

Změny režimu a chemického složení podzemních vod v okolí termálního experimentu

The changes of flow and chemical composition of groundwater in the vicinity of the thermal experiment

LENKA RUKAVIČKOVÁ¹ – JAN HOLEČEK¹ – KAREL SOSNA²

¹ Česká geologická služba, Geologická 6, 152 00 Praha 5;

lenka.rukavickova@geology.cz

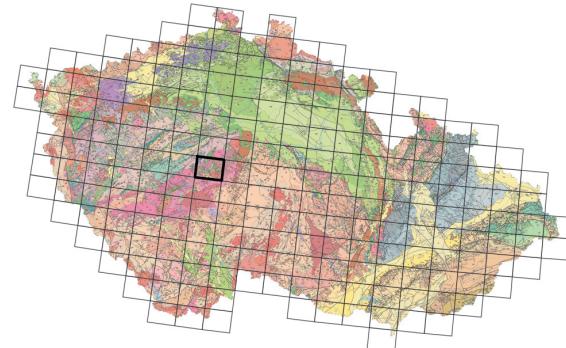
² ARCADIS CZ a.s., Geologická 4, 152 00 Praha 5

Key words: thermal experiment, groundwater regime, groundwater chemistry, Mokrsko, underground laboratory

Summary: A thermal heating experiment was carried out in hard rock massif approx. 100 m below the surface in the Underground Research Center Josef, Mokrsko – Central Bohemia. The rock around the large-diameter borehole (\varnothing 80 cm) was heated in cycles up to 90 °C and changes in stress, temperature, chemical composition and in outflow of groundwater were observed in adjacent network of monitoring boreholes. The rock occurring in place of the heating experiment is represented by tonalite of the Central Bohemian Pluton. During the long-term experiment lasting 2 years, samples of groundwater were collected and the intensity of seepage was measured in adjacent monitoring boreholes as well as in broader undisturbed area away of the heating experiment (Fig. 1).

The chemical type of seepage ground waters unaffected by the thermal experiment corresponds mostly to Ca-SO₄-HCO₃ or Ca-HCO₃-SO₄ (Fig. 2). The major cation in these ground waters is calcium, but sodium prevailed in waters collected shortly after the beginning of heating.

A man-made silica-based geopolymers was used as thermal-conductive sealing between the heater in central borehole and the surrounding rock. It was found by the leaching



(12-44 Týnec nad Sázavou)

tests that the geopolymers sealing influences the chemical composition of ground waters. Water in contact with the geopolymers loses calcium, and partly also magnesium, while sodium is dissolved and released from the geopolymers into groundwater. The rise of temperature during the thermal experiment accelerated the ion exchange on the geopolymers surface (Fig. 3).

It has also been proved that heating of the rock affected its hydraulic conductivity. The fractures parallel to the gallery face widen because of thermal relaxation of the rock mass into the space of the drift. The extension of fractures is accompanied by the increase of seepage into the adjacent boreholes (Fig. 4). Fractures perpendicular to the gallery face exhibit a decrease of hydraulic conductivity due to increased tension in the rock massif during the heating cycle.

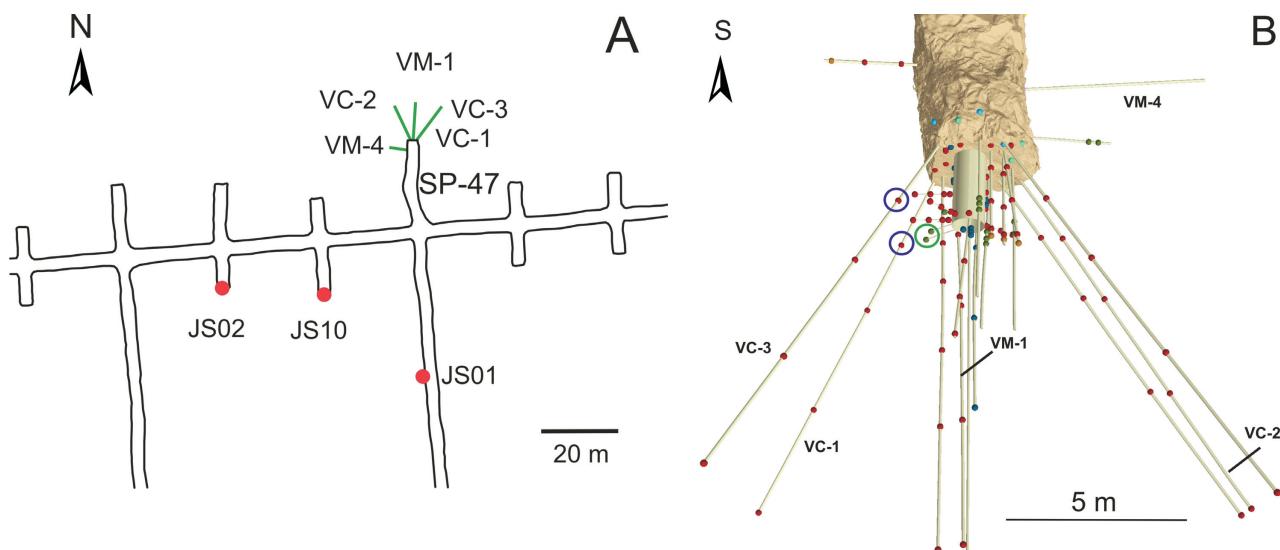
V podzemní laboratoři Josef na Mokrsku, v rozrážce SP-47, probíhal v letech 2012–2014 termální experiment zaměřený na zhodnocení možností akumulace tepelné energie v geologickém prostředí. Základem výzkumu bylo cyklické zahřívání a ochlazování horniny v centrálním vrtu a sledování reakce okolního horninového prostředí, režimu a chemického složení podzemních vod na změnu teploty. Experimentální pracoviště leží přibližně 100 m pod zemským povrchem v sázavském tonalitu, který je součástí středočeského plutonu. Změny v horninovém prostředí byly sledovány v síti monitorovacích vrtů v okolí širokoprofilového (\varnothing 80 cm) zahřívacího vrtu (obr. 1).

V průběhu experimentu byly v bezprostředním okolí experimentu s měsíčním intervalom odebrány vzorky podzemních vod ze tří monitorovacích vrtů a z jednoho přirozeného průsaku ve stěně. U dvou z těchto vrtů (VC-1 a VC-3) a u průsaku (JS07) byly současně kontinuálně sledovány vydatnosti přítoku podzemní vody do štolky. Vydatnost byla měřena pomocí nově vyvinutého experimentální-

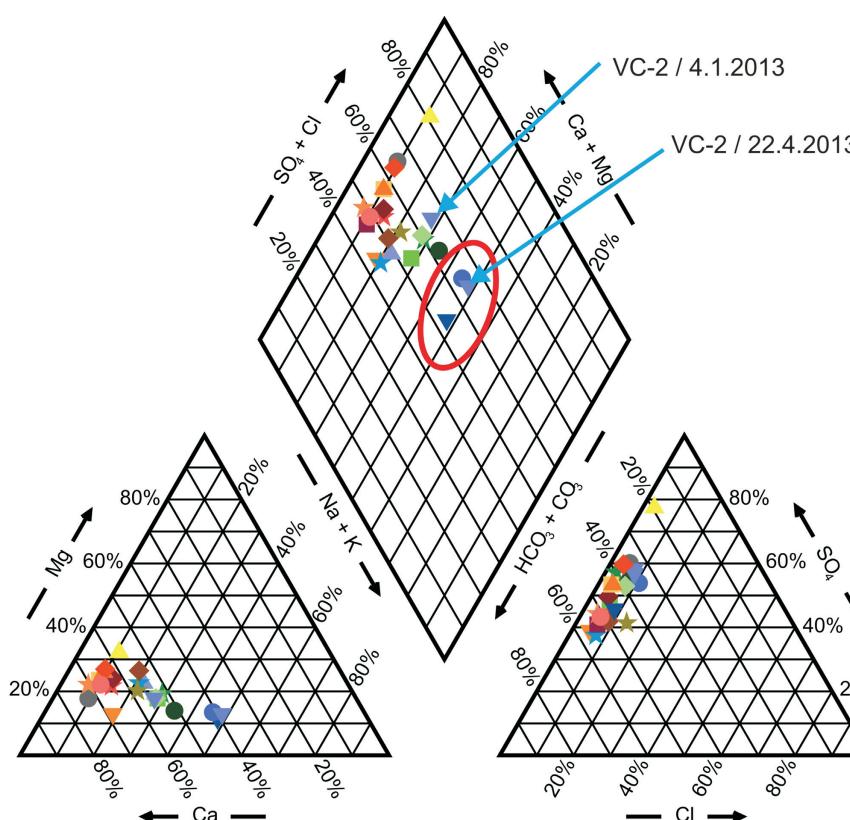
ho zařízení. Toto zařízení umožňující kontinuální záznam i velmi slabých průsaků ve formě kapek bylo v průběhu roku 2014 registrováno na ÚPV ČR jako užitný vzor č. 27120 (Holeček et al. 2014).

K odlišení přirozené změny chemického složení a režimu podzemních vod od změn způsobených ohřevem byly současně sledovány přítoky do štolky v širším okolí experimentu, srážkové úhrny a úrovně hladiny podzemní vody nad štolou. Chemické složení podzemních vod bylo monitorováno u celkem patnácti objektů (přítoky do štolky, výzkumné vryty, výtok z drenážního systému) v měsíčním intervalu, u odběru pozadí byl interval odběru do července 2013 jedenkrát za čtvrt roku. Kde to podmínky umožňovaly, bylo součástí odběru také manuální měření vydatnosti přítoku.

Jednorázově byly vzorkovány vody vyvěrající z pramenů nad výzkumnou štolou a některé vryty v okolí experimentu před jejich osazením měřicí technikou (VC-2, VM-1).



Obr. 1. A – pozice rozrážky SP-47 a monitorovaných vrtů (přítoků) v podzemní laboratoři. B – detail vrtné sítě a měřicích zařízení s vyznačením názvů monitorovaných a vzorkovaných vrtů. Kroužky označují čidla, jejichž záznam byl využit při vyhodnocení (○ – teplotní čidla, ○ – tlaková čidla) / Fig. 1. A – Position of the SP-47 adit and monitored boreholes (seepages) in the underground laboratory, B – Scheme of the position of boreholes and measuring sensors. Data from sensors marked by circle were used for evaluation (○ – temperature sensors, ○ – pressure sensors).



Obr. 2. Chemické složení podzemních vod ve štole Josef zobrazené na Piperové diagramu. Červený ovál – vrtý v bezprostředním okolí termálního experimentu / Fig. 2. Chemical composition of groundwaters in Josef adit presented in a Piper diagram. Red oval – boreholes close to the thermal experiment.

Výsledky a diskuse

Chemické složení podzemních vod

Podzemní vody vyvěrající ve štole Josef v oblasti Mokrsko-západ jsou středně mineralizované vody s celkovým obsahem rozpuštěných látek v rozmezí 330–550 mg·l⁻¹.

Vody mají zásaditý charakter s hodnotami pH v rozpětí 7,8–8,4. Z chemického hlediska patří neovlivněné podzemní vody převážně do smíšených typů Ca-SO₄-HCO₃ a Ca-HCO₃-SO₄ (obr. 2). Převládající podíl síranů se vyskytuje ve výtoku z drenáže z důlního díla Josef (JS12). Voda protékající drenážním systémem se v důlních chodbách obohacuje sírany díky oxidaci sulfidických minerálů

Tabulka 1. Obsahy hlavních iontů ve vodě z vrtu VM-4 (TDS – celková mineralizace) / Table 1. Chemical analysis of main ions in water from borehole VM-4 (TDS – total dissolved solids)

Na^+ mg.l ⁻¹	Mg^{2+} mg.l ⁻¹	K^+ mg.l ⁻¹	Ca^{2+} mg.l ⁻¹	Fe mg.l ⁻¹	$(\text{HCO}_3)^-$ mg.l ⁻¹	$(\text{NO}_3)^-$ mg.l ⁻¹	F^- mg.l ⁻¹	SiO_2 mg.l ⁻¹	$(\text{SO}_4)^{2-}$ mg.l ⁻¹	Cl^- mg.l ⁻¹	pH	TDS mg.l ⁻¹
27,5	16,3	1,6	68,0	2,4	198,3	< 0,10	1,7	10,3	106,3	15,0	8,1	447,4

Tabulka 2. Obsahy hlavních kationtů ve vodě po loužení * geopolyméru odebraného u topidla; ** geopolyméru připraveného v TU Liberec, C – poměr množství geopolyméru (g) k množství vody (ml) při loužicím pokusu / Table 2. Chemical analysis of major cations in water eluate of: * – geopolymers sampled from heated borehole, ** – geopolymers sample prepared by Technical University in Liberec, C – the ratio of amount of geopolymers (g) to water volume (ml) during leaching tests

	Na^+ (mg.l ⁻¹)	K^+ (mg.l ⁻¹)	Ca^{2+} (mg.l ⁻¹)	Mg^{2+} (mg.l ⁻¹)	C
VM-4 natural water	27,5	1,6	68,0	16,3	
extract after 30 days*	441,2	2250,3	0,7	0,2	1/10
extract after 24 hours*	69,4	215,4	10,4	11,5	1/100
extract after 24 hours **	431,7	3,3	8,1	4,3	1/100

přítomných v hornině. Tato voda má současně i vyšší mineralizaci, 550–650 mg.l⁻¹. Mezi kationty většiny vzorkovaných vod převažuje vápník, mírně zvýšený relativní obsah sodíku je u průsaků JS10, JS02, prvního odběru z vrtu VC-2 a u vrtu VM-1.

Složení podzemní vody vyvěrající nad štolou z povrchových pramenů na svazích Veselého vrchu a Čihadla je srovnatelné s hlediskem obsahu hlavních iontů (obr. 2, PM01 až PM05) s výtoky ve štole. Také celková mineralizace, která se u pramenů pohybuje mezi 400–550 mg.l⁻¹ je obdobná. Shodné chemické složení mělkých podzemních vod a vod v hlubší části puklinového prostředí je pro oblast krystalinika netypické. Lze předpokládat, že v oblasti Mokrska k hlavnímu obohacení podzemních vod minerálními látkami dochází již v oxidační zóně zvětralinového pláště.

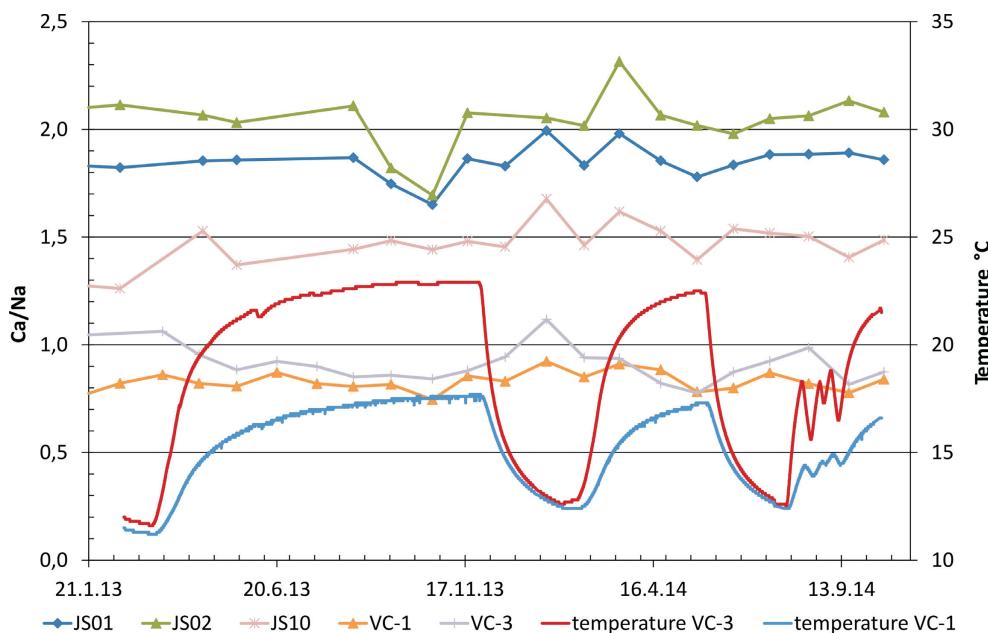
Odlišné složení podzemních vod bylo zaznamenáno u výtoku z vrtů VC-1 a VC-3 a druhého odběru z vrtu VC-2. Podzemní voda je typu Na-Ca-SO₄ a smíšených typů Na-Ca-HCO₃-SO₄ a Na-Ca-SO₄-HCO₃. Oproti běžným podzemním vodám v oblasti Mokrska-západu mají vody z vrtů zvýšené obsahy sodíku. Sodík převažuje mezi kationty v poměrném zastoupení. Také absolutní hodnoty obsahu sodíku jsou u těchto vod nejvyšší ze všech monitorovaných průsaků. Jde o vrtu přímo ovlivněné termálním experimentem. Maximální nárůst teploty ve vrtu VC-1 (snímač umístěný 2 m od ústí vrtu, obr. 1) byl 6,5 °C, u vrtu VC-3 11,3 °C.

Prokazatelně vyšší obsahy sodíku a naopak nižší obsahy vápníku u vod z vrtů VC-1 a VC-3 nemohly být způsobeny interakcí s horninovým prostředím nebo přirozenými variacemi režimu vod. Změnu chemického složení vod ovlivnil experiment, o čemž svědčilo i rozdílné složení vody z vrtu VC-2 odebrané před zahříváním a v jeho průběhu. Zvýšení teploty do 12 °C současně nemohlo způsobit tak výrazné rozpouštění sodíku z okolní horniny nebo z puklinových výplní. Výzkum se proto v roce 2014 zaměřil na testování vlastností geopolyméru, který byl použit jako těsnící hmota mezi topidlem a stěnou centrálního vrtu. Při instalaci byl geopolymér v tekutém stavu a existovala mož-

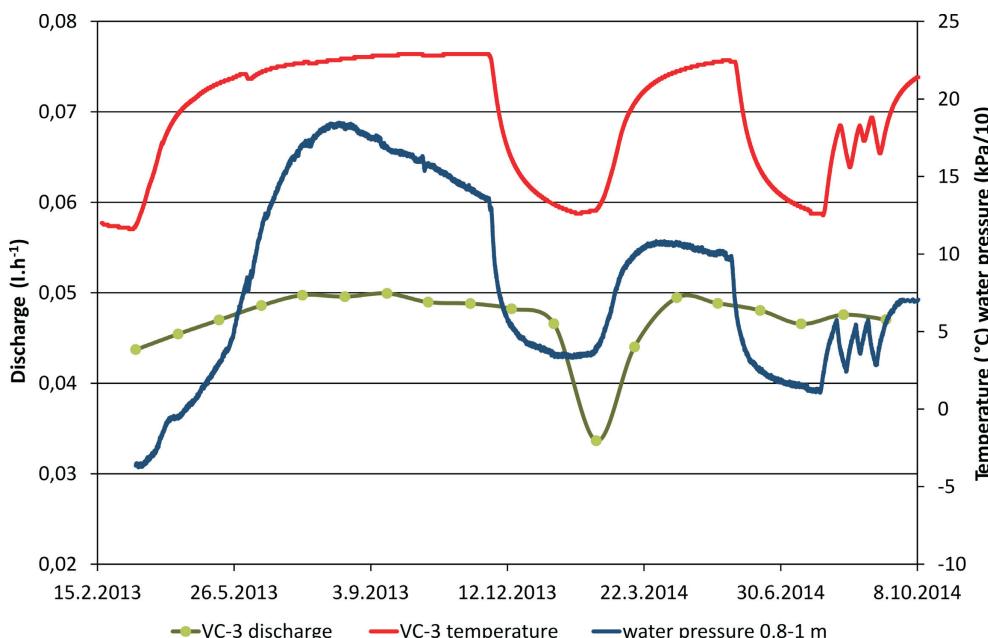
nost jeho proniknutí do puklinové sítě v okolí centrálního vrtu.

Byly provedeny celkem tři jednoduché loužicí pokusy, pro všechny byla použita neovlivněná podzemní voda z blízkého vrtu VM-4 (tab. 1). Při loužicím pokusu bylo do kádinky odváženo určité množství geopolyméru a zalito vodou z vrtu VM-4. Poměry hmotnosti geopolyméru k objemu vody v kádince spolu s délkou trvání pokusu pro jednotlivé pokusy uváděny jsou v tab. 2. Po ukončení loužení byl odebrán vzorek vody pro chemickou analýzu kationtů. U prvních dvou pokusů bylo pro loužení použito malé množství geopolyméru odebrané při výměně snímače v těsném okolí topidla. Při třetím z pokusů byl loužen geopolymér připravený v laboratořích Technické univerzity v Liberci. Chemické složení výluh z loužicích pokusů obsahuje tab. 2. Výsledky ukazují, že na geopolymér se silně sorbuje vápník, také koncentrace Mg ve vodě se působením geopolyméru výrazně snížila. Naopak mnohonásobně vzrostla koncentrace sodíku, ve dvou případech se jeho obsah zvýšil 15×, v jednom zhruba 2,5×. Ve vodním výluhu se vzorkem geopolyméru odebraného z okolí topidla vzrostla výrazně koncentrace draslíku, v případě 30deního loužicího pokusu dokonce více než tisícinásobně.

Sorpcí vápníku na geopolyméru současně s rozpouštěním sodíku, původně vázaného na geopolymér, je možné vysvětlit posun v poměru Ca/Na ve vodách z vrtů v bezprostředním okolí experimentu. Na obr. 3 je zachycen vývoj poměru Ca/Na ve výtocích z vrtů VC-1 a VC-3 spolu s chemicky nejbližšími průsaky reprezentujícími přirozené pozadí. V grafu je současně vynesena teplota měřená teplotním snímačem 2 m od ústí vrtu (obr. 1). Při prvním zahřívacím cyklu v roce 2013 je prokazatelný pokles poměru Ca/Na u vrtu VC-3, který velmi dobře koreluje se zvýšenou teplotou ve vrtu. Zvýšená teplota urychluje iontovou výměnu na geopolyméru. Vývoj poměru Ca/Na u monitorovaných průsaků v pozadí experimentu je jiný, nejde o náhodný souběh přirozeného trendu a zvýšení teploty. U vody vytékající z vrtu VC-1 se výrazný pokles poměru Ca/Na v průběhu zahřívání neprojevil. Maximální nárůst



Obr. 3. Časový vývoj poměru Ca/Na (počítáno v mmol.l^{-1}) ve vodách z vrtů VC-1, VC-3 a z chemicky blízkých průsaků v jejich okolí / Fig. 3. Time trends in Ca/Na ratio (in mmol.l^{-1}) in waters from boreholes VC-1, VC-3 and adjacent seepages in the vicinity of the thermal experiment.



Obr. 4. Časový průběh vydatnosti výtoku z vrtu VC-3 (průměrné měsíční průtoky), teploty ve vrtu VC-3 a hydrostatického tlaku ve vzdálenosti cca 1 m od zahřívacího vrtu / Fig. 4. Time trends in groundwater discharge (monthly averages, borehole VC-3), temperature in borehole VC-3 and hydrostatic pressure at ca. 1 m distance from the wall of the heated borehole.

teploty ve vrtu VC-1 je poloviční ve srovnání s vrtom VC-3 a současně je jeho vydatnost přibližně $20\times$ vyšší než u VC-3. Při vyšší vydatnosti vrtu a rychlejším oběhu vody v něm je vliv sorpce a obohacení vody o minerální látky méně patrný.

Překvapivé bylo extrémní zvýšení obsahu draslíku ve výluhu z geopolymantu odebraného v těsné blízkosti topidla. Při loužicím pokusu s geopolymantem, který nebyl ve styku s topidlem, se obsah draslíku ve vodě zvýšil jen minimálně. Zvýšené obsahy draslíku se ve vodách v okolí experimentu nevyskytují, jeho vysoké koncentrace ve výluhu jsou proto obtížně vysvětlitelné. Předpokládáme, že v průběhu zahřívání došlo na kontaktu topidla a geopolymantu díky zvýšenému odparu k vysrážení draselných solí, které se následně při laboratorních vyluhovacích experimentech opětovně rozpouštěly. Další vzorky geopolymantu z růz-

ných částí zahřívacího vrtu nebylo možné bez narušení experimentu odebrat.

Režim podzemních vod

U většiny průsaků v neovlivněném širším okolí experimentu se projevila poměrně rychlá tlaková odezva na vysoké srážkové úhrny při povodních na přelomu května a června 2013. Výtoky kulminovaly v srpnu, popř. září 2013. U přítoku s vyšší vydatností a výtoku z drenážního systému se tlakové projevily také vyšší srážkové úhrny v druhé polovině května 2014 a v červenci 2014. Naopak režim průsaků s nízkou vydatností ve formě kapek nemá na srážky přímou návaznost nebo byla celková doba monitoringu (27 měsíců) pro její určení příliš krátká.

U vydatnosti průsaku z vrtu VC-3 byl zaznamenán zřetelný vliv zahřívacího procesu (obr. 4). Po zahájení prvního zahřívacího cyklu a v průběhu výrazného zvýšení teploty ve vrtu vydatnost výtoku pomalu stoupala až do července 2013. Poté začala vydatnost stagnovat a pomalu klesat, přestože ve vrtu stále ještě pomalu vzrůstala teplota. Výrazný pokles vydatnosti nastal po ochlazení. Podobná reakce byla zaznamenána i při druhém zahřívacím cyklu v roce 2014.

Do grafu na obr. 4 byl zahrnut i hydrostatický tlak měřený ve vzdálenosti přibližně 1 m od stěny centrálního vrtu. Vývoj hydrostatického tlaku, vydatnost vrtu VC-3 a jejich reakce na zvýšení teploty jsou obdobné – poměrně rychlý nárůst tlaku a vydatnosti v počáteční fázi rychlého zvýšení teploty horniny je následován pomalým poklesem tlaku i vydatnosti ve fázi, kdy teplota horniny roste již jen pozvolna. Pokles tlaku i vydatnosti nastává se zpožděním po změně rychlosti nárůstu teploty horniny. Toto zpoždění je u vydatnosti vyšší. Livil zahřívání na režim vrtu VC-1 prokazatelný nebyl.

Pukliny v centrálním vrtu se rozevíraly během ohřívání horniny a svíraly při následném ochlazení masivu. Většina z těchto puklin byla kolmá na osu vrtu (rovnoběžná s čelbou). U šikmé puklin byl zaznamenán velmi mírný nárůst rozevření v průběhu zahřívání a prudký nárůst rozevření na začátku chlazení horniny. Vydatnost průsaku z vrtu VC-3 je v souladu s rozevíráním puklin rovnoběžných s čelbou, které je způsobeno tepelným rozpínáním masivu směrem do volného prostoru v rozrážce. Tvar křivky vydatnosti také odpovídá poznatku, že rozevření puklin probíhalo zejména na začátku (v průběhu prvního měsíce zahřívání) a po kvaziustálení teploty se pukliny zvolna svíraly zpět.

Významné pukliny ve vrtu VC-1 zjištěné karotážním měřením akustickým televizorem (Franěk et al. 2013) v úvodní části vrtu jsou vůči čelbě orientovány šikmo. Reakce šikmých puklin na zahřívání a ochlazování je, jak ukázala měření deformací na puklinách, nejednoznačná.

Závěr

Z uvedených výsledků vyplývá, že chemické složení podzemních vod i hydraulické vlastnosti hornin a s nimi spojený režim podzemních vod byly ovlivněny termálním experimentem. Livil termálního experimentu je významný

pouze v bezprostředním okolí experimentu do vzdálenosti několika metrů. Chemické složení podzemních vod ovlivnila zejména přítomnost geopolymantu v horninovém prostředí. Na kontaktu s geopolymantu dochází k iontové výměně kationtů, z vod je sorbovaná zejména vápník a menší míra i hořčík a naopak z geopolymantu se do vod rozpouští sodík a v menší míře draslík. Na rychlosť výměny iontů na geopolymantu měla pozitivní vliv zvýšená teplota v experimentu. V průběhu zahřívací fáze klesl znatelně podíl Ca/Na ve vodách prosakujících z vrtu VC-3.

Změny hydraulických vlastností puklinové sítě v okolí experimentu závisely zejména na orientaci pukliny v prostoru. U puklin rovnoběžných s čelbou docházelo v průběhu zahřívání k jejich rozevírání, způsobenému tepelným rozpínáním masivu směrem do volného prostoru v rozrážce. Rozevírání puklin doprovázelo nárůst hydraulické vodivosti a přítoků do vrtu. Toto zvýšení bylo největší v počáteční fázi zahřívání, kdy byl nejvyšší nárůst teploty. V období zpomalení nárůstu teploty v centrálním vrtu se pukliny začaly opět pomalu svírat a mírně klesala i monitorovaná vydatnost vrtu VC-3. U puklin prakticky kolmých na čelbu byl pozorovaný pokles hydraulické vodivosti při zahřátí horniny (Franěk et al. 2015), pukliny se svíraly livilem zvýšeného napětí v hornině. Šikmé pukliny představovaly přechod mezi výše uvedenými krajními stavami.

Poděkování. Výsledky prezentované v tomto článku vznikly v rámci projektu FR-TI 3/325 realizovaného za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu. Autoři děkují za cenné připomínky J. Schröflové a recenzentům.

Literatura

- FRANĚK, J. – BUKOVSKÁ, Z. – ŠVAGERA, O., ed. (2015): Výzkum termální zátěže hornin – perspektivy podzemního skladování tepelné energie. Souhrn řešení projektu FR-TI3/325. – MS Čes. geol. služba. Praha.
- FRANĚK, J. – VONDROVIC, L. – DOLÁKOVÁ, E., ed. (2013): Výzkum termální zátěže hornin – perspektivy podzemního skladování tepelné energie, Etapa III – dílčí výsledky terénního výzkumu. – MS Čes. geol. služba. Praha.
- HOLEČEK, J. – RUKAVIČKOVÁ, L. – ZÁRUBA, J. – BROŽ, M. – ČERNÍK, M. – VANĚČEK, M. (2014): Zařízení pro měření průsaků vody, zejména do podzemních děl. Užitný vzor č. 27120. – Úřad průmyslového vlastnictví ČR. Praha.