

Radioaktivní prameny v Praze-Čimicích

Radioactive springs in Prague-Čimice

ANTONÍN LUSTIK¹ – VIKTOR GOLIÁŠ¹ – PETR CUPAL² –
JIŘÍ BRUTHANS³ – JAN SCHRÖFEL^{†4} – VĀCLAV KACHLÍK⁵ –
LENKA JÍLKOVÁ⁶ – MARTIN MIHALJEVIČ¹

¹ Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 43 Praha 2; lustika@natur.cuni.cz

² KO-KA, s. r. o. (Kolektory – Kanalizace), Na Výšinách 887/16, 170 00, Praha 7,

³ Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 43, Praha 2

⁴ Katedra geotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29, Praha 6

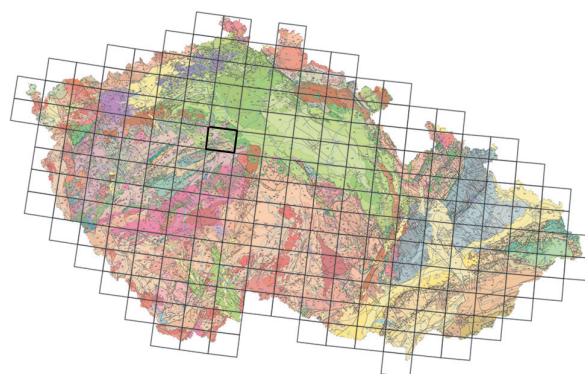
⁵ Ústav geologie a paleontologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 43 Praha 2

⁶ Laboratoře geologických ústavů, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 43 Praha 2

Please cite this article as: Lustik, A. – Goliáš, V. – Cupal, P. – Bruthans, J. – Schröfel, J. – Kachlík, V. – Jílková, L. – Mihaljevič, M. (2022): Radioactive springs in Prague-Čimice. – Geoscience Research Reports, 55, 1, 27–34. (in Czech)

Keywords: radioactivity, groundwater, uranium, ²²²Rn, ²²⁶Ra, Barrandian, Neoproterozoic

Summary: Groundwater inflows showing notable natural radioactivity have been found at the northern end of the Holešovice cable tunnel close to the Čimice Grove. This groundwater originates from



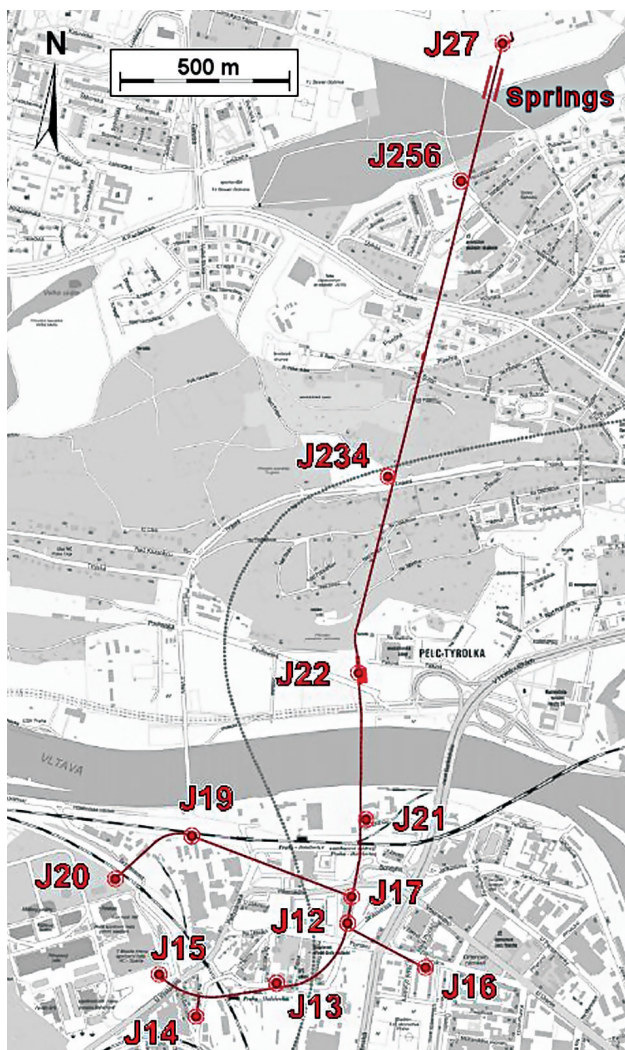
(12-24 Praha)

the Barrandian Neoproterozoic slates of the Blovice accretionary complex, Belt I (Šárka-Zbiroh Belt) at depths approximately 100 meters below the surface, occurring along 50 meter profile of the cable tunnel. Water springs are dispersed in the spring area, with the total discharge of 2 L/s. Groundwater is cold ($T \sim 11.1 - 12.3$ °C), neutral ($\text{pH} \sim 6 - 7.48$), suboxic to oxalic ($\text{Eh (ORP}_H) \sim 177$ up to 418 mV), of a hydrochemical type Ca-Mg-HCO₃, total mineralization being around 702 mg/L. Radon activity (²²²Rn) varies between 415 and 1195 Bq/L and radium activity (²²⁶Ra) ranges between 0.18 and 5.3 Bq/L. Activities of Rn and Ra are relatively high. Currently, this is the most radioactive water within Prague agglomeration. This water is relatively aggressive as well, causing damage to the concrete lining of the cable tunnel and also allowing formation of calcite precipitates with an increased radium (²²⁶Ra) activity.

Kabelové tunely slouží k rozvodu elektrických sítí VVN (velmi vysoké napětí) z elektrorozvodu na okraji do transformačních stanic uvnitř Prahy. Kabelový tunel (KT) Holešovice, jak je nazýván v terminologii PREDistribuce, do jejíž správy spadá, vede z elektrorozvodny Sever v Čimicích pod budovu v Jankovcově ulici, kde se nachází transformátorová stanice Holešovice. Vede jím kabelová trasa VVN 110 kV o celkovém příkonu 62 MW. Je to nejstarší kabelový tunel na území Prahy, který je se svými 4 416 metry zároveň nejdelším. Byl vyražen v letech 1976–1979 podnikem Výstavba dolů uranového průmyslu (VDUP), dceřinou jednotkou Československého uranového průmyslu (Kučera et al. 2019). Vyražení tohoto tunelu způsobilo poklesy hladiny podzemních vod v přiléhajících mělkých zdrojích (Kapasová 1983). Byla také teoreticky řešena možnost snížení přítoků agresivních vod, způsobujících destrukci jeho betonového ostění (Drozd 1980).

Počátek objevu vod se zvýšenou radioaktivitou se datuje k roku 2012, kdy byl na skládce velkoobjemového odpadu zachycen kontejner precipitátů (usazenin, sintrů)

z čištění odtokové stružky KT se zvýšenou radioaktivitou. Objekt KT se okamžitě dostal do hledáčku Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a Státního ústavu radiační ochrany (SÚRO). V objektu KT byly instalovány stopové detektory pro určení aktivity radonu ve vzduchu a termoluminiscenční dozimetry ke stanovení dávkového příkonu gama. Také byly odebrány vzorky vod celkového odtoku z KT i čtyři vzorky pevných precipitátů. Z ročního měření (2013–2014) byly stanoveny aktivity vzduchu v rozmezí 230–1950 Bq/m³ ²²²Rn a dávkový příkon max. 0,6 μGy/h (Škábová – Rovenská-Navrátilová, nedatováno). Ve směsné čerpané vodě byla stanovena celková aktivita alfa ve výši 1,78 Bq/l (Bečková 2013a) a 1,96 Bq/l a aktivita ²²⁶Ra 0,58 Bq/l (Bečková 2013b). V pevných vzorcích precipitátů byla naměřena zvýšená aktivita ²²⁶Ra v rozmezí 0,2–4,0 kBq/kg (Malá 2013). V závěrečné dokumentaci k povolení vypouštění vod (Neznal 2013) je konstatováno, že voda sice překračuje limit celkové alfa aktivity (tak jako mnoho jiných obvyklých geologických materiálů překračuje současné přísné limity i jiných norem), vzhledem



Obr. 1. Situace kabelového tunelu Holešovice.
Fig. 1. Situation of the Holešovice cable tunnel.

k vysokému ředícímu faktoru (výpust do Vltavy) však žádné reálné riziko nepředstavuje.

Na popud a v doprovodu jednoho z autorů tohoto příspěvku (PC), pracovníka firmy KO-KA, s. r. o. (Kolektory – Kanalizace), navštívili 23. 7. 2013 další dva autoři (JS a VG) trasu KT. Bylo provedeno gamaspektrometrické profilování celé části KT Holešovice od šachty J17 až po šachtu J27 a zjištěno, že radioaktivní precipitáty se srážejí pouze z některých z četných přítoků podzemních vod, a to ve dvou krátkých úsecích mezi šachtami J256 a J27 (obr. 1).

Po prostudování technických zpráv SÚRO bylo konstatováno pouze jejich jednostranné regulatorní hledisko, ačkoli celá problematika je mnohem širší a zajímavější. Nebyla známa geologická pozice vývěřů, jejich distribuce, průtoky, fyzikální parametry, složení vody, kromě jediného stanovení ^{226}Ra ve směsné vodě (viz výše), ani konkrétní aktivity radionuklidů (U, ^{226}Ra , ^{222}Rn), ani mineralogická povaha vznikajících precipitátů. Proto byl sestaven návrh projektu výzkumu, jehož financování však bylo potenciálním investorem (PREdistribuce) odmítnuto. Zajímavá problematika tak skončila dočasně „v šuplíku“.

Téma bylo znovu oživeno v roce 2019, kdy bylo zadáno formou v této chvíli již obhájené bakalářské práce prvnímú z autorů (Lustik 2021). V poněkud modifikované a doplněné formě je pak tématem tohoto příspěvku.

Metodika

Prvním krokem bylo studium dostupných mapových podkladů, geologických map povrchové části zájmové oblasti v měřítkách 1 : 50 000 a 1 : 25 000 (www.mapy.geology.cz) a archivní studium (archivy ČGS a DIAMO, s. p.). Terénní práce započaly povrchovou rekognoskací lokality. Dále následovaly tři návštěvy vývěřové lokality, které byly shodou okolností v časové souhře s dlouhodobě plánovanou sanací této části kabelového tunelu, postížené pokročilou destrukcí betonového ostění vlivem vývěřů agresivních podzemních vod.

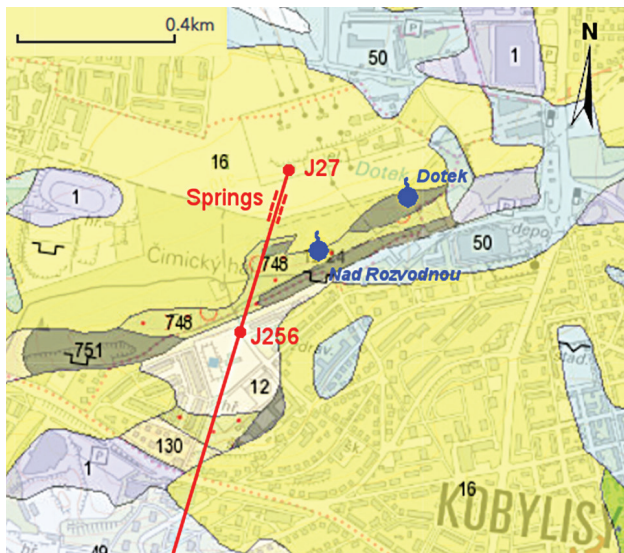
Při první návštěvě v samotném kabelovém tunelu, která se konala 31. 5. 2019, v čase před zahájením sanace, byla lokalizována a mapována místa přítoků do KT. Jako nulový bod metráže byla stanovena hrana šachty J27 na styku s chodbou tunelu. Byly odebrány vzorky sedmi nejsilnějších vývěřů pro stanovení ^{222}Rn a ^{226}Ra . Na místě byly měřeny hodnoty průtoků, teplot, vodivosti, pH a Eh. Teplota byla měřena digitálním teploměrem Voltcraft DET 3R. Ostatní veličiny (pH, Eh, EC) byly měřeny přístroji HANNA Combo Tester HI98129 a HANNA Tester HI98121. Průtok byl měřen časově-objemovou metodou pomocí nádoby o objemu 390 ml a stopek. V případě, že nebylo možné technicky zachytit vodu do kalibrované nádoby, byl průtok určen odhadem.

Druhá návštěva dne 11. 6. 2019 byla zaměřena na odběr vzorků usazenin a sintrů. Tato akce proběhla právě v termínu sanace, kdy byla stěna navrtávána a injektována cementovou směsí do dutých prostorů vně tunelu. Odebráno bylo celkem osm vzorků precipitátů (sintrů). Právě probíhající vrtné práce byly také využity k odebrání 13 vzorků hornin, kterými tunel prochází.

Poslední návštěva proběhla v lednu 2020, již po ukončení sanačních prací, a proto byly vývěry znovu mapovány a opět byly měřeny jejich průtoky, teploty, vodivosti, pH a Eh. Také byly odebrány vzorky pro stanovení ^{222}Rn a ^{226}Ra . Z nejvýznamnějšího vývěru na metrži 54,5 m byl odebrán vzorek pro chemickou analýzu. Vzorek vody byl filtrován vakuovou aparaturou Sartorius s filtrem Milipore 0,5 μm , pro stanovení kationtů byl okyselen HNO_3 . Pro stanovení aktivity ^{222}Rn a ^{226}Ra ve vodě bylo využito scintilační metody (LSC) v její nejvíce citlivé variantě – metody extrakční na přístroji TRIATHLER (Hidex, Finsko). Chemická analýza odebraného vzorku vody byla provedena v Laboratořích geologických ústavů PŘF UK. Hlavní kationty byly měřeny metodou optické emisní spektrometrie (ICP-OES Agilent 5110, USA), stopové prvky metodou hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS iCAP Q, Thermo Fischer, USA) a anionty byly stanoveny kapalinovou chromatografií (Deionex HPLC, USA). Fázové složení precipitátů bylo měřeno rentgenovou práškovou difrakcí (PXRD) na přístroji X'Pert PANalytical

a vyhodnoceno v programu HighScore za použití databáze PDF-2 (ICDD). Aktivita ^{226}Ra v precipitátech byly měřeny laboratorní gamaspektrometrií [$3 \times 3 \text{ NaI(Tl)}$ s MCA analyzátozem Canberra 2000] v geometrii válcových 60ml misek nebo v Marinelliho geometrii 0,5l, podle objemu odebraného vzorku, za použití standardů IAEA řady RG.

Na závěr, v květnu roku 2021 byl proveden doplňkový průzkum povrchových vývěřů vod v proterozoickém pruhu v okolí trasy KT a nad ní. Odebrané vzorky vod byly vzorovány stejným, výše uvedeným způsobem.



Obr. 2. Povrchová geologická situace s vyznačením trasy severní části KT a pozice povrchových pramenů na základě mapy 1 : 50 000 (www.mapy.geology.cz). Horniny: kvartér: 1 – antropogenní sedimenty, 12 – deluviální hlíny, 16 – spraše a sprašové hlíny, 49 – písčitohlinité sedimenty, 50 – písky, 130 – štěrky a písčité štěrky; neoproterozoikum: 748 – droby, prachovce, 751 – bulžníky (silicity).

Fig. 2. Surface geological situation with indicated route of the northern part of the cable tunnel (KT) and the position of surface springs based on the map 1 : 50 000 (www.mapy.geology.cz). Lithology: Quaternary: 1 – anthropogenic sediments, 12 – deluvial loam, 16 – loess and loess loam, 49 – sandy and loamy sediments, 50 – sand, 130 – gravel and sandy gravel; Neoproterozoicum: 748 – greywacke and siltstone, 751 – lydite.

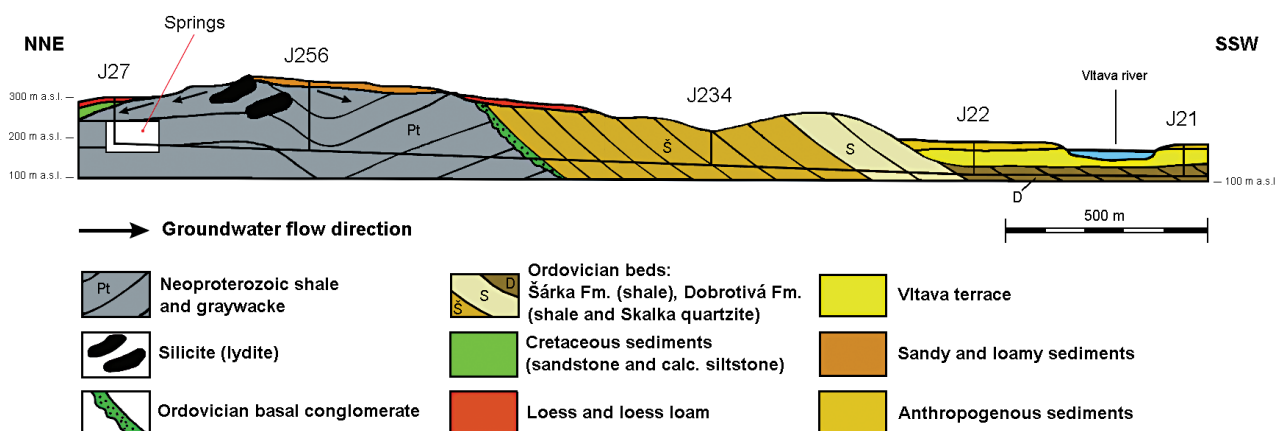
Výsledky

Geologické poměry

Z povrchové geologické mapy trasy tunelu (obr. 2) vyplývá, že tunel svojí severní částí prochází okrajem synklinoria pražské pánve, reprezentovaným ordovikem, kde tunel svým ukončením vchází do podložního barrandienského neoproterozoika. Velká část sledované oblasti se nachází v prostoru Čimického háje. Čimický háj kopíruje bulžníkový hřeben probíhající směrem ZJZ–VSV. Po průchodu Čimickým hájem směrem na sever (cca 200m) končí lesní porost a začíná rovinatá oblast tvořená křídovým pokryvem, zakrytým kvartémmi uloženinami. Zde je vybudována elektrorozvodna Sever, do níž kabelový tunel ústí a kde se nachází vstupní šachta J27.

Během archivního studia se nám nepodařilo získat zprávu ze samotné ražby tunelu. Je jasné, že tunel při ražbě geologicky dokumentován byl, ale technickou zprávu se nepodařilo dohledat. Hlavním zdrojem informací je proto zpráva o inženýrskogeologickém průzkumu realizovaném v jeho trase před započítím vlastní ražby (Habrnál 1976). Přehled o geologické stavbě je nastíněn v inženýrskogeologické mapě podél trasy tunelu, ve které jsou vyneseny typy pokravných útvarů, hydrogeologické údaje a stratigrafické zařazení hornin skalního podloží. Nová dokumentace není možná, jelikož je horninový masiv zcela kryt betonovou výztuží. Konkrétní pozice geologických rozhraní jsou tedy v detailu nejasné a dají se pouze odhadovat. Ze zjištěných archivních údajů i vlastních poznatků byl vytvořen zjednodušený geologický profil (obr. 3).

Kabelový tunel ve své délce protíná několik stratigrafických jednotek, vychází severním směrem z pražské pánve a vstupuje do hornin barrandienského neoproterozoika. Konkrétně od jihu jde proti směru stratigrafického sledu, kdy prochází horninami ordoviku, a to nejprve břidlicemi a skaleckými křemenci dobrotivského souvrství a poté břidlicemi šárceckého souvrství. Bazální slepenec na bázi šárceckých vrstev ordoviku, který by nasedal diskordantně na podložní zvrásněné neoproterozoické břidlice, nemůžeme vzhledem k absenci zprávy z ražby tunelu potvrdit.



Obr. 3. Nepřevýšený geologický profil KT Holešovice.

Fig. 3. Unelevated geological profile of KT Holešovice.

V severním pokračování až do ukončení tunelu šachtou J27 byly zastíženy neoproterozoické břidlice, dříve řazené ke kralupsko-zbraslavské skupině, blovickému souvrství, nyní zbirožsko-šareckému pruhu (Belt I) blovického akrečního komplexu. Stáří tohoto pruhu je podle detritických zirkonů v drobách větší než 560 Ma (Hajná et al. 2011, Hajná et al. 2018). V těchto neoproterozoických břidlicích a jemnozrnných drobách se vyskytují hojná a různě mocná tělesa silicitů (buližníků), buď jako součást vrstevního sledu (dlouhá tělesa se stálou mocností), nebo jako nepravidelné bloky uzavřené v okolní matrix a interpretované jako olistostromy (Hajná et al. 2019). Není vyloučeno, že mocná a nepravidelná tělesa mohou reprezentovat rekrystalované hydrotermality v blízkosti přírodních drah ohřátých fluid. V trase tunelu (obr. 3) se zřejmě silicity nevyskytují, pouze severně od šachty J256 je jejich výskyt jistý, protože při geologickém průzkumu zde havaroval průzkumný vrt v okrajové zóně silicitového tělesa (Habrňal 1976). Námí sledovaný úsek tunelu s vývěry vod se zvýšenou radioaktivitou se nachází pod nejvyšším bodem oblasti, tvořeným právě hřbetem neoproterozoických silicitů. Tento hřbet tak představuje přirozenou hranici ve směru proudění podzemní vody, tedy lokální rozvodí (obr. 3). Mezi šachtami J256 a J27 prochází tunel pouze neoproterozoickými horninami. Rozborem horninového materiálu z vrtných jader získaných při sanační akci bylo zjištěno, že v celém úseku s vývěry zkoumaných pramenů v metrších 45–96 m od šachty J27 se vyskytují pouze břidlice. Buližníky nebyly zjištěny ani v jednom případě. Makroskopicky to jsou masivnější, jemné, středně až tmavě šedé břidlice s hrubší laminací, střípkovitě se rozpadající. Břidlice řídko protínají po foliaci i puklinách žilky světlého karbonátu. V žádném ze zkoumaných vzorků nebyla nalezena makroskopická příměs



Obr. 4. Celkový pohled na první skupinu vývěrů v okolí přítoku v úseku 54,5 m po rekonstrukci. Foto V. Goliáš.

Fig. 4. General view of the first group of springs in the vicinity of the 54.5 m inflow after reconstruction. Photo by V. Goliáš.

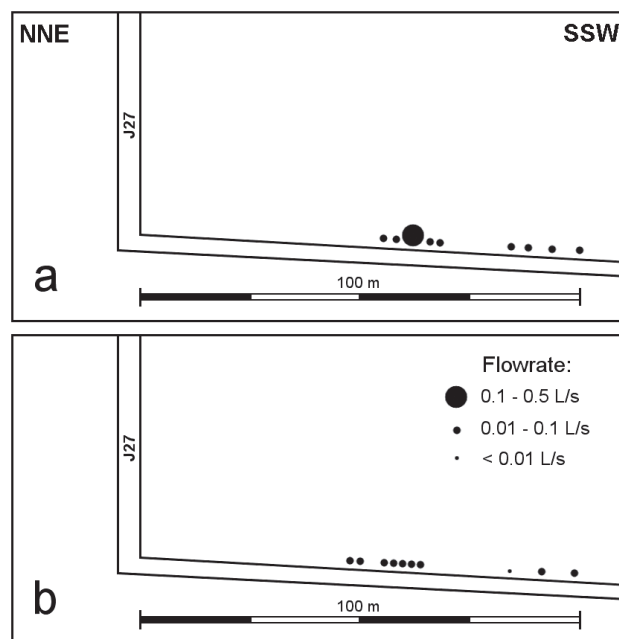
sulfidů (pyritu). Přítomnost buližníků přímo v profilu tunelu tak nebyla potvrzena, nelze však vyloučit, že se některé jeho čočkovité těleso nevyskytuje v prostoru nad tunelem. V profilu vrtu v ose šachty J27 (hloubka šachty 111 m) bylo v nadloží neoproterozoických břidlic dokumentováno 24 metrů svrchní křídly (Habrňal 1976).

Charakteristika vývěrů vod

Vývěry podzemních vod se projevují v celé délce kabelového tunelu, jsou obvykle malé vydatnosti, ovšem jejich počet je vysoký, v řádu stovek. Celkové průměrné čerpané množství je 41,5 l/s (Neznal 2013). Zvýšená radioaktivita vod byla zaznamenána pouze v jeho severní části, mezi šachtami J256 a J27. Přítoky popisované skupiny aktivních vývěrů jsou roztržštěné, většinou o malých průtocích s vydatností do 0,3 l/s (obr. 4). Celková vydatnost vývěrů (v odtokovém žlábků za vývěry) je okolo 2 l/s. Samotná sanace v detailu změnila odtokové poměry, v souvislosti se zatěsněním prostoru za výztuží cementovou směsí a provedením nových krátkých odlehčovacích vrtů.

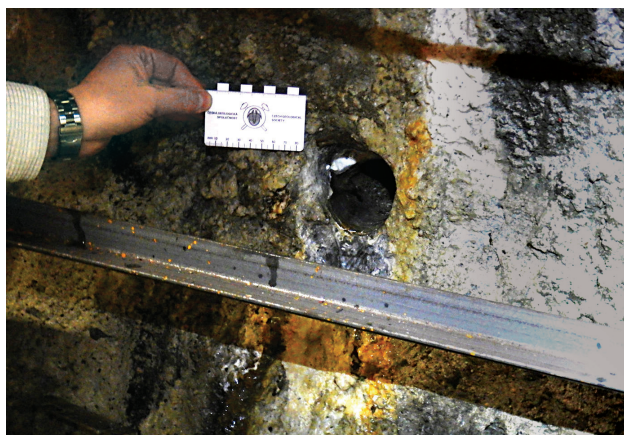
Před sanací byly vývěry rozčleněny na dvě skupiny (55 až 66 m a 83 až 100 m), ostatní vývěry byly nevýznamné (obr. 5a). Vývěry po sanaci můžeme opět rozdělit do dvou skupin (46 m až 62 m a 79 m až 97 m; obr. 5b). Tento fakt je zřejmě dán puklinovým systémem okolních hornin a jejich zvodněním.

Voda je neutrální reakce (pH 7,05–7,46), studená (11,9–12,3 °C), nejteplejší vývěr se nacházel na pozici 79 m. Na mineralizaci podzemních vod neměla sanace výraznější vliv, je podobná jako před sanací. Konduktivita je velmi podobná v celém vývěrovém úseku, a to v roz-



Obr. 5. Pozice a vydatnosti vývěrů před rekonstrukcí (a) a po rekonstrukci (b).

Fig. 5. Position and flow rates of springs before reconstruction (a) and after reconstruction (b).



Obr. 6. Vývěr nejvýznamnějšího přítoku z odlehčovacího vrtu po rekonstrukci v úseku 54,5 m. Foto V. Goliáš.
Fig. 6. The spring of the most important inflow 54.5 m from the relief well after reconstruction. Photo by V. Goliáš.

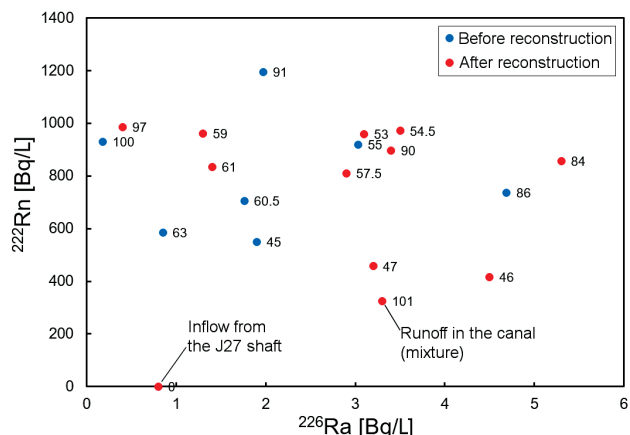
mezi 740–1183, průměrně 926 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (18 měření) před rekonstrukcí a 703–1151, průměrně 826 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (18 měření) po rekonstrukci. Sanace se naopak projevila výrazným snížením Eh (ORP_H), kdy před sanací bylo naměřeno 301–418, průměrně 370 mV (9 měření) a po sanaci 177–335, průměrně 240 mV (15 měření), což zřejmě souvisí s omezením přístupu vzduchu za betonovou výztuž tunelu.

Chemické složení vody

Chemická analýza nejsilnějšího vývěru (0,095 l/s) z pozice 54,5 m (obr. 6) je uvedena v tab. 1. Podzemní voda v KT Holešovice obsahuje zvýšené koncentrace kationtů Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} a K^+ a aniontů $(\text{SO}_4)^{2-}$ a $(\text{HCO}_3)^-$, což se dá vzhledem k charakteru prostředí, kterým migruje, očekávat. Poněkud vyšší obsah stopových prvků je zaznamenán u Co, Ni, Mo a Zn. Je to nížce až středně mineralizovaná voda, hydrochemického typu Ca-Mg- HCO_3 , s celkovou mineralizací 702 mg/l, se zvýšeným obsahem uranu (10,8 $\mu\text{g}/\text{l}$). Nízký je obsah hliníku, který reflektuje jeho nízkou mobilitu při neutrálním pH. Nízká koncentrace dusičnanů, resp. jejich koncentrace pod detekčním limitem ukazuje, že došlo k jejich redukcí v anoxických podmínkách, zřejmě byly využity k oxidaci pyritu, který může být obsažen v břidlicích v prostoru nad tělesem tunelu.

Radon: Aktivita ^{222}Rn se pohybovala před sanací v rozmezí 549–1195, průměrně 802 Bq/l (7 vzorků), nejaktivnější vývěr se nacházel na pozici 91 m od šachty J27. Po sanaci v rozmezí 415–985 Bq/l, průměrně 770 Bq/l (11 vzorků). Nejaktivnější vývěr byl zjištěn na pozici 97 m. Aktivita radonu v rozstříkovaném odplyněné vodě v odtoku ze šachty J27 je velmi nízká, pouze 0,4 Bq/l ^{222}Rn při průtoku 0,1 l/s.

Radium: Aktivita ^{226}Ra se před sanací pohybovaly v rozmezí 0,2–4,7 Bq/l, průměrně 2,1 Bq/l (7 vzorků). Nejaktivnější vývěr byl na pozici 86 m od šachty J27. Po sanaci byla zjištěna aktivita 0,4–5,3, průměrně 2,8 Bq/l ^{226}Ra (12 vzorků), nejaktivnější vývěr je přibližně ve stejných



Obr. 7. Aktivita radia a radonu ve zkoumaných pramenech. Číslo u bodu označuje metráž.
Fig. 7. Radium and radon activity in the investigated springs. The number at the point indicates the footage.

místech, na pozici 84 m od šachty J27. Nízkou radioaktivitu ^{226}Ra má vzorek směsné podzemní vody odebraný na výtoku z šachty J27, a to pouze 0,8 Bq/l ^{226}Ra . Šachta J27 odvodňuje pravděpodobně zejména křídové sedimenty, které zřejmě v tomto konkrétním případě aktivaci vody nepůsobují, i když křída jistě může své podloží vodou významně dotovat. Naopak směsná voda v odtokovém korytu na metrži 101 m za všemi zkoumanými vývěry v KT má aktivitu vysokou – 3,3 Bq/l ^{226}Ra . K hlavní aktivaci podzemní vody radionuklidu tedy dochází skutečně až v horninách neoproterozoika.

Precipitáty a horninové vzorky

Z vody se sráží množství precipitátů, a to jak pevných bílých, karbonátového vzhledu, tak i měkkých železitých hydroxidů a podřízeně také černé oxidy manganové. Je pravidlem, že v místech s vysokým průtokem se srážejí pouze bílé karbonátové sintry, zatímco na místech s průtokem nízkým se rozvíjí úzká zóna obarvená povrchově Mn-oxidy a dále precipitují rezavé Fe-hydroxidy. Nejčastěji je přítomen středně pevný karbonátový precipitát rezavě zbarvený Fe-hydroxidy, který tvoří i objemově převládající sediment v odtokovém žlábků. Rentgenovou práškovou difrakcí byl tento převládající typ precipitátu identifikován jako kalcit. Hmotnostní aktivity ^{226}Ra byly stanoveny poměrně vysoké, v rozmezí 0,25–8,6 kBq/kg, průměrně 1,7 kBq/kg (8 vzorků).

Laboratorní gamaspektrometrii byly orientačně proměřeny také vzorky břidlic, získané během sanace, vzhledem k nízké hmotnosti pouze kvalitativně. Žádný z 13 vzorků nevykázal zvýšené aktivity radionuklidů uranové rozpadové řady.

Povrchové zdroje

Zkoumána byla oblast pruhu proterozoických břidlic se silicity na Ládví, v Čimickém háji a na Velké skále a pod ní

Tabulka 1. Chemické složení vody z kabelového tunelu a tří povrchových pramenů
 Table 1. Chemical composition of groundwater from a cable tunnel and three surface springs

Source name Code Locality		KT Holešovice 54,5 m Tunel	Dotek CM 1/1 Čimický háj	Nad Rozvodnou CM 1/2 Čimický háj	Haltýř CM 1/3 Pod Havránkou
Sampling date		28. 1. 2020	31. 3. 2021	31. 3. 2021	31. 3. 2021
Cations	Unit	Value	Value	Value	Value
Li	[mg/L]	0.029	< 0.002	< 0.002	0.002
Na	[mg/L]	17.3	14.1	14.2	21.3
K	[mg/L]	1.2	5.8	1.3	1.2
NH ₄	[mg/L]	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Mg	[mg/L]	37.8	8.89	7.96	43.5
Ca	[mg/L]	110	58.6	61.3	102
Ba	[mg/L]	0.053	0.049	0.038	0.008
Sr	[mg/L]	0.222	0.307	0.332	0.574
Fe	[mg/L]	0.257	0.156	0.063	0.029
Mn	[mg/L]	0.131	0.254	0.007	0.001
Al	[mg/L]	< 0.005	0.055	0.016	0.014
Ti	[mg/L]	0.346	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Anions					
F	[mg/L]	0.21	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cl	[mg/L]	24.5	21	20.9	58.5
Br	[mg/L]	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
SO ₄	[mg/L]	81	72.9	53.9	90.4
NO ₂	[mg/L]	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
NO ₃	[mg/L]	< 0.2	33	16.7	29.8
PO ₄	[mg/L]	0.043	0.040	0.046	0.064
HCO ₃	[mg/L]	415	108	156	319
Microelements					
V	[µg/L]	0.135	< 6	< 6	< 6
Cr	[µg/L]	< 1	< 10	< 10	< 10
Co	[µg/L]	3.52	< 10	< 10	< 10
Ni	[µg/L]	3.62	< 10	< 10	< 10
Cu	[µg/L]	< 1	< 10	< 10	< 10
Zn	[µg/L]	2.36	< 2	< 2	< 2
As	[µg/L]	0.66	5	4	5
Cd	[µg/L]	< 1	< 4	< 4	< 4
Mo	[µg/L]	2.85	n. a.	n. a.	n. a.
Ag	[µg/L]	0.028	< 10	< 10	< 10
Pb	[µg/L]	0.145	< 30	< 30	< 30
Bi	[µg/L]	0.029	n. a.	n. a.	n. a.
Undissociated					
H ₄ SiO ₄	[mg/L]	15.38	12.38	10.84	22.9
Total mineralization	[mg/L]	702	335	344	690
Radiology					
Th	[µg/L]	0.032	n. a.	n. a.	n. a.
U	[µg/L]	10.8	0.44	0.48	2.4
²²⁶ Ra	[Bq/L]	3.5	0.3	0.4	< 0.05
²²² Rn	[Bq/L]	971	90	71	110
Physical parameters					
Temperature	°C	12.1	6.8	7.8	10.8
pH field		7.2	5.23	5.5	5.77
pH laboratory		6.95	6.91	7.19	7.68
Eh (ORP) _{AgCl} meas.	[mV]	7	151	255	268
Eh (ORP) _H calc.	[mV]	223	371	474	485
EC	[µS/cm]	811	522	534	972

ležící pramen Haltýř v Troji. Na Ládví bylo zkoumáno 11 vodních projevů, jediný vzorkovaný pramen, pod lůmkem na severním svahu, vykázal aktivitu pouze 0,4 Bq/l ^{226}Ra a 12 Bq/l ^{222}Rn . V Čimickém háji byly vzorkovány vývěry Dotek (0,04 l/s) a významnější vývěr Nad Rozvodnou (0,15 l/s), nacházející se nad vývěry v podzemí (obr. 2). Jsou to vody typu $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ s celkovou mineralizací 335 a 344 mg/l. Významný je zachycený pramen Haltýř (2 l/s). Vyvěrá v rokli pod botanicou zahradou v Troji a je typu $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ s celkovou mineralizací 690 mg/l. Všechny tři zdroje mají aktivity radionuklidů celkem nízké (tab. 1), pouze aktivity ^{226}Ra v obou zdrojích v Čimickém háji jsou mírně zvýšené. Povrchový průzkum byl tedy negativní, zde se žádný zdroj vody s výrazněji zvýšenou radioaktivitou nevyskytuje.

Diskuse

Studovaná podzemní voda vykazuje poměrně vysoký obsah uranu, vysoké aktivity radia i radonu má většina vzorků ze systematického vzorkování studovaných vývěrů. Ani nejvyšší zjištěnou hodnotou aktivity (1195 Bq/l ^{222}Rn) však ještě nedosahuje limitního obsahu minerální vody (1,5 kBq/l) podle lázeňského zákona (zákon č. 164/2001 Sb.).

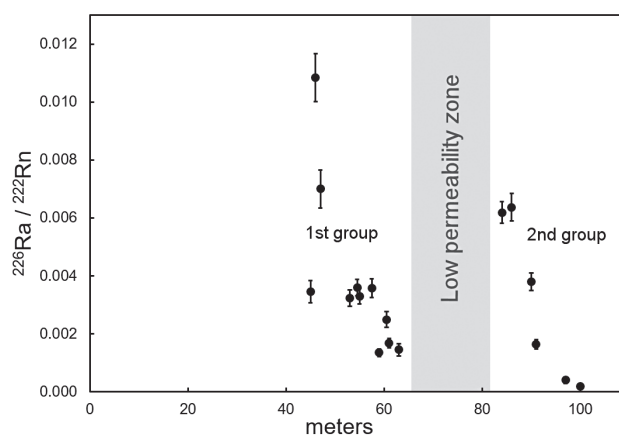
Aktivity radonu v námi zkoumaných vývěrech tvoří po sanaci homogennější skupinu s bližšími krajními hodnotami, s aktivitami v rozmezí 809–985 Bq/l ^{222}Rn mezi metrážemi 53 až 97 m, a aktivity prudce klesají na obou stranách v nižších i vyšších metrážích, kde jsou patrně okraje úseku horninového masivu způsobujícího zvýšenou aktivaci podzemních vod.

Celkovou délku úseku s horninami způsobujícími aktivaci podzemní vody radionuklidy uranové rozpadové řady tak můžeme stanovit na zhruba 50 m, resp. v detailu na dvě skupiny vývěrů o délce zhruba 20 m, oddělené cca 10 m hluchým úsekem bez výraznějšího zvodnění.

Rozdíly aktivit ^{222}Rn před sanací a po ní mohou být nejspíše způsobeny vyplněním prostor mezi vnějším pláštěm tunelu a samotnou horninou betonovou směsí a zamezením průniku vzduchu do horninového prostředí. Radon (^{222}Rn) tak nemůže z vody unikat dříve než ve vývěrech v samotném tělese KT.

Zajímavé informace přináší vývoj poměru $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$ v řadě vývěrů (obr. 8). Sledovaný poměr je charakteristický podobným vzorcem u obou skupin pramenů se strmým poklesem z nižších do vyšších metráží, kde se nejdříve vyskytují pouze vody bohatší radiumem, poté radiumem i radonem a na konci obou skupin vývěrů již pouze radonem, s výrazně nižšími aktivitami radia.

Charakter závislosti dokládá, že obě skupiny pramenů jsou relativně hydrogeologicky nezávislé, oddělené méně propustnou, nejspíše málo tektonicky porušenou zónou břidlic. Jiné chování radia a radonu souvisí s jejich rozdílnou migrační schopností, kdy extrémně mobilní radon je z aktivační zóny vynášen dále. Lokální směr proudění podzemní vody v kolektoru je tímto indikován směrem k jihu, ačkoli při inženýrskogeologickém průzkumu byl



Obr. 8. Vývoj poměru radia a radonu v pramenech ve vývěrovém úseku.

Fig. 8. Development of the radium/radon ratio in the springs in the spring section.

interpretován opačně (Habrnál 1976, převzato do obr. 3). Současný směr proudění však může být výsledkem změny hydrogeologických poměrů po vyražení tunelu.

Zdrojem aktivace mohou být teoreticky silicifikované sedimenty a křemičité hydrotermity (bulžníky) obohacené zejména v jz. části bohemia uranem, často s doprovodem vanadu (Mrázek – Pouba 1995). Povrchovým průzkumem však bylo zjištěno, že zdejší bulžníky mají radioaktivitu velmi nízkou a projevují se v terénu jako minima gama aktivity (terénní gamaspektrometrie na Velké skále ukázala pouze 0,5 % K, 2,5 ppm eU a 1,7 ppm eTh), tedy samy zdrojem aktivace být nemohou.

V neoproterozoiku bohemia se vyskytují, s ohledem na mineralizaci, dva druhy černých břidlic, normální (NBS – normal black shales) a bohaté na rudní minerály (HMBS – high metal-rich black shales) (Ackermann et al. 2019). Horniny, kterými přímo prochází KT Holešovice, můžeme řadit spíše k normálním břidlicím, obsahy uranu zvýšené nemají, ani pyrit, běžný v kovoносných břidlicích (Pašava et al. 1993), nebyl pozorován.

Indiciemi jsou výskyty měděné mineralizace v podobě chalkopyritu v karbonátových žilkách v břidlici na Ládví (Láznička 1963) a impregnace tetradritu v břidlici v sousedství bulžníku v nedalekých Úněticích, interpretovaná jako hydrotermální alterace a mineralizace v okolí silicitového tělesa (Velebil – Dolníček 2018). Jako nejpravděpodobnější se nám v této chvíli proto zdá geneticky podobný, i když hypotetický, drobný výskyt uranové mineralizace v hydrotermálně alterované břidlici v okolí bulžníku v prostoru nad tělesem tunelu, který může aktivaci vod na popsané lokalitě způsobovat.

Závěr

Objev vod s takto vysokou radioaktivitou je jistě v Praze velkým překvapením. Skupina vývěrů dosahuje aktivity až 1195 Bq/l ^{222}Rn (přítok na pozici 91 m, vzorkován 31. 5. 2019), což je pravděpodobně zatím nejvyšší naměřená hodnota na území Prahy. Kromě vysoké aktivity ^{226}Ra až

5,3 Bq/l a ^{222}Rn má voda také relativně vysoký obsah uranu, ale obsahy ostatních stopových prvků jsou zvýšené pouze mírně. Voda je neutrální, studená, typu Ca-Mg- HCO_3 , což je nejběžnější hydrochemický typ neoproterozoických hornin bohemia, s celkovou mineralizací 702 mg/l, celkový průtok zdrojů je okolo 2 l/s.

Prameny vyvěrají z neoproterozoických břidlic zbirožsko-šareckého pruhu (Belt I) blovického akrečního komplexu bohemia, charakteristického přítomností velkého množství silicitu (bulizníků). Aktivaci vod může způsobovat drobná uranová mineralizace v okolí tělesa bulizníků, která však přímo prokázána nebyla. Je poněkud škoda, že z hlediska radiologie voda překračuje normy pro pitnou vodu i kapalně vypustě podle „atomového zákona“, ale kritérií vod minerálních podle „lázeňského zákona“ ještě nedosahuje. Vývěr těchto vod se zvýšenou radioaktivitou proto zůstává pouze přírodovědnou raritou, na které je naše země tak bohatá.

Poděkování. Děkujeme firmě PREdistribuce za umožnění provedení výzkumných prací, kolegovi Josefu Müllerovi za asistenci při odběru vzorků v kabelovém tunelu a studentům a dalším příznivcům za aktivní účast na akci povrchového průzkumu lokality. Dík patří také recenzentům Jiřímu Tesařovi a Tomáši Vylitovi.

Literatura

- ACKERMAN, L. – PAŠAVA, J. – ŠÍPKOVÁ, A. – MARTÍNKOVÁ, E. – HALUZOVÁ, E. – RODOVSKÁ, Z. – CHRASTNÝ, V. (2019): Cooper, zinc, chromium and osmium isotopic composition of the Teplá-Barrandien unit black shales and implication for the composition and oxygenation of the Neoproterozoic-Cambrian ocean. – *Chem. Geol.* 521, 59–75.
- BEČKOVÁ, V. (2013a): Protokol o zkoušce č. 93/2013. – 2 str. MS SÚRO. Praha.
- BEČKOVÁ, V. (2013b): Protokol o zkoušce č. 201/2013. – 2 str. MS SÚRO. Praha.
- DROZD, K. (1980): Zpráva o technických postupech z hlediska snížení přítoků do kabelového tunelu v Praze-Holešovicích. Stavební geologie, n. p., Praha. – 7 str. MS Čes. geol. služba. Praha. (P 030660)
- HABRNÁL, L. (1976): IG průzkum pro kabelovou trasu Holešovice-Čimice. 154. PÚDIS, 3-0898-0010-06. – MS Čes. geol. služba. Praha. (P025257)
- HAJNÁ, J. – DÖRR, W. – KACHLÍK, V. – SLÁMA, J. (2018): New constraints from detrital zircon ages on proterozoic multiphase transition from the Cadomian accretionary orogen to a passive margin of Gondwana. – *Precamb. Res.* 317, 159–173.
- HAJNÁ, J. – ŽÁK, J. – ACKERMANN, L. – SVOJTKA, M. – PAŠAVA, J. (2019): A giant late Precambrian chert-bearing olistostrome discovered in the Bohemian Massif: A record of Ocean Plate Stratigraphy (OPS) disrupted by mass-wasting along an outer trench slope. – *Gondwana Res.* 74, 173–188.
- HAJNÁ, J. – ŽÁK, J. – KACHLÍK, V. (2011): Structure and stratigraphy of the Teplá-Barrandian Neoproterozoic, Bohemian Massif: A new plate-tectonic reinterpretation. – *Gondwana Res.* 19, 2, 495–508.
- KAPRASOVÁ, E. (1983): Vliv podzemních tunelových staveb na hydrogeologické poměry území velké Prahy. – 153 str. MS kandidát. disert. práce, PFF UK, Ústř. úst. geol. Praha. (P000102/1983)
- KUČERA, R. – RAČANSKÝ, J. – KRAMÁŘ, L. – BRŮČEK, P. – HEŠNAUR, L. – SKÁLA, Z. (2019): 70 let od zahájení těžby uranu na Příbramsku. – 216 str. DIAMO, s. p., SUL Příbram, GRASPO CZ, a. s. Zlín.
- LÁZNIČKA, P. (1963): Mineralogické výskyty měděných rud v algonkiu na sever od Prahy. – *Čas Mineral. Geol.* 8, 1, 87–89.
- LUSTIK, A. (2021): Radiohydrogeochemická charakteristika a geologická pozice vývěrů vod v kabelovém tunelu Holešovice-Čimice. – 32 str. MS bakal. práce, PFF UK. Praha.
- Malá, H. (2013): Protokol o zkoušce č. 44/2013: Měření obsahu přírodních radionuklidů. – 3 str. MS SÚRO. Praha.
- MRÁZEK, P. – POUBA, Z. (1995): Metallogenesis. In: DALLMEYER, R. D. – FRANKE, W. – WEBER, K., ed.: *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*, 411–414. – Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.
- NEZNAL, M. (2013): Dokumentace pro uvádění radionuklidů do životního prostředí – vypouštění odpadní vody z kabelového tunelu Holešovice do Vltavy. – 8 str., 4 příl. MS RADON, v. o. s. Praha.
- PAŠAVA, J. – SULOVSKÝ, P. – KOVALOVÁ, M. (1993): Geochemistry and mineralogy of proterozoic metal-rich black shales from the Bohemian massif, Czech Republic, with a description of possible new molybden selenide and telluride phases. – *Can. Min.* 31, 745–754.
- ŠKÁBOVÁ, M. – ROVENSKÁ-NAVRÁTILOVÁ, K. (nedatováno): Závěrečná zpráva za 2. etapu měření radioaktivity na pracovišti Kabelový tunel Holešovice. – 6 str. MS SÚRO. Praha.
- VELEBIL, D. – DOLNÍČEK, Z. (2018): Tetraedrit z Únětic – Holého vrchu u Prahy jako zdroj mědi supergenní mineralizace s azuritem a malachitem v proterozoických břidlicích. – *Bull. Mineral. Petrol.* 26, 1, 37–42.