineralizačnými procesmi na rozdiel od iných iónov, ani kvalitou zrážkových vôd. Koncentrácie HCO_3^- počas roka vykazujú zmeny, ich kolísanie má sinusoidný priebeh, obdobný ako u povrchových tokov. Pričiny sú však rozdielne, keďže u povrchových vôd sú zmeny spôsobené predovšetkým fotosyntetickou asimiláciou (Hyánek et al. 1991).

Dlhodobé zmeny kvality sú trvalé a prejavujú sa zvýšením alebo znížením obsahu niektorých ukazovateľov v podzemnej vode. Príčinou môžu byť trvalé zdroje znečistenia, zmeny kvantitatívnych ukazovateľov, miešanie vôd. Dlhodobé zmeny kvality boli posudzované pomocou trendových analýz pre zdroje s dlhodobým a pravidelným sledovaním kvality vôd. Z hľadiska dlhodobého sledovania HCO_3^- bolo zistené, že primárne chemické zloženie podzemných vôd je stabilné. Z hľadiska sekundárne ovplyvnených ukazovateľov boli pre niektoré zdroje preukázané trendy nárastu koncentrácií síranov, dusičnanov a chloridov v podzemných vodách.

Vzhľadom na získané poznatky o režime kvality vôd sa ako veľmi zaujímavé ukazuje porovnanie dvoch najväčších zdrojov.

JERGALY

Zdroj Jergaly predstavuje typický puklinovo-krasový prameň, ktorý je viazaný na hydrogeologicky priaznivé jurské vápence obalovej série kryštalinika a triasové vápence a dolomity križňanského príkrovu. Infiltračnú a akumulačnú oblasť tvoria vápence križňanského prikrovu. Podzemné vody vystupujú na povrch po tektonickom styku príkrovu s obalovou sériou. Zdroj má kolísavú výdatnosť od 123 do 1315 l/s. Predpokladaná hĺbka obehu je 200 až 250 m. Retardácia za zrážkami dosahuje 7 až 14 dní. V pôvodnom pramenisku boli vybudované štyri vrty. Zdroj je efektívne využívaný v závislosti od výdatnosti tromi spôsobmi - gravitačne, násoskami alebo čerpadlami (Kullman 1990).

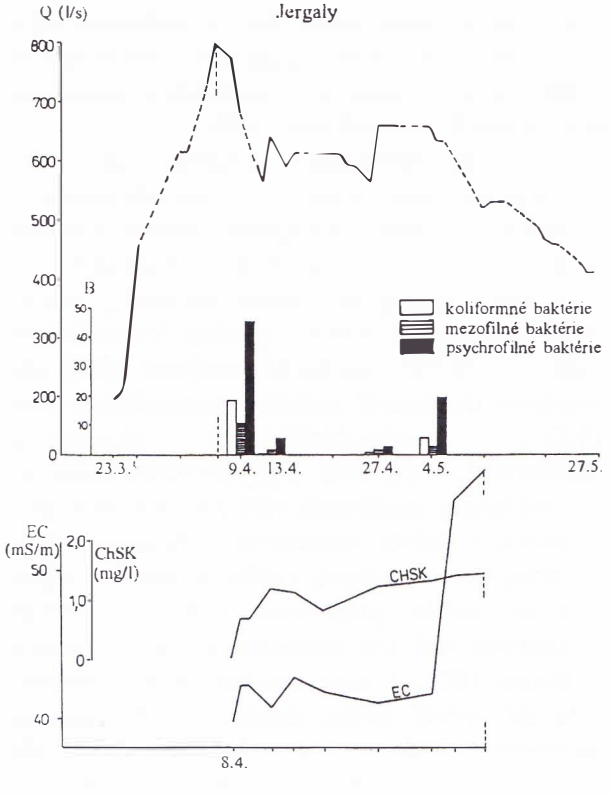
Z hydrogeochemického hľadiska sa jedná o typické karbonátogénne vody v zmysle Gazdovej klasifikácie, s vyšším zastúpením síranov a mierne zvýšenou dotáciou CO_2 na obehových cestách.

V zdroji Jergaly boli sledované zmeny kvality vody počas jarnej prietokovej vlny. Vo vode bola sledovaná merná elektrická vodivosť (EC) ako nepriamy ukazovateľ celkovej mineralizácie vôd, $ChSK_{Mn}$ a mikrobiologické ukazovatele (koliformné, mezofilné a psychrofilné baktérie) ako indikátory znečistenia vôd. Sledovanie kvality sa začalo v období kulminácie výdatnosti zdroja. Po prvej fáze vytláčania vyššie mineralizovaných vôd sa začalo prejavovať riedenie vplyvom zrážkových vôd, a to poklesom mernej elektrickej vodivosti (EC). V čase maximálnych výdatností bola EC veľmi nízka, dokonca nižšia ako sú minimálne hodnoty za obdobie 1981-1994 (obr. 2). Nízke EC bolo sprevádzané aj nizkymi hodnotami $ChSK_{Mn}$. Mierny nárast EC sa prejavil asi po siedmich dňoch a bol sprevádzaný výrazným zhoršením mikrobiologických ukazovateľov, ktoré trvalo asi jeden mesiac.

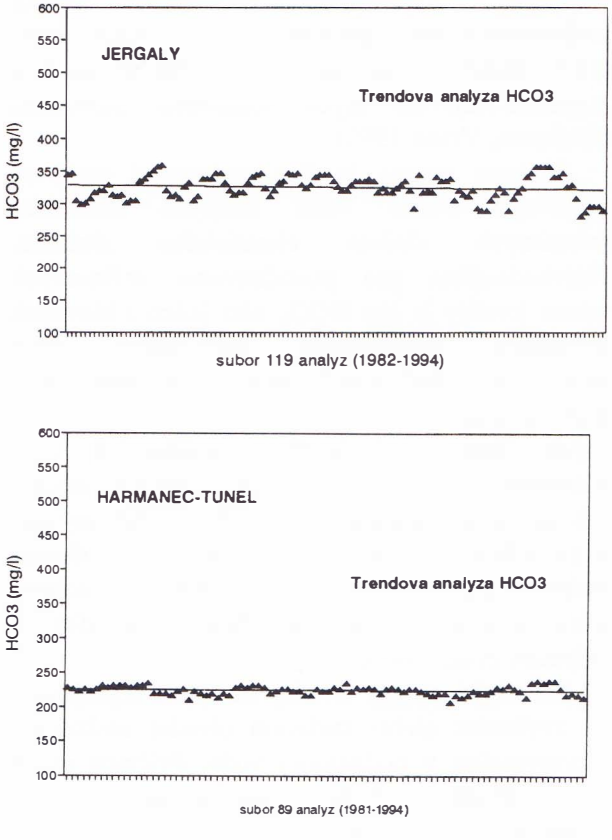
V ďalších dňoch bol stav vyrovnaný s veľmi nízkymi EC, ich zvýšenie sa prejavuje až po mesiaci od kulminácie prietokovej vlny. Znečistenie podzemných vôd sa prejavilo v dvoch vlnách, pričom druhá vlna nastúpila približne po štyroch týždňoch. Celkové obnovenie pôvodneho stavu bolo dosiahnuté približne po dvoch mesiacoch. Obdobné výsledky boli zistené aj v zdroji Starý mlyn a sú typické pre puklinovo-krasové až krasové obehy. Prienik znečistenia v dvoch vlnách je možné vysvetliť vplyvom molekulovej difúzie, ktorá sa uplatňuje na styku znečistenej vody a horniny (Hyánek 1991). V prvej fáze dochádza k vyplavovaniu znečistenia po privilegovaných cestách, pričom difúziou sa šíri znečistenie aj do bočných kanálových systémov. V druhej fáze, po ústupe znečistenia, je koncentračný rozdiel opačný a difúziou môže dochádzať k oneskorenému prestupu znečistenia z bočných systémov.

V zdroji Jergaly, kde je zastúpenie HCO_3^- v porovnaní s ostatnými zdrojmi jergalskej vetvy najvyššie, boli zistené najvýraznejšie sezónne cyklické zmeny (Fľaková 1995). Za celé sledované obdobie koncentrácie HCO_3^- dosahovali hodnoty od 280,6 mg/l do 359,9 mg/l (tab. 4). Rozdiely medzi minimálnymi a maximálnymi koncentráciami v roku boli 40 až 50 mg/l (obr. 3). Minimálne hodnoty boli najčastejšie zistené v apríli až júni, maximálne hodnoty sú charakteristické pre október až november. Sezónne zmeny HCO_3^- teda súvisia s riedením vôd v dôsledku jarnej prietokovej vlny. Výrazné cyklické zmeny HCO_3^- počas roka poukazujú na krasový obeh s pomerne rýchlym prúdením vôd.

Z posúdenia režimu kvality zdroja Jergaly je zrejmé, že z hľadiska ochrany kvality vôd je jeho zraniteľnosť vysoká a potencionálne znečistenie by pravdepodobne preniklo rýchlo a v plnom rozsahu do podzemnej vody.



Obr. 2: Krátkodobé zmeny kvality podzemnej vody
Fig. 2: The short-time changes of groundwater quality



Obr. 3: Sezónne zmeny kvality podzemnej vody
Fig. 3: The seasonal changes of groundwater quality

HARMANEC-TUNEL

V harmaneckej vetve je najväčším zdrojom Harmanec-Tunel, ktorý odvodňuje harmaneckú synklinálu. Podzemné vody sú viazané na stredno až vrchnotriasové súvrstvia štureckého príkrovu, guttensteinské vápence a masívne dolomity. Najväčšie prítoky do tunela sú na styku vápencov a dolomitov. Tunel s celkovou dĺžkou 4,617 km vlastne predstavuje mohutný drén podzemnej vody, ktorý sa prejavil zánikom prameňov a tokov v blízkom okolí. Tento zdroj je tvorený čiastkovými vývermi pozdĺž tunela v smere Harmanec - Čremošné, ktoré sú spoločne odvádzané do vodného zdroja (Némethy 1994).

Nové poznatky o genéze chemického zloženia tohto zdroja boli zistené pri rekonštrukcii tunela, kedy boli analyzované vzorky vody z dielčich výverov (tab. 7). Tieto vývery predstavujú samostatné zdroje so svojimi vlastnými infiltračnými oblasťami, s odlišným kvantitatívnym a kvalitatívnym režimom. Medzi čiastkovými zdrojmi sú evidentné rozdiely v základnom chemickom zložení, napríklad v zastúpení Ca-Mg-HCO_3 zložky, obsahoch síranov a chloridov. Koeficient Mg/Ca dosahujúci na harmaneckej strane hodnoty 0,8 - 0,9 sa vplyvom vápencov smerom k Čremošnému znižuje, obsah SO_4^{2-} sa zvyšuje a obsahy Cl^- sú podstatne nižšie (3 - 4 mg/l). Maximálne koncentrácie Cl^- (25 - 29 mg/l) boli namerané v kobke III. (st. 28,894 km). Najvyššie koncentrácie HCO_3^- v tomto vývere poukazujú na prítok vody z väčšej vzdialenosti (Némethy 1994).

V zdroji Harmanec-Tunel boli taktiež zistené sezónne zmeny kvality vody. Napriek plytšiemu obehu sú tieto zmeny menej výrazné ako v zdroji Jergaly. Rozdiely medzi jarnými a zimnými koncentráciami neboli väčšie ako 30 mg/l (obr. 3). Vyrovnanejší priebeh koncentrácií HCO_3^- priamo súvisí s miešaním vôd čiastkových zdrojov (Fľaková 1995).

Zistené poznatky o režime kvality podzemných vôd zdroja Harmanec-Tunel dokumentujú puklinový typ obehu a poukazujú na menšiu zraniteľnosť vôd voči prieniku znečistenia v porovnaní s Jergalmi. Pri prieniku znečistenia do vôd je možné predpokladať jeho riedenie a čiastočné odbúravanie vzhľadom na dlhšiu dobu zdržania v prostredí.

ANTROPOGÉNNE VPLYVY A OCHRANA PODZEMNÝCH VÔD

Antropogénne vplyvy boli zistené pri posúdení celkového chemického zloženia podzemných vôd a pri hodnotení dlhodobých zmien niektorých ukazovateľov kvality.

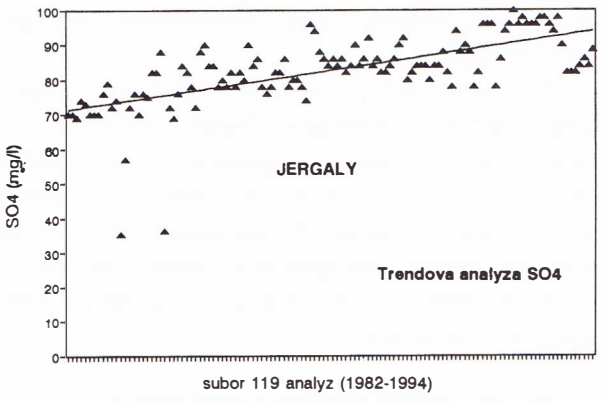
Sírany v podzemnej vode sú čiastočne primárneho pôvodu, čo sa prejavuje miernymi cyklickými zmenami počas roka a čiastočne aj sekundárneho pôvodu. Z dlhodobého hľadiska je evidentný vzrastajúci trend obsahu SO_4^{2-} v podzemnej vode v zdrojoch s najväčším zastúpením síranov vo vode. V zdroji Jergaly nárast koncentrácií predstavuje 25 mg/l za 13 rokov (obr. 4), pričom v januári 1993 až februári 1994 boli vyššie ako 90 mg/l, potom nastal určitý pokles. Výrazný vzostupný trend SO_4^{2-} je evidentný aj v zdroji Štubne, kde nárast koncentrácií dosahuje 18 mg/l

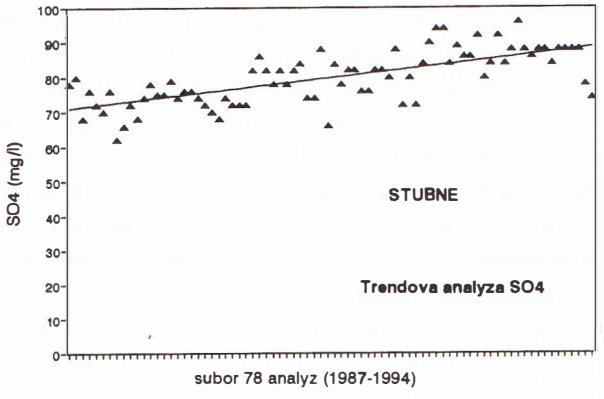
staničenie	EC mS/m	$ChSK_{Mn}$ (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)
Portál tunela st. 27,842 km	37,2	0,30	230	10	20	11,0
st 28,874 km	44,0	-	253	27	17	7,8
st. 29,003 km	36,0	0,60	231	8	15	7,5
st. 29,244 km	46,0	0,60	246	29	17	9,7
st. 29,354 km	40,0	0,80	243	11	22	10,3
st. 29,549 km	47,9	0,90	237	22	21	10,7
st. 29,850 km	36,3	-	242	3	21	8,3
st. 30,160 km	39,5	0,70	234	6	28	7,5
st. 30,220 km	41,0	1,40	-	4	-	8,5
st. 31,914 km **Čremošné**	36,8	0,56	230	10	20	11,0

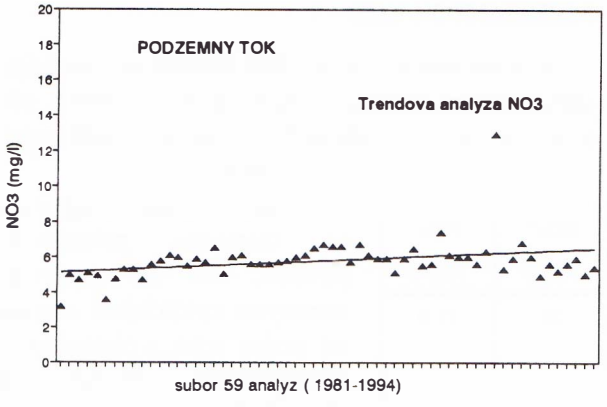
Tab. 7: Chemické zloženie výverov v Harmaneckom tuneli
(analyzované na Katadre hydrogeológie, apríl - máj 1993)
Tab. 7: Chemical composition of springs in Harmanec tunnel
(analysed in Department of groundwater, april - may 1993)

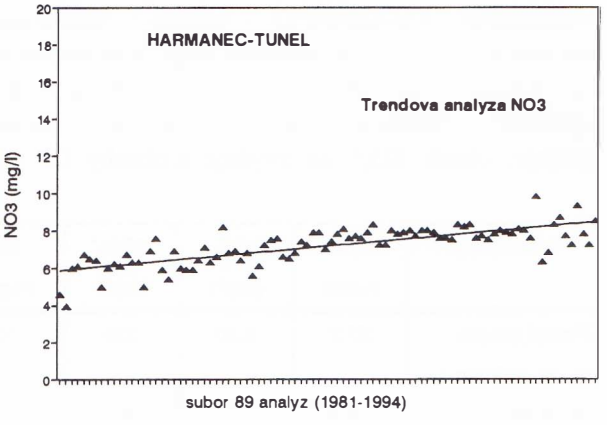
za obdobie 7 rokov (obr. 4). V zdrojov Starý mlyn a Podzemný tok bol tiež preukázaný výrazný vzostupný trend. V zdrojoch harmaneckej vetvy sú obsahy SO_4^{2-} vyrovnanejšie, stúpajúci trend síranov bol preukázaný v zdrojoch Harmanec-Tunel, Čierno I, Čierno II, Malé Cenovo, Veľké Cenovo a Matanová. Zdrojom sú pravdepodobne vykurovacie zariadenie v oblasti Starých Hôr a Donovalov, turistika a priemysel v Harmanci.

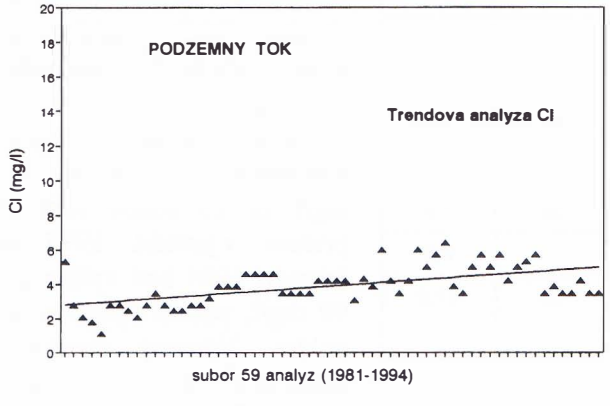
Zastúpenie NO_3^- vo vode sledovaných zdrojov, s výnimkou zdroja Jergaly, vykazuje vzostupný trend. Najvýraznejší trend nárastu koncentrácií NO_3^- bol zistený v zdroji Podzemný tok, kde dosahuje 2,5 mg/l za sledované obdobie 13 rokov (obr. 4). Zistené trendy zatiaľ nespôsobili väčšie ohrozenie kvality vôd, keďže celkove sú koncentrácie dusičnanov v zdrojoch jergalskej vetvy nižšie ako 8 mg/l (tab. 4). V zdrojoch harmaneckej vetvy je zastúpenie NO_3^- vo vode

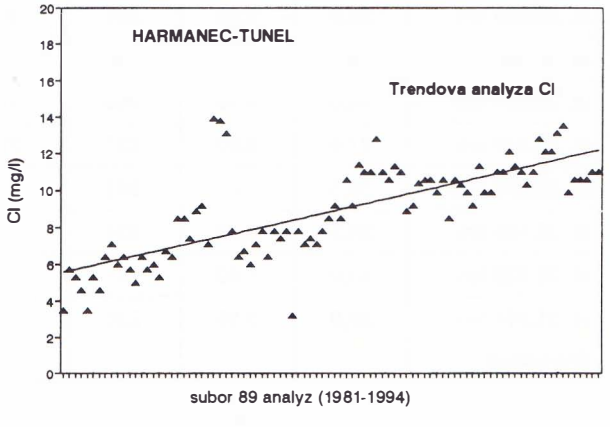












Obr. 4: Dlhodobé zmeny kvality podzemnej vody
Fig. 4: The long-time changes of groundwater quality

vyššie a má tiež stúpajúci trend. V zdroji Harmanec-Tunel nárast koncentrácií predstavuje 2,6 mg/l za obdobie 13 rokov (obr. 4). Nárast obsahov dusičnanov je evidentný najmä od roku 1986 v zdrojoch Čierno I, Čierno II, Malé Cenovo, Veľké Cenovo a Matanová. Zistené poznatky sú v súlade so zisteným nárastom obsahov dusičnanov v podzemných vodách Slovenska (Kulman, Vrana 1992). Významným zdrojom dusičnanového znečistenia sú splaškové vody a v posledných rokoch aj zrážky. Prekvapujúce sú vysoké obsahy dusičnanov u najvyššie položených zdrojov v Zalámanej doline (tab. 4), i keď sekundárny pôvod NO_3^- nie je jednoznačný. Vo vodách týchto zdrojov boli zistené aj tenzidy. Prítomnosť povrchovoaktívnych organických látok môže indikovať sekundárny pôvod dusičnanov (Hyánková et al. 1993).

Koncentrácie Cl^- v zdrojoch jergalskej vetvy sú nízke a vykazujú väčší alebo menší vzostupný trend. Najväčší nárast chloridov bol preukázaný v zdroji Podzemný tok a predstavuje 2,7 mg/l za obdobie 13 rokov (obr. 4). V zdrojoch harmaneckej vetvy majú chloridy výrazne stúpajúci trend. V zdroji Harmanec-Tunel nárast koncentrácuií Cl^- dosiahol 6,6 mg/l za 13 rokov (obr. 4). Nárast chloridov v tomto zdroji je zreteľný od roku 1987, pričom koncentrácie v období 1987 až 1990 neklesli pod 10 mg/l a v roku 1993 už presiahli 12 mg/l. V roku 1994 dochádza k určitému poklesu koncentrácií Cl^-. Na kolísanie obsahov Cl^- v podzemnej vode má vplyv aj rozdielne zastúpenie chloridov v dielčich zdrojoch tunela. Pri hydrogeochemickom hodnotení zdroja Harmanec-Tunel bolo zistené, že obsahy Cl^- v čiastkových zdrojoch vykazujú najväčšie rozdiely v porovnaní s inými ukazovateľmi chemického zloženia a menia sa pozdĺž tunela (tab. 7). Uvedené skutočnosti a poznatky o vyššom zastúpení Na^+ napovedajú o možnej kontaminácii vôd niektorých vývervov s NaCl. Zdrojom NaCl je pravdepodobne zimný posypový materiál. V zdrojoch Zalámaná I - III je tiež evidentný nárast chloridov v podzemnej vode, najmä v rokoch 1991 až 1993. V ostatných nižšie položených zdrojoch harmaneckej vetvy bolo zvyšovanie obsahov Cl^- zistené najmä od roku 1993.

Prítomnosť organických látok vo vodách vyjadrujú hodnoty $ChSK_{Mn}$, ktoré sú pomerne nízke. Vyššie hodnoty $ChSK_{Mn}$ sú v nižšie položených zdrojoch jergalskej vetvy a môžu byť ovplyvnené prepojením s povrchovým tokom (tab. 4). Vo vodách harmaneckej vetvy, vyššie hodnoty $ChSK_{Mn}$ v zdrojoch Zalámaná I - III korešpondujú so zvýšenými koncentráciami dusičnanov. Dlhodobé zmeny $ChSK_{Mn}$ bolo veľmi obtiažne hodnotiť vzhľadom na vysoký rozptyl nameraných hodnôt počas sledovaného obdobia vo všetkých zdrojoch. Priebeh $ChSK_{Mn}$ koreluje s mikrobiálnym znečistením a vykazuje najmä krátkodobé zmeny súvisiace so splachmí z terénu. Pri podrobnejšej analýze hodnôt je možné vidieť určité náznaky nárastu hodnôt $ChSK_{Mn}$ v určitých obdobiach. Napríklad v zdroji Starý mlyn je od roku 1991 badateľný nárast organického znečistenia v podzemnej vode. V zdroji Harmanec-Tunel je napriek veľkému kolísaniu hodnôt $ChSK_{Mn}$ evidentné, že po roku 1984 nastalo vyrovnanie stúpajúceho trendu, čo bolo sprevádzané aj zlepšením mikrobiologických ukazovateľov. V zdrojoch Zalámanej doliny sú hodnoty $ChSK_{Mn}$ vysoké, ale od roku 1991 bolo zaznamenané určité zlepšenie.

Z výsledkov jednorázového špeciálneho rozboru organických látok je zrejmé, že najvyššie obsahy tenzidov boli stanovené v zdrojoch Zalámaná II a Zalámaná III. Nepolárne extrahovateľné látky (NEL) dosahujú vyššie koncentrácie v zdrojoch Jergaly, Veľké Cenovo a Matanová a sú sprevádzané aj vyššími obsahmi humínových látok (tab. 8).

Sekundárne vplyvy sa na kvalite vôd zatiaľ neprejavili do tej miery, aby boli prekročené limity záväznej normy pre pitnú vodu. Podľa normy STN 75 7111 sledované zdroje majú vyhovujúcu kvalitu. Jediným problémom je mikrobiálne znečistenie vôd. Norma pre pitnú vodu vylučuje prítomnosť fekálnych koliformných baktérií, koliformných baktérií a enterokokov, ktoré indikujú fekálne znečistenie a sú nebezpečné pre ľudský organizmus. Pre hromadné zásobovanie je limit pre mezofilné baktérie 20 KTJ/ml a psychrofilné baktérie nesmú prekročiť hodnotu 200 KTJ/ml.

Vodné zdroje PSV	Tenzidy anionové (mg/l)	Fenoly (mg/l)	NEL (mg/l)	Humínové látky (mg/l)
Jergaly	0,01	0,001	0,038	1,27
Štubne	0,01	0,001	0,024	0,85
Čunderlík	0,01	0,001	0,013	0,76
Starý mlyn	0,01	0,001	0,024	0,85
Podzemný tok	0,02	0,000	0,016	0,85
Zalámaná I	0,02	0,00	0,012	0,68
Zalámaná II	0,03	0,00	0,013	1,36
Zalámaná III	0,04	0,00	0,026	1,02
Čierno II	0,01	0,00	0,010	0,68
Harmanec-Tunel	0,02	0,00	0,019	1,02
Matanová	0,02	0,00	0,044	1,48
Malé Cenovo	0,01	0,00	0,023	0,85
Čierno I	0,01	0,00	0,022	0,56
Veľké Cenovo	0,02	0,00	0,036	1,10

Tab. 8: Organické látky v podzemných vodách (nov. 1991)
Tab. 8: Organic chemicals in groundwater (nov. 1991)

V zdroji Jergaly voda nevyhovuje norme pre prítomnosť koliformných baktérií až v 68% vzoriek. Mikrobiálne znečistenie narastá v jarnom období a koreluje so zvýšenými obsahmi $ChSK_{Mn}$. Prienik znečistenia v období vysokých zrážok je typický pre krasový obeh a dokumentuje veľkú zraniteľnosť podzemných vôd. V ostatných zdrojoch jergalskej vetvy je početnosť prekročenia normy ešte vyššia.

V zdrojoch harmaneckej vetvy je voda z hľadiska mikrobiologických ukazovateľov kvalitnejšia. Koliformné baktérie boli prítomné v 36% vzoriek prevádzkovej kontroly zo zdroja Harmanec-Tunel, čo tiež pri porovnaní s Jergalmi poukazuje na lepšie podmienky pre ochranu v puklinovom prostredí. V zdrojoch Zalámaná I - III, Čierno II a Veľké Cenovo je percento prekročenia normy vyššie.

Vzhľadom na využívanie sledovaných zdrojov podzemných vôd pre hromadné zásobovanie pitnou vodou je časté prekračovanie normových limitov mikrobiologických ukazovateľov pomerne závažné. Samozrejme mikrobiálne znečistenie sa odstraňuje chlórovaním vody, ale v zdroji Jergaly koliformné baktérie ojedinele pretrvali aj po chlórovaní. Keďže voda z jednotlivých zdrojov je odvádzaná do skupinového vodovodu, počas transportu môže dochádzať k rozmnožovaniu baktérií.

Získané poznatky poukazujú na to, že ochrana kvality podzemných vôd puklinovo-krasových obehov je veľmi problematická. Vody tohto typu sú ohrozené predovšetkým možnosťou veľmi rýchleho prieniku znečistenia do systému, ako sa preukázalo aj v zdroji Jergaly pri sledovaní jarnej prietokovej vlny. V takomto prostredí sa pri prenose znečistenia uplatňuje predovšetkým konvektívny prenos. Ak je prostredie okolo puklín pôrovité, výrazný vplyv má molekulová difúzia. V prostredí s vyšším zastúpením ílových minerálov, prípadne pri vyššom zvetraní stien puklín sa môžu uplatniť aj sorpčné procesy, ktoré prispievajú k retardácii znečistenia.

Samočistiaca schopnosť podzemných vôd je však veľmi malá. Jednou z príčin je malá reaktívnosť vápencov, dolomitov, sadrovcov voči látkam vo vode. Ďalej karbonátové systémy majú silný tlmiaci účinok voči zmenám pH a tým aj stabilizačný vplyv na interakciu vôd s horninou. V karbonátových horninách je veľmi malé zastúpenie ílovitej frakcie a koloidných látok, ktoré majú veľký význam pri sorpcii znečistenia. V porovnaní s pôdami majú karbonáty veľmi malé mikrobiálne oživenie, čo limituje biodegradačné procesy. Infiltračná schopnosť prostredia je tiež veľmi slabá a doba zdržania vôd v systéme pomerne krátka (Hyánek 1991).

Všeobecne platí, že v puklinovo-krasovom a krasovom prostredí znečistenie môže byť prenášané do veľkých vzdialeností. K eliminácii organického a mikrobiálneho znečistenia môže dochádzať v zóne prevzdušnenia. Ak znečistenie prenikne na hladinu podzemnej vody, je pasívne unášané v smere jej prúdenia a počas transportu môže byť riedené. Stabilné anorganické zložky ako chloridy, sírany prechádzajú v plnom rozsahu do podzemnej vody. Prostredie puklinové viazané na jemne rozpukané dolomity je priaznivejšie, prienik

znečistenia nie je taký rýchly a je možnosť jeho zriedenia na obehových cestách.

Z vodárenského hľadiska je veľmi dôležitá pravidelná kontrola kvality podzemných vôd. Pravideľnosť a väčšia hustota kontroly vybraných ukazovateľov je dôležitejšia ako veľký rozsah sledovaných ukazovateľov. Nebezpečné sú hlavne krátkodobé zhoršenia kvality, ktoré počas prevádzkovej kontroly nemusia byť zaznamenané. Hustota kvality by mala byť minimálne jedenkrát mesačne, v obdobiach topenia snehu niektoré ukazovatele (EC, ChSK, mikrobiologické ukazovatele) častejšie.

ZÁVER

Pri vypracovaní základnej hydrogeochemickej charakteristiky podzemných vôd sa preukázala potreba klásť veľký dôraz na správnosť vstupných údajov, teda chemických analýz, ktoré je možné získať jedine priamym meraním pH, HCO_3^-, voľného CO_2 pri odbere vzoriek. Potvrdené to bolo aj experimentálne, kedy bolo zistené, že tieto ukazovatele podliehajú pomerne výrazným časovým zmenám pri mineralizáciách vôd 200 až 400 mg/l, čo sú typické hodnoty pre karbonátogénne vody.

Hodnotenie karbonátových rovnováh potvrdilo predpoklady o tom, že v podmienkach puklinovo-krasových až krasových obehov zväčša nedochádza k nasýteniu vôd voči karbonátom. K nasýteniu dochádza iba v podmienkach veľmi hlbokých alebo dlhých obehov a pri výraznej dotácii CO_2.

Z hľadiska ochrany zdrojov pred znečistením sú zaujímavé poznatky o režime kvality puklinovo-krasových vôd. Nebezpečné sú najmä krátkodobé zhoršenia kvality v období jarného topenia snehov, ktoré nemusia byť vôbec zistené. Tieto zmeny sú výraznejšie vo vodách pulinovo-krasových až krasových obehov, v podmienkch puklinových obehov dochádza k určitému tlmeniu.

V priebehu roka boli preukázané cyklické sezónne zmeny kvality podzemných vôd, ktoré súvisia s charakterom obehu. Sezónne zmeny je najvhodnejšie posudzovať na základe zastúpenia iónu HCO_3^- vo vodách.

Na základe hodnotenia dlhodobých zmien vybraných ukazovateľov chemického zloženia bolo preukázané, že primárne chemické zloženie vôd je stabilné. Z hľadiska sekundárne ovplyvnených ukazovateľov boli zistené stúpajúce trendy obsahov dusičnanov v podzemných vodách, čo je všeobecne pozorovaný jav na Slovensku. Ďalej bol dokumentovaný trend nárastu síranov vo vodách, predovšetkým v zdrojoch doliny Starohorského potoka. Taktiež bol preukázaný stúpajúci trend chloridov v podzemných vodách niektorých zdrojov, najmä v oblasti harmaneckej doliny. Tieto zmeny poukazujú na antropogénne vplyvy, ktoré sú podmienené existujúcimi zdrojmi znečistenia v území, ako je turistika, doprava, vykurovacie zariadenia, priemysel v Harmanci.

Objasnenie režimu kvality vôd v podmienkach puklinovo-krasových a krasových obehov má praktický význam najmä z vodohospodárskeho hľadiska. Podzemné vody viazané na karbonátové komplexy majú primárne veľmi dobrú kvalitu, ale sú pomerne zraniteľné. Vody puklinovo-krasových obehov sú ohrozené možnosťou veľmi rýchleho prieniku znečistenia do hydrogeologického systému v plnom rozsahu. Prostredie puklinové viazané na jemne rozpukané dolomity je priaznivejšie z hľadiska ochrany. Prienik znečistenia nie je taký rýchly a je možnosť jeho zriedenia na obehových cestách.

Získané poznatky majú význam aj pre vodohospodársku prax. Ukázalo sa, že analýzy prevádzkovej kontroly je možné okrem posúdenia aktuálneho stavu kvality vody využiť aj pri vyhodnotení režimu kvality vôd a riešení problémov ochrany vodných zdrojov.

LITERATÚRA

Appelo, C.A.J. - Postma, D. 1993: Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam, A.A.Balkema, 536s.

Fendeková, M. 1996: Human Impact on Groundwater Runoff Quantity in Karst Area (a case study). In: Karst Fractured Aqiufers - Vulnerability and Sustainability. Wydawnictwo Universitetu Slaskiego Katowice. s.57-64.

Fľaková, R. - Kubová, J. 1996: Vybrané stopové prvky v karbonátogénnych a sulfatogénnych vodách. In: Zborník zo seminára "Hydrogeochémia '96", Bratislava, Prírodovedecká fakulta UK, s.74-87.

Fľaková, R. 1995: Vplyv hydrogeologických pomerov na kvalitatívny režim podzemných vôd. In: Zborník zo "7. Konferencie mladých hydrológov", Bratislava, SHMÚ, s.185-191.
Gazda, S. 1974: Chemizmus podzemných vôd Západných Karpát a jeho genetická klasifikácia. Zborník 3. celoslovenskej konferencie. Bratislava, SGÚ.
Hyánek, Ľ. et al. 1991: Čistota vôd. Bratislava, Alfa. 262s.
Hyánková, K. - Fľaková, R. - Gulišová, D. - Ženišová, Z. 1993: Zmeny kvalitatívnych vlastností vôd puklinovo-krasových obehov v karbonátoch mezozoika. In: Zborník z vedeckej konferencie "Vodné zdroje a ich ochrana", Bratislava, STU, s.257-267.
Kullman, E. - Vrana, K. 1992: Dusičnany v krasovo-puklinových podzemných vodách - ekologické aspekty problematiky. In: Zborník prednášok zo sympózia "Využívanie podzemných vôd vo vzťahu k ekológii", Rajecké Teplice, SAH. s.159-170.
Kullman, E. - Vrana, K. 1991: Vzťah kvantitatívnych a kvalitatívnych parametrov podzemných vôd krasovo-puklinových obehov. Vodohospodársky časopis 39, č.3-4, s.293-304.
Kullman, E. 1990: Krasovo-puklinové vody. Bratislava, GÚDŠ, 184s.
STN 75 7111 Pitná voda. Vydavatelství norem Praha, 1991.
Némethy, P. 1994: Reconstruction works in the Harmanec summit tunnel. In: Slovak part of the 10TH COST'65 Management Commitee Meeting, Donovaly, s.22-32.
Némethy, P. 1996: Management of Griund Water Taking in Dependence on Climatic Cinditions. In: Karst Fractured Aqiufers - Vulnerability and Sustainability. Wydawnictwo Universitetu Slaskiego Katowice. s.162-167.
Stumm, W. 1992: Chemistry of the Solid-Water Interface. Proces at the Mineral-Water and Particle-Water Interface in Natural Systems. New York, John WileySons, Inc., 428s.
Vrana K. et al. 1989: Regionálno-hydrogeochemické zhodnotenie kvality snehovej pokrývky na území Slovenska. Západné Karpaty, séria hydrogeol. a inž. geol. 7. GÚDŠ Bratislava, s.87-128.
Ženišová, Z. - Hyánková, K. 1997: Hydrogeochémia - cvičenia. Vysokoškolské skriptá. Bratislava, Prírodovedecká fakulta UK.

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERISTIC OF KARST-FISSURE WATER OF SOUTH-EASTERN PART OF VEĽKÁ FATRA MOUNTAINS

RESUMÉ

Karst-fissure water, genetically related to the Mesozoic komplexes of carbonate minerals, is significant for the formation of drinking-water supplies in Slovakia. This water is important from the point of view of their high quality.

There were evaluated 13 significant drinking-water sources representing an important part of the water supply "Pohronský skupinový vodovod" in Central Slovakia (Fig. 1). These sources are built up from water of springs originating in the valley "Harmanecká dolina" and "Starohorský potok" valley in the mountain range "Veľká Fatra". As starting data were used chemical analyses of the process checking for the period from 1981 to 1994 (Tab. 1).

Basic hydrogeochemical characteristic was showed that observed sources represented the typical carbonatogenic water (Tab. 3)

Evaluation of carbonate equilibrium confirmed the assumption supposing that in conditions of the karst-fissure and karst circulation the water is not saturated with carbonate due to high speed of water flowing and short time of water detention in mineral environment. Low partial pressure of CO_2 ($0{,}56\ 10^{-3}$ - $2{,}39\ 10^{-3}$ MPa) shows its atmospheric and biochemical origin. As far as calcite and dolomite are concerned, investigated groundwater are unsaturated.

Based on obtained data investigated groundwater quality of karst-fissure and karst circulations was evaluated. Chemical composition of groundwater shows a typical composition in certain time of year.

Short-term changes of quality are significant in the spring time during snow-melting period and then during heavy summer rains. The consequence is impaired water quality because of organic and microbiological water pollution as well as lower mineralisation degree due to delution (Fig. 2).

During the year cyclic seasonal changes were determined. Ion HCO_3^- is the most suitable as when the water-quality is investigated and compared. Over the year HCO_3^- concentration has a sinusoid character (Fig. 3). Maximum concentration can be observed from April to June, minimun values from October to November.

During long-term changes of chemical composition investigation trends of some properties development were obtained as well as some secondary influences on water quality. The trend analysis showed stability in primary chemical composition of groundwater. Increasing amounts of nitrate concentrations were shown - it is a generally observed trend in Slovakia during the last years. In water sources in the "Starohorský potok" valley increasing amount of sulphates, in the valley "Harmanecká dolina" increasing amount of chlorides in underground water was detected (Fig. 4).

The necessity of regulary checking of at least some parameters (EC, COD, microbiological indices), especially in the spring snow-melting time was shown. The main problem of water quality remains often microbial pollution.

Obtained results concerning groundwater quality confirmed a specific role of karst-fissure water in water supplies of Slovakia and showed the continuously threatening danger of its pollution.