

Podzemní vody hluboké struktury regionálního rozsahu: Pasohlávky – Laa an der Thaya

Groundwater of deep regional aquifer system: Pasohlávky – Laa an der Thaya

Kateřina Chroustová¹ ✉, Adam Říčka¹, Bibiána Pasternáková¹, Tomáš Kuchovský¹,
Vladimír Opletal², Slavomír Nehyba¹, Magdalena Bottig³

¹ Ústav geologických věd PŘF MU, Kotlářská 267/2, 611 37 Brno, Česká republika

² MND a.s., Úprkova 807/6, 695 01, Hodonín, Česká republika

³ Geologische Bundesanstalt / Geological Survey of Austria, Neulinggasse 38, 1030 Vídeň, Rakousko

Key words:

deep aquifer, groundwater flow pattern, mineral water, thermal water, South Moravia, Lower Austria

✉ 436416@mail.muni.cz

Editor:

Marek Slobodník

Abstract

The regions of South Moravia in Czech Republic and Lower Austria are well-known for their use of thermal mineral waters for balneological purposes. Mineral waters are exploited from a Jurassic aquifer by two about 1.5 km deep wells MUS-3G (Pasohlávky, Czech Republic) and Laa TH Nord 1 (Laa an der Thaya, Austria). This Jurassic aquifer buried below the Neogene foredeep overlies a crystalline basement of Bohemian Massif and continues to the southeast below the Western Carpathians. Jurassic sediments which are mainly composed of autochthonous carbonates increase their thickness in this direction due to the decline of the crystalline basement. Because of this decline, there are two developments of Jurassic sediments, the shallower on the northwest and the deeper on the southeast. The zone between these two developments is known as the Mušov transition zone. For sustainable mineral water resources development, a groundwater flow pattern and recharge are evaluated. This evaluation includes both the hydrogeologic structure of Jurassic carbonates and hydraulically continuous underlying and overlying rocks. Because of the considerable depth of this hydrogeologic structure, which ranges from 100 to 3 000 metres below sea level, this study was based mostly on archive reports related to deep wells at the study area. The extent of studied units was identified on well-log data and geophysical survey interpretation. The resulting groundwater level contour map is based on the spatial distribution of hydraulic heads ranging approx. from 180 to 220 metres above sea level (masl) that were derived from pressure and water density conditions at the Jurassic aquifer. The general direction of groundwater flow is from northwest and southeast to the drainage zone (hydraulic head approx. 170–190 masl) identified in the middle of the studied area, which is identical to a course of the Mušov transition zone and parallel to the course of Dyje river (water table 170–180 masl). The northwestern part of the studied hydrogeological structure also differs from the southeastern part in a lower total mineralization which indicates active inflow of fresh water. The study was also enhanced by a spatial distribution of hydraulic parameters of all modelled units. These parameters were derived from hydrodynamic tests. The hydraulic conductivity values for the major Jurassic aquifer range from 6.0×10^{-4} to 1.3×10^{-9} m/s. The occurrence of the higher hydraulic conductivity near the drainage zone indicates the presence of a well-developed drainage network.

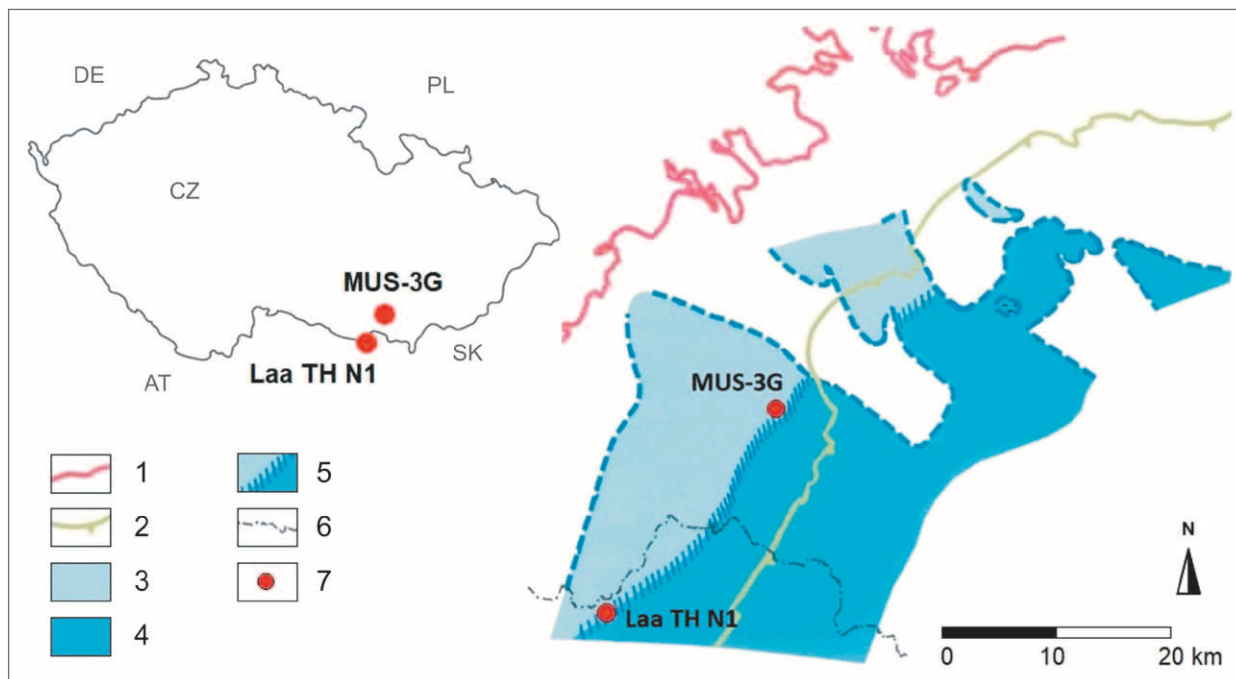
Doporučená citace článku:

Chroustová, K., Říčka, A., Pasternáková, B., Kuchovský, T., Opletal, V., Nehyba, S., Bottig, M. (2022): Podzemní vody hluboké struktury regionálního rozsahu: Pasohlávky – Laa an der Thaya. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 29, 1–2, 36–43.

DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2022-15517>

Úvod

V okolí jihomoravské obce Pasohlávky a rakouského města Laa an der Thaya dochází k čerpání termálních minerálních vod pro lázeňské účely z prostředí karbonátů jurského stáří vyskytujících se v hloubkách přesahujících 1 km. I přes dlouhodobé využívání této hydrogeologické struktury nebyl doposud objasněn původ a režim jímaných vod. To bylo jedním z cílů projektu Interreg HTPO



Obr. 1: Rozšíření jurských sedimentů s lokalizací hlubokých vrtů využívaných k jímání termálních minerálních vod (Adámek 2005, upraveno). Legenda: 1 – povrchová hranice českého masivu, 2 – čelo příkrovů Vnějších Západních Karpat, 3 – mělký karbonátový vývoj, 4 – hluboký peliticko-karbonátový vývoj, 5 – mušovská přechodová zóna, 6 – státní hranice, 7 – lokalizace čerpaných vrtů. Fig. 1: Distribution of Jurassic sediments with the location of deep wells used for thermal mineral waters extraction (Adámek 2005, modified). Legend: 1 – surface border of the Czech Massif, 2 – Outer Western Carpathian thrust front, 3 – shallow carbonate development, 4 – deep pelitic-carbonate development, 5 – Mušov transition zone, 6 – state border, 7 – localization of pumped wells.

(Hydrotermální potenciál oblasti, ATCZ167). Záměrem této studie je shrnutí dostupných informací o hydrogeologické struktuře jurských karbonátů a okolních hydraulicky spojených hornin za účelem charakterizování hydrogeologických poměrů v kolektoru a identifikování základních směrů proudění podzemních vod.

Lokalizace a přírodní poměry

Termální minerální vody jsou jímány dvěma vrty, a to vrtem MUS-3G hlubokým 1 455 m (N 48°54'17,811" E 16°34'35,031"), který se nachází u obce Pasohlávky v Jihomoravském kraji a vrtem Laa TH N1 hlubokým 1 448 m (N 48°43'53,7421" E 16°23'22,2877") nacházejícím se ve městě Laa an der Thaya v Dolním Rakousku (obr. 1). Jímané vody jsou vázány na prostředí jurských sedimentů, které v hodnocené oblasti spočívají z velké části bezprostředně na krystalinickém podloží Českého masivu (Kolářová 1991). Faciální vývoj jurských sedimentů lze rozdělit na dva sedimentační cykly: střední, budovaný zejména klastickými sedimenty a svrchní, který se dále rozčleňuje na dva vývoje, které vznikly z důvodu upadajícího reliéfu krystalinického podloží směrem k jihovýchodu. Na severozápadě se tak nachází vývoj mělký – karbonátový, budovaný především vápenci a dolomity, ze kterého se čerpají termální minerální vody o teplotě přibližně 42 °C. Směrem k jihovýchodu, tedy směrem do zahlubující se pánve, se pak usazovaly, kromě karbonátů, také horniny pelitické a vývoj je tak označován jako hluboký, peliticko-karbonátový (Adámek 1986). Přechod těchto dvou vývojů, respektive jejich jednotlivých litostratigrafických členů

označil Adámek (1974 in Adámek 1977) jako takzvanou mušovskou přechodovou zónu (obr. 1).

V nadloží jurských karbonátů spočívají neogenní sedimenty jižní části karpatské předhlubně, která pokračuje dále na jih do molasové zóny Rakouska (Brzobohatý a Cicha 1993). Mocnost výplně předhlubně, tvořené naprosto převažujícím komplexem pelitických, psamitických a psefitických uloženin, narůstá směrem k jihovýchodu (Franzová 1986). Komplexy jurských uloženin jsou postiženy zlomy poklesového charakteru probíhajícími ve směru JZ–SV (Adámek 2005).

Metodika

Pro získání představy o základních hydrogeologických poměrech bylo využito zejména archivní vrtné dokumentace uložené v archivu Geofondu České geologické služby (tab. 1, e-appx. 1) k dostatečně hlubokým vrtům situovaným v zájmové oblasti. Tyto archivní zprávy pocházejí z 50. až 90. let minulého století, pouze informace k jímacím vrtům MUS-3G (Kocman 2020) a Laa TH N1 (GBA – Rakouská geologická služba) jsou z let 2010 až 2019. K objasnění hydraulických výšek v západní části zájmové oblasti byly využity údaje jak z vrtů Borotice (HV604a) a Slup, pozorovaných Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ), z let 2010 až 2019, tak údaje z archivních zpráv vrtů PMK1, PMK2, PMK6, PMK7, PMK8 a HV604 uložených v Geofondu (archivu ČGS) a archivu Moravských naftových dolů (MND). Rozsahy hodnocených hydrostratigrafických jednotek (litolicky blízké jednotky s podobnými hydraulickými charakteristikami) byly stanoveny na základě interpretace geofyzikálních

Tab. 1: Typ a zdroj vstupních dat k určení hydraulických výšek (přímé pozorování P/ záměr tlaku T).

Tab. 1: Type and the source of the input data for hydraulic heads determination (direct observation P/ pressure measurement T).

vrt	S-JTSK (Krovak East North)		přímé pozorování (P)/ záměr tlaku (T)	zdroj dat
	X	Y		
MUS-1	-602052,60	-1191054,90	T	Geofond (P023792/1)
MUS-2	-601660,00	-1194285,90	T	Geofond (P025048)
MUS-3G	-603933,11	-1192582,87	P	Kocman (2020)
PAS-2G	-606511,06	-1192243,65	T	Fendek and Remšík (1995)
BREZ-1	-607411,10	-1200890,90	T	MND
BREZ-2	-606092,46	-1203362,08	T	MND
NP-4	-609119,33	-1202478,48	T	Kostelníček (1988a)
NP-5	-610597,25	-1202545,36	T	Kostelníček (1988b)
DUN-9	-599846,10	-1195144,00	T	MND
HY-1	-616035,30	-1199710,30	T	Čížek (1963)
Borotice (HV604a)	-627536,00	-1194007,00	P	ČHMÚ
Slup	-633156,00	-1204502,00	P	ČHMÚ
PMK1	-620572,60	-1183355,50	P	ČGS (Geofond)
PMK2	-619631,60	-1183780,20	P	ČGS (Geofond)
PMK6	-616037,00	-1179554,00	P	ČGS (Geofond)
PMK7	-617052,00	-1179130,40	P	ČGS (Geofond)
PMK8	-610687,70	-1178443,60	P	ČGS (Geofond)
HV604	-627909,20	-1193688,20	P	ČGS (Geofond)
Laa TH N1	-619677,29	-1210246,91	P	GBA (Rakouská geologická služba)
Altenmarkt 1	-633112,55	-1225291,66	T	OMV
Altprerau 1	-613804,64	-1203769,90	T	OMV
Altprerau 2	-610772,35	-1204192,83	T	OMV
Altprerau 5	-611673,65	-1204816,39	T	OMV
Dürnleis 1	-633193,67	-1219350,42	T	OMV
Gross-Harras 1	-630200,31	-1214980,32	T	OMV
Hagenberg 1	-618242,85	-1221260,68	T	OMV
Staatz 1	-614043,52	-1216036,29	T	OMV
Stronegg 1	-627365,64	-1222632,51	T	OMV
Wildendurnbach K2	-614257,52	-1207116,14	T	OMV
Wildendurnbach K4	-610981,24	-1209809,59	T	OMV

a karotážních údajů. 3-D geologický model byl sestaven v programu Groundwater Modeling System (Aquaveo).

Hydraulické výšky

Schéma proudění podzemních vod bylo odvozeno z přímého měření hladiny na 10 vrtech a z archivních měření statického tlaku v místě perforace či na ústí 20 vrtů (tab. 1). Podzemní vody zájmového kolektoru se značně liší svojí hustotou, která byla stanovena programem Pan-System (Weatherford). To je dáno odlišnými tlakovými poměry a rozdíly v jejich teplotě a mineralizaci. Z tohoto důvodu byly naměřené tlaky přepočteny nejprve podle rovnice 1 na hydraulické výšky tzv. „fresh water heads“ ($h_{f,i}$) a následně podle rovnice 2 na hydraulické výšky tzv. „corresponding fresh water heads“ ($h_{f,r}$). Tento postup publikovaný Postem et al. (2007) je založen na použití uniformní hustoty vody ρ_f (kg/m^3) a společné srovnávací úrovně z_r (m).

$$h_{f,i} = \frac{\rho_i}{\rho_f} h_i - \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} z_i \quad (1)$$

kde $h_{f,i}$ je hydraulická výška na vrtu, tzv. „fresh water head“ (m), ρ_i je hustota vody ve vrtu v bodě měření – záměru (kg/m^3), ρ_f je uniformní hustota vody (kg/m^3), h_i je hydraulická výška odvozená pro daný vrt bez uvažování

rozdílných hustot vody ve zvodni (m) a z_i (m) je výšková poloha bodu měření (bod záměru).

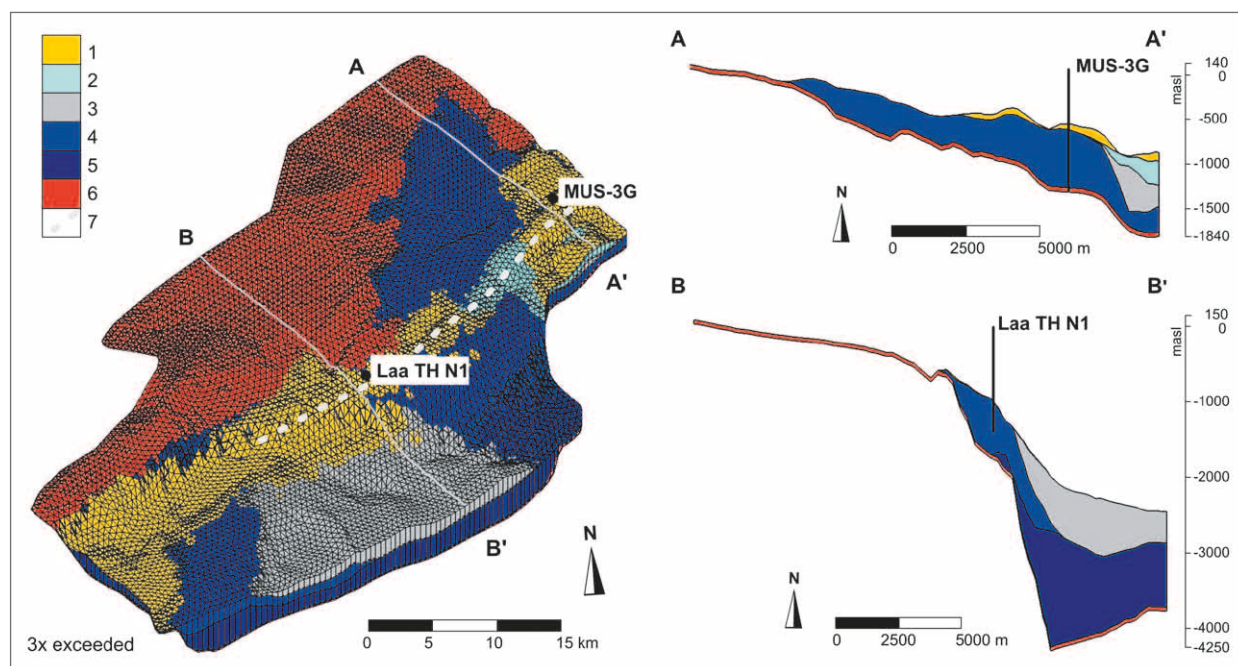
$$h_{f,r} = z_r + \frac{\rho_i}{\rho_f} (h_i - z_i) - \frac{\rho_a}{\rho_f} (z_r - z_i) \quad (2)$$

kde $h_{f,r}$ je hydraulická výška ve zvodni s rozdílnými hustotami vody (m), z_r je hloubka srovnávací úrovně (m) a ρ_a je průměrná hustota vody (kg/m^3) mezi bodem záměru z_i a srovnávací úrovní z_r (m).

Hydraulické vodivosti

Hydraulické vodivosti zájmových jednotek byly odvozeny jak vyhodnocením archivních záznamů hydrodynamických zkoušek provedených na dvaceti vrtech, tak převzaty z archivních zpráv (e-appx. 1). Seznam vrtů společně s metodikou využitou k odvození hydraulických vodivostí je rovněž součástí elektronické přílohy (e-appx. 1). V archivních záznamech je k vrtům uveden pouze záznam tlaků či hladin pozorovaných během čerpacího pokusu či odběru vod s pozorováním následného nástupu. Samotné vyhodnocení testu, ve smyslu stanovení hodnoty hydraulické vodivosti, chybí.

Podle Thiema (1906) byly vyhodnoceny čerpací zkoušky provedené v režimu ustáleného proudění (rovnice 3), přičemž čerpané množství bylo stanoveno podle



Obr. 2: Trojrozměrný geologický model hluboké hydrogeologické struktury s řezy AA' a BB' (3× převýšeno). Legenda: 1 – sedimenty karpatské předhlubně (spodní miocén), 2 – kurdějovské vápence (svrchní jura), 3 – mikulovské slínovce (svrchní jura), 4 – sedimenty svrchní jury (karbonáty), 5 – sedimenty střední jury (klastické sedimenty, karbonáty), 6 – podložní jednotky Českého masivu, 7 – mušovská přechodová zóna.

Fig. 2: Three-dimensional geological model of the deep hydrogeological structure with the cross-sections AA' and BB' (3× exceeded). Legend: 1 – Carpathian foredeep sediments (Lower Miocene), 2 – Kurdějov limestones (Upper Jurassic), 3 – Mikulov Marls (Upper Jurassic), 4 – Upper Jurassic sediments (carbonates), 5 – Middle Jurassic sediments (clastic rocks, carbonates), 6 – basement rocks of Bohemian Massif, 7 – Mušov transition zone.

průměrů trysek, ložiskových statických a dynamických tlaků na ústí v programu Pipe Flow “Nozzle and Venturi nozzle flow calculator“ (Pipeflowcalculations.com 2020). Program umožňuje na základě zmíněných vstupních dat určit hodnotu čerpaného množství, a to v případě, že se jedná o jednofázovou tekutinu a průtok přes trysky je v čase neměnný. Poloměr depresního kuželu R byl určen rovnicí podle Sichardta (Kyrieleis, Sichardt 1930).

$$K = \frac{Q}{2\pi M s_w} \ln \frac{R}{r_w} \quad (3)$$

kde K je hydraulická vodivost (m/s), Q je čerpané množství (m^3/s), M je mocnost zvodně, resp. testovaného intervalu (m), s_w je snížení hladiny ve vrtu (m), R je poloměr depresního kuželu (m) a r_w je poloměr čerpaného vrtu (m).

Cooper-Jacobovou metodou přímkové aproximace (Cooper a Jacob 1946) byly vyhodnoceny stoupací zkoušky (rovnice 4).

$$K = \frac{T}{M} = \frac{2,303 Q}{4\pi \Delta s} \quad (4)$$

kde K je hydraulická vodivost (m/s), T je transmissivita (m^2/s), M je mocnost zvodně, resp. testovaného intervalu (m), Q je čerpané množství (m^3/s) a Δs je snížení hladiny za jeden logaritmický cyklus času (m).

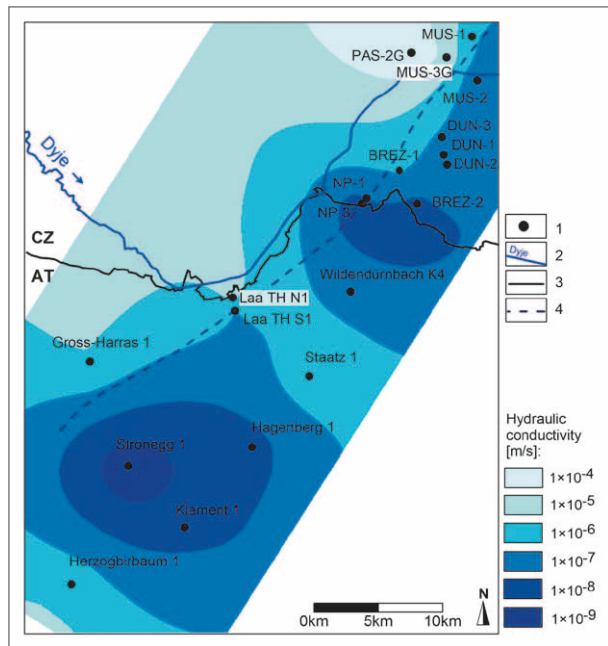
Hydraulická vodivost u vrtu PAS-2G byla určena vyhodnocením čerpací zkoušky provedené v režimu neustáleného proudění (průběh zkoušky popsán v archivní dokumentaci viz e-appx. 1), a to metodou Papadopulos-Cooper (Papadopulos, Cooper 1967).

V archivních záznamech bylo dále dohledáno 21 hodnot hydraulických vodivostí získaných laboratorním testováním na permeamtru (testováno vodou na 100% vodou nasycených jádrech) a 23 hodnot získaných na základě výsledků čerpacích zkoušek.

Výsledky a diskuze

Prostorové vymezení kolektoru a jeho hydraulické parametry

Představu o prostorovém rozsahu hydraulicky spojených hydrostratigrafických jednotek tvořících kolektor minerálních a termálních vod poskytuje trojrozměrný digitální model (obr. 2). Tento model obsahuje 6 hydrostratigrafických jednotek. Nejspodnější jednotkou je 50 m mocná vrstva reprezentující zvětralý povrch krystalinika. V jeho nadloží se nachází jednotka sedimentů střední jury (dogger – klastické sedimenty, karbonáty), jejíž výskyt je rozšířen zejména na rakouské části území a na jihovýchodě zájmové oblasti dosahuje mocnosti kolem 1,5 km. Na těchto sedimentech, popř. přímo na krystalinickém podloží, leží hlavní kolektor termálních minerálních vod tvořený karbonáty svrchní jury a dosahující mocností až 660 m. Povrch těchto karbonátů se podle geologického modelu (obr. 2) nachází v hloubkách od 100 do 3 000 m



Obr. 3: Prostorové rozložení hydraulických vodivostí v hlavní struktuře juruských karbonátů. Legenda: 1 – umístění hlubokého vrtu, 2 – řeka Dyje, 3 – státní hranice, 4 – mušovská přechodová zóna.

Fig. 3: Spatial distribution of hydraulic conductivities in the main structure of Jurassic carbonates. Legend: 1 – deep well localization, 2 – river Dyje, 3 – state border, 4 – Mušov transition zone.

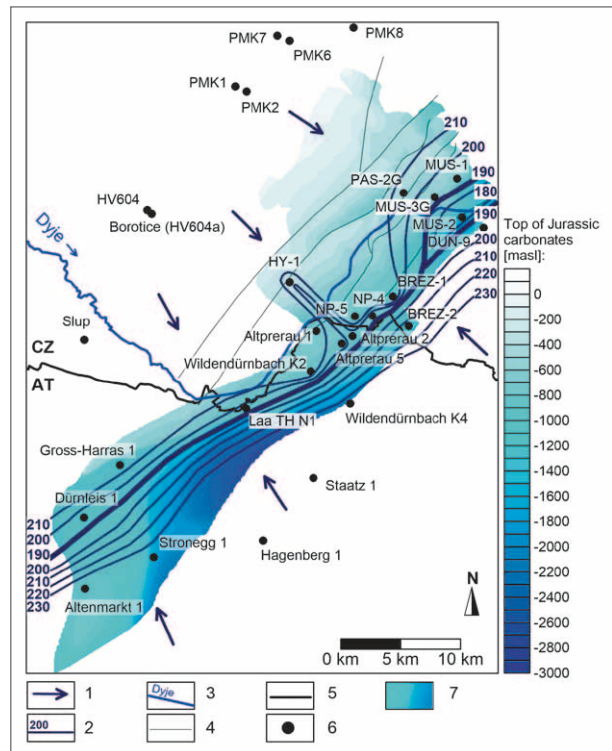
pod povrchem terénu. Do východní části modelu zasahují nepropustné pelitické sedimenty (mikulovské slínovce) dosahujících mocností až 1 km. Nejvýše uloženými hydrostratigrafickými jednotkami jsou propustné spodnomiocenní sedimenty egeru na rakouské a eggenburgu na české straně modelovaného území.

Hydraulická vodivost zmíněných hornin je, s ohledem na značnou hloubku výskytu kolektorských hornin, relativně vysoká. V rámci hlavní juruské hydrogeologické struktury se hydraulické vodivosti pohybují v širokém rozpětí od 10^{-4} do 10^{-9} m/s (obr. 3). Nejvyšší hodnoty hydraulických vodivostí, umožňující aktivnější oběh podzemních vod, byly zaznamenány v mělké severozápadní části zvodně, což může být dané přítomností preferenčních drah proudění, které jsou, podle např. Kiralyho (2003), Kaufmanna et al. (2014) či Liho et al. (2020), v prostředí karbonátových hornin běžně výsledkem rozpuštění horninového prostředí kolem existujících dutin. Rozložení hydraulických vodivostí v podložních a nadložních hydraulicky spojených jednotkách je uvedeno v tabulce 2.

Tab. 2: Hodnoty hydraulických vodivostí (m/s) studovaných hydrostratigrafických jednotek.

Tab. 2: Values of hydraulic conductivities (m/s) of studied hydrostratigraphic units.

hydrostratigrafická jednotka	medián [m/s]	průměr [m/s]	min [m/s]	max [m/s]	SMODCH [m/s]	počet testů
sedimenty spodního miocénu	9,85E-07	2,80E-06	1,56E-07	2,34E-05	6,03E-06	13
kurdějovské vápence	4,83E-07	6,63E-07	1,62E-07	2,22E-06	5,69E-07	12
svrchnojuruské karbonáty	8,16E-07	3,36E-05	1,28E-09	6,01E-04	1,27E-04	21
střednojurské sedimenty	2,73E-07	6,56E-06	6,88E-09	6,36E-05	1,62E-05	15
krystalinikum Českého masivu	1,20E-08	–	–	–	–	1



Obr. 4: Mapa hydroizopiez s vyznačenými směry proudění podzemních vod. Legenda: 1 – směry proudění podzemních vod, 2 – izoliny hydraulických výšek (m n. m.), 3 – řeka Dyje, 4 – zlom, 5 – státní hranice, 6 – umístění vrtu, 7 – povrch juruských karbonátů.

Fig. 4: Groundwater level contour map supplied by groundwater flow directions. Legend: 1 – groundwater flow direction, 2 – hydraulic head isolines (m a. s. l.), 3 – river Dyje, 4 – fault, 5 – state border, 6 – well location, 7 – top of Jurassic carbonates.

Rovněž ve střednojurských sedimentech bylo zaznamenáno široké rozpětí hodnot od 10^{-5} do 10^{-9} m/s. Naopak pro prostředí krystalinického podloží byla získána pouze jedna hodnota hydraulické vodivosti $1,2 \times 10^{-8}$ m/s. Všechny hodnoty hydraulických vodivostí, ať převzatých či vypočtených, jsou pak součástí e-appx. 1, z této přílohy také vychází shrnující hodnoty jednotlivých hydrostratigrafických jednotek uvedené v tabulce 2.

Proudění podzemních vod

Proudění podzemních vod v hodnocené struktuře bylo charakterizováno na základě odvozených hydraulických výšek. Použitá metoda však vyžaduje stanovení ρ_a v úseku mezi z_i a z_r . Tato hustota byla poměrně dobře stanovitelná v sz. části kolektoru, což je dáno dostatkem vhodně prostorově rozmístěných vrtů s informací o tlaku, teplotě a mineralizaci vody, která se relativně plynule zvyšuje s rostoucí hloubkou. Na vrtech v jv. části zvodně nebylo možné, kvůli značné proměnlivosti v mineralizaci vod a nevhodnému prostorovému rozložení vzorkovaných vrtů,

spolehlivě stanovit ρ_a v rovníci 2, a tedy stanovit hodnoty $h_{f,r}$ (tab. 3). Interpolací hodnot $h_{f,i}$ a $h_{f,r}$ bylo ověřeno, že směry proudění jsou prakticky identické. Z tohoto důvodu byly k vytvoření mapy hydroizopiez (obr. 4) a určení směrů proudění podzemních vod, využity hodnoty $h_{f,i}$ (rovnice 1) uvedené v tabulce 3. Ke zhotovení této mapy bylo využito archivních zpráv z 50. až 90. let minulého století a rovněž měření z let 2010 až 2019. Aktuální rozložení hydraulických výšek tak není možné uvést. Dlouhodobý vývoj hladin podzemních vod je znám jen z vrtu MUS-3G, na kterém došlo mezi roky 2010 až 2019 k poklesu hydraulické výšky o cca 5 m. To je však způsobeno především navýšením odběru termálních vod.

Podle směrů proudění podzemních vod byly určeny zóny jejich infiltrace a drenáže. Podzemní vody proudí od SZ a od JV směrem k drenážní zóně, jejíž přítomnost byla identifikována v centrální části zájmové oblasti (obr. 4). Hladiny podzemních vod se v této zóně pohybují na úrovni od cca 170 do 190 m n. m. Drenážní zóna zde probíhá paralelně s mušovskou přechodovou zónou. Podél této zóny přetékají termální vody do nadloží. Z odvozených směrů proudění podzemních vod a paralelního průběhu zóny drenáže s řekou Dyjí v sv. části hodnocené struktury je zřejmé, že část minerálních vod je drénována řekou Dyjí, jejíž úroveň hladiny je v tomto úseku 180–170 m n. m.

Podzemní vody přitékající od SZ pocházejí z oblasti českého masivu a doplňují mělkou část karbonátové zvodně, tedy část, ze které jsou jímány termální minerální vody. Tyto podzemní vody přitékají do hodnocené struktury přes zónu zvětralého krystalinického podloží. O přítoku podzemních vod z tohoto směru svědčí také relativně nízké mineralizace pohybující se podle Pasternákové et al. (2021) od 0,5 do 12 g/L. Aktivnější oběh podzemních vod proudících v hloubkách dosahujících až 1 400 m pod terénem podporují rovněž zóny zvýšených hydraulických vodivosti indikované na nátokové straně jurské zvodně a v oblasti drenáže.

Tab. 3: Hustoty podzemních vod (ρ_i) určené programem PanSystem (Weatherford) v bodě záměru (z_i), podle kterých byly odvozeny hydraulické výšky tzv. „fresh water heads“ ($h_{f,i}$) a tzv. „corresponding fresh water heads“ ($h_{f,r}$). Součástí tabulky jsou zdroje vstupních dat pro výpočet hustoty. Tab. 3: Groundwater densities (ρ_i) determined by program PanSystem (Weatherford) at the measurement points (z_i), which were used for derivation of hydraulic heads: fresh water heads ($h_{f,i}$) and corresponding fresh water heads ($h_{f,r}$). The sources of the data used for groundwater densities calculations are included in the table.

vrt	z_i [m n. m.]	ρ_i [kg/m ³]	$h_{f,i}$ [m n. m.]	$h_{f,r}$ [m n. m.]	zdroj dat
MUS-1	-1277,74	994,90	194,25	193,41	Geofond (P023792/1)
MUS-2	-1654,37	1012,75	172,63	–	Geofond (P025048)
MUS-3G	-1126,84	994,76	191,11	190,74	Kocman (2020)
PAS-2G	-513,92	994,34	205,70	207,02	Fendek and Remšík (1995)
BREZ-1	-822,40	992,18	211,27	211,36	MND
BREZ-2	-1650,46	1000,24	211,63	–	MND
NP-4	-795,64	996,09	194,01	194,52	Kostelníček (1988a)
NP-5	-840,17	992,96	228,51	228,65	Kostelníček (1988b)
DUN-9	-981,55	1000,24	194,55	–	MND
HY-1	-483,83	995,55	202,80	–	Čížek (1963)
Borotice (HV604a)	202,50	1000,38	220,95	224,26	ČHMÚ
Slup	58,93	1000,24	194,05	197,24	ČHMÚ
PMK-1	155,49	999,94	212,45	212,02	ČGS (Geofond)
PMK-2	171,00	999,92	218,08	217,63	ČGS (Geofond)
PMK-6	152,32	998,52	213,28	212,53	ČGS (Geofond)
PMK-7	159,51	998,42	224,99	224,17	ČGS (Geofond)
PMK-8	103,15	997,93	195,02	193,97	ČGS (Geofond)
HV604	156,10	1000,41	190,57	193,77	ČGS (Geofond)
Laa TH N1	-1102,00	998,60	191,75	191,50	GBA (Rakouská geologická služba)
Altenmarkt 1	-1688,90	1004,74	253,35	–	OMV
Altprerau 1	-701,00	995,94	213,24	213,58	OMV
Altprerau 2	-879,00	994,70	198,99	199,22	OMV
Altprerau 5	-825,00	995,41	203,86	204,25	OMV
Dürnleis 1	-1158,00	999,86	197,09	195,93	OMV
Gross-Harras 1	-1260,00	996,00	218,23	216,83	OMV
Hagenberg 1	-2576,40	999,19	261,94	–	OMV
Staat 1	-3125,00	978,46	167,01	–	OMV
Stronegg 1	-1911,00	991,52	246,01	–	OMV
Wildendürnbach K2	-918,00	996,48	210,35	210,47	OMV
Wildendürnbach K4	-2155,00	1008,65	243,79	–	OMV

Podzemní vody přitékající k zóně drenáže od JV doplňují podstatně hlubší část zájmové oblasti studovaného kolektoru. Přítok vod z tohoto směru dokládají i výrazně vyšší mineralizace, pohybující se od 20 do 56 g/L (Pasternáková et al. 2021). Tyto podzemní vody k drenážní zóně přitékají z oblasti značně hlubokého a mocného kolektoru obsahujícího zřejmě velké zásoby fosilních vod.

Závěr

Získaná představa o základním konceptu charakterizované hydrogeologické struktury je důležitá pro další rozvoj místního lázeňského resortu jak na české, tak na rakouské straně studovaného území. Výsledky studia nabízí i náhled na proudění podzemních vod v kolektoru dosahujícího neobyčejných hloubek.

Na základě prostorového rozložení hydraulických výšek byly identifikovány směry proudění podzemních vod, které do hydrogeologické struktury, tvořené především jurskými karbonáty, přitékají od SZ a JV, a jsou drénovány v protáhlém úseku probíhající paralelně s mušovskou přechodovou zónou. Severovýchodní část

kolektoru je zřejmě drénovaná řekou Dyjí. Podél drenážní zóny byly zároveň identifikovány vysoké hodnoty hydraulických vodivostí, typických pro karbonátové zvodně s dobře vyvinutou sítí krasových kanálů. Přítok podzemních vod ze SZ, z Českého masivu, rovněž dokládají poměrně nízké mineralizace vod zaznamenané v SZ části zájmového území, ve které se nacházejí vrty jímající termální minerální vrty pro potřeby lázní v Pasohlávkách a v Laa an der Thaya. Část vod přitéká k drenážní zóně také z JV, kde se vyskytují mocné sedimentární sekvence obsahující fosilní vody s omezenou možností jejich doplňování, což se odráží v jejich vysoké mineralizaci.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci přeshraničního projektu Interreg HTPO (Hydrotermální potenciál oblasti, ATCZ167). Autoři děkují editorovi Markovi Slobodníkovi za cenné komentáře a rady. Díky patří rovněž recenzentům za podnětné připomínky vedoucí ke zkvalitnění příspěvku.

Elektronická příloha (electronic attachment):

e-appx. 1: Tabulka shrnující výsledné hodnoty hydraulických vodivostí k (m/s), které byly převzaty (P) nebo vypočteny (V). V tabulce je uveden typ testu a metodika použitá k výpočtu (ČZ – čerpací zkouška, SZ – stoupací zkouška, laboratorně). Zdroj dat je uveden v posledním sloupci.

e-appx. 1: Table summarizing the resulting values of hydraulic conductivities k (m/s), which were found in archive reports (P) or calculated (V). The table shows the type of test and the methodology used for calculation (ČZ – pumping test, SZ – recovery test, laboratory tested). Last column shows the data source.

Literatura

- Adámek, J. (1977). Několik poznámek o nových výsledcích v oblasti jižní části karpatské předhlubně. – *Zemní plyn a nafta*, 22, 1, 7–12.
- Adámek, J. (1986). Geologické poznatky o stavbě mezozoika v úseku jih jihovýchodních svahů českého masivu. – *Zemní plyn a nafta*, 31, 4, 453–484.
- Adámek, J. (2005). The Jurassic floor of the Bohemian Massif in Moravia – geology and paleogeography. – *Bulletin of Geosciences*, 80, 4, 291–305.
- Adámek, J., Balun, P., Dostálék, J., Guryča I., Jandová, B., Karbanová, E., Michalíček, M., Němcová, A., Řehánek, J. (1990). Geologická část závěrečné zprávy o geotermálním vrtu Mušov-3 (G). – MS, Moravské naftové doly, s. p., odbor průzkumné geologie. Hodonín.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Second Edition. – Elsevier. Amsterdam.
- Beňáková, E. (1995). Dílčí závěrečná zpráva o reinjektážním vrtu Pasohlávky-2G, Výsledky hydrogeologického měření při čerpací a reinjektážní zkoušce. – In: Papež, Z., Svoboda, B. (eds): *Závěrečná zpráva o reinjektážním vrtu Pasohlávky-2G, Příloha A/15*. – MS, Geologické inženýrství a.s., Brno.
- Brzobohatý, R., Cicha, I. (1993). Karpatská předhlubně. – In: Přichystal, A., Obstová, V., Suk, M. (eds): *Geologie Moravy a Slezska. Sborník příspěvků k 90. výročí narození prof. Dr. Karla Zapletala, 123–128*, Moravské zemské muzeum a Sekce geologických věd PŘF MU, Brno.
- Cooper, H. H., Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. – *Transactions of the American Geophysical Union*, 27, 526–534.
- Čížek, L. (1963). Výroční geologická zpráva o výsledcích hlubinného průzkumu v jihozápadní části čelní prohlubně. – MS, ČND průzkumně-těžební závod. Lužice.
- Fendek, M., Remšík, A. (1995). Vyhodnotenie čerpacej a stúpajacej skúšky z vrtu Pasohlávky-2G. – In: Papež, Z., Svoboda, B. (eds): *Závěrečná zpráva o reinjektážním vrtu Pasohlávky-2G, Příloha B*. – MS, Geologické inženýrství a.s. Brno.
- Franců, J., Pereszlényi, M., Jurenka, L., Jirman, P. (2019). Zpracování historických dat a petrografických charakteristik hornin včetně porozity. Výstup A. Dílčí výstup – A1. Závěrečná výzkumná zpráva. – MS, Česká geologická služba. Brno.
- Franzová, M. (1986). Neogenní sedimenty jihozápadní části karpatské předhlubně – hydrogeologická syntéza, I. fáze. – MS, Geotest, n. p. Brno.
- Kaufmann, G., Gabrovšek, F., Romanov, D. (2014). Deep conduit flow in karst aquifers revisited. – *Water Resources Research*, 50, 6, 4821–4836.
- Kiraly, L. (2003). Karstification and Groundwater Flow. – *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1, 3, 155–192.
- Kocman, T. (2020). Expertní vyhodnocení režimních měření na vrtu MU3G. – MS, KOCCMAN envimonitoring. Brno.
- Kolářová, M. (1991). Hydrogeologické poměry ropoplynonosných oblastí Moravy. – Ústřední ústav geologický, sv. 64. Praha. 229 s.
- Kostelníček, P. (1988a). Závěrečná zpráva o vrtu předběžného průzkumu Nový Přerov-4. – MS, Naftový a plynárenský priemysel, Moravské naftové doly, k.p., odbor průzkumné geologie. Hodonín.
- Kostelníček, P. (1988b). Závěrečná zpráva o vrtu předběžného průzkumu Nový Přerov-5. – MS, Naftový a plynárenský priemysel, Moravské naftové doly, k.p., odbor průzkumné geologie. Hodonín.
- Krásný, J., Císlarová, M., Čurda, S., Datel, J. V., Dvořák, J., Grmela, A., Hrkal, Z., Kříž, H., Marszałek, H., Šantrůček, J., Šilar, J. (2012). *Podzemní vody České republiky: Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. – Česká geologická služba. Praha. 1145 s.
- Kyrieleis, W., Sichardt, W. (1930). *Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten*. – Springer, Berlin.
- Li, X., Ke, T., Wang, Y., Zhou, T., Li, D., Tong, F., Wen J. (2020). Hydraulic Conductivity Behaviors of Karst Aquifer With Conduit-Fissure Geomaterials. – *Frontiers in Earth Science*, 8, 30, 1–10.
- Papadopoulos, I. S., Cooper, H. H. (1967). Drawdown in well of large diameter. – *Water Resources Research*, 3, 1, 241–244.
- Pasternáková, B., Kuchovský, T., Chroustová, K., Říčka, A., Bottig, M. (2021). Hydrochemické zhodnocení zdrojů termálních minerálních vod v oblasti Pasohlávky – Laa an der Thaya. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 28, 1–2, 105–111.
- Pipeflowcalculations.com (2020). Pipe Flow Calculators. – Dostupné na: www.pipeflowcalculations.com/index.xhtml, 28. 07. 2020.
- Post, V., Kooi, H., Simmons, C. (2007). Using hydraulic head measurements in variable-density ground water flow analyses. – *Ground Water*, 45, 6, 664–671.
- Thiem, G. (1906). *Hydrologische Methoden*. – Gebhardt. Leipzig.