

Tektonický a hydrogeologický vliv na stabilitu štol ve křtinském údolí

Tectonic and hydrogeological impact on stability of adits in the Křtiny Valley

Vít BALDÍK¹ – Jiří REZ² – Eva KRYŠTOFŮVÁ¹

¹ Česká geologická služba, pobočka Brno, Leitnerova 22, 658 69 Brno; vit.baldik@geology.cz

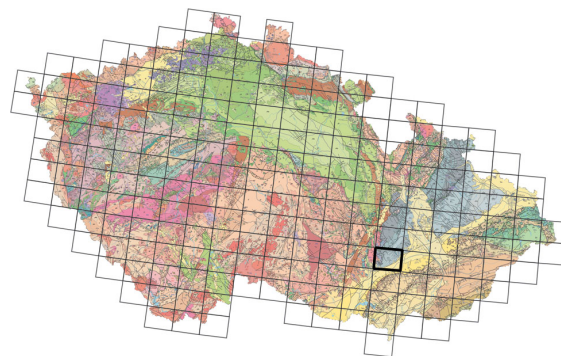
² ElTekto group for structural geology, Brno; www.eltekto.cz.

Please cite this article as: Baldík, V. – Rez, J. – Kryštofová, E. (2017): Tectonic and hydrogeological impact on stability of adits in the Křtiny Valley. – Geoscience Research Reports, 50, 147–151. (in Czech)

Key words: adit, stability, tectonic slice, faulting, caving, karst aquifer, groundwater, sinter crust

Summary: Four adits excavated in the Křtiny Valley at the beginning of 1950s were documented and monitored during last several years. Three of the adits (I to III) were excavated in limestones, namely Lower Givetian Lažánky Limestone of the Býčí skála cycle of the Macocha Formation. Adit IV started in biotitic granodiorites of the Brno massif, but after ca 200 meters Devonian rocks were encountered – Devonian basal clastics and then Lažánky Limestone. Stratigraphical succession is in normal order, but the contacts are tectonic. Devonian basal clastics are violet to greyish-green quartzitic sandstones with rare sericitized feldspars. Granodiorites and basal clastics also form tectonic slices (in one place boudinaged) along a major tectonic line documented in adits I and II. Both these rock types were additionally altered, suffered sericitisation and chloritisation, harder quartz grains were cataclased.

Walls and ceiling of the adits seem to be stable except for several shear zones documented in adit IV and I and II particularly. The shear zone in adits I and II has a massive, up to several meters thick gouge zone comprising highly strained granodiorite,



(24-41 Vyškov)

Devonian basal clastics and limestones. A very well developed fault gouge can be observed which is in places extremely fine grained and form bands several centimeters thick of distinctive rusty brown, grey or ochre coloration. This shear zone is highly unstable accompanied by massive cave-ins. Configuration of faults bordering this shear zone suggest further cave-ins in the future.

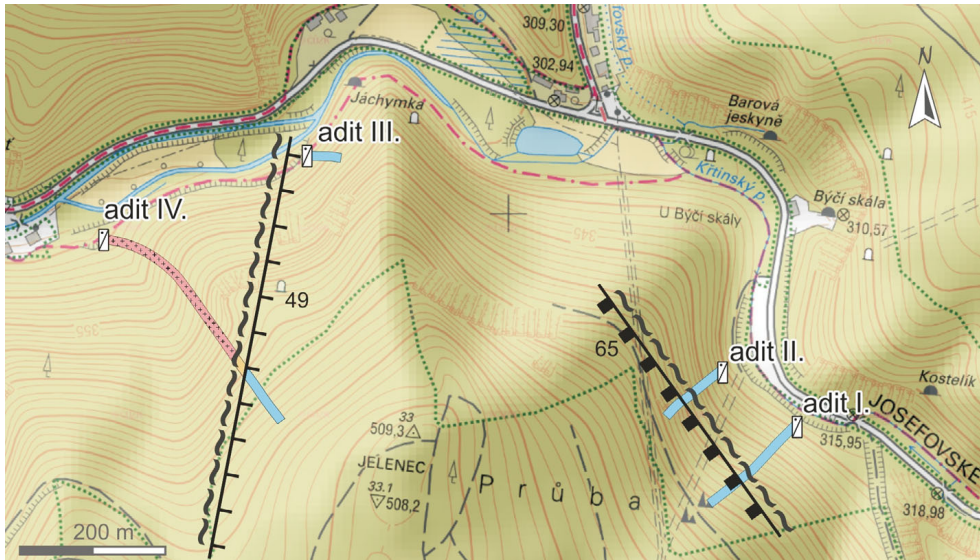
Groundwater flows into adits chiefly from surrounding karst aquifers, which are recharged by water infiltrating on the Babická plošina plateau. Chemical composition of groundwater is characterized by high calcium and bicarbonate content, which causes together with suitable conditions in the adits precipitation of sinter crusts. Water-saturation of faults is strongly affected by climatic conditions and while during dry periods the water-saturation is minor, it may increase rapidly after heavy rainfall or snow melting. Strong water-saturation of the faults decreases significantly stability of fault gouges and adjacent areas.

V padesátých letech minulého století byly ve křtinském údolí na úpatí kopce Jelenec vyraženy čtyři štoly (obr. 1). V roce 2009 byly tyto štoly revidovány ve spolupráci s CHKO Moravský kras (Baldík et al. 2012). Vzhledem k tomu, že dvě štoly (I a II) zachytily výraznou tektonickou poruchu s jílovitou výplní (viz dále), která výrazně porušuje stabilitu skalních stěn, jsou štoly v rámci posudkové činnosti příležitostně navštěvovány a jejich technický stav je sledován. Tento článek shrnuje pozorování posledních sedmi let.

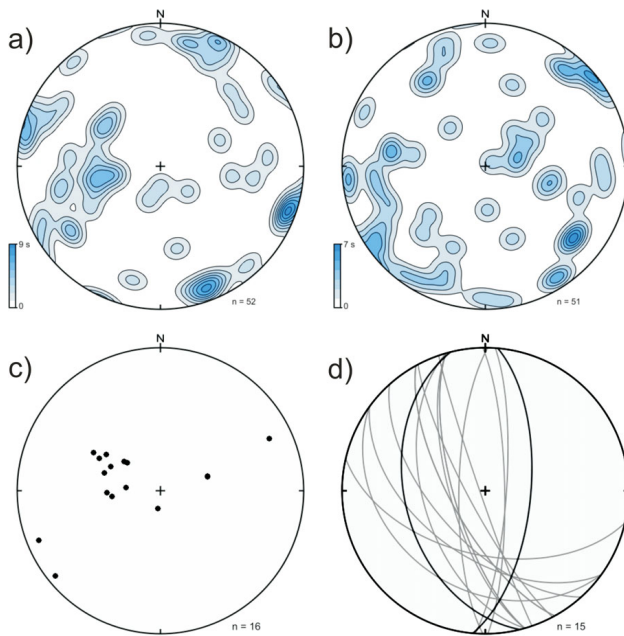
Geologická situace

Štoly byly vyhloubeny na svazích kopce Jelenec: štoly I a II na v. a štoly III a IV na sz. svahu (číslováno podle Dvořáka et al. 1961 po proudu Křtinského potoka; obr. 1). Štoly

I–IV byly raženy ve vápencích macošského souvrství v profilu 5 × 5 m, štola IV začala v horninách brněnského masivu, avšak po cca 200 m narazila na devonské sedimenty – bazální klastika a později i na vápence. Také štoly I a II zastihly horniny brněnského masivu a bazální klastika devonu, avšak ve formě tektonických šupin zavlečených do vápenců podél variských, alpínsky reaktivovaných zlomů (Baldík et al. 2012). Štola I je cca 150 m dlouhá a mírně se svažuje směrem k JZ. Těsně před jejím koncem je zával, za nímž je štola zhruba z poloviny permanentně zatopena. Také před závalem bývá zhruba od poloviny štoly voda až do výše pasu. Stejně směru je i štola II. Ta zatím nebyla doměřena do konce, protože stejně jako štola I je zavalená a její druhá polovina permanentně (místa až do stropu; obr. 4e) zatopená. Štoly I a II jsou si i jinak velmi blízké, mají stejný směr k JZ, zastihly stejné horniny i stejné struktury (viz dále). Štola III je velmi krátká, celoročně zatopená



Obr. 1. Topografická situace štol ve křtinském údolí (pro názornost jsou vyznačeny horniny, ve kterých byly štoly vyraženy, legenda viz obr. 3).
Fig. 1. Topographic situation of adits in the Křtiny Valley (for rock types legend see Fig. 3).



Obr. 2. Diagramy strukturálních prvků ze štol ve křtinském údolí (Lambertova projekce, spodní polokoule). a – konturový diagram pólů puklin ve vápencích (II. štola); b – konturový diagram pólů puklin v granodioritu brněnského masivu (štola IV); c – bodový diagram pólů ploch vrstevnatosti (štoly I–IV); d – obloukový diagram ploch zlomů (štoly I–IV); černé oblouky jsou zlomy ohraničující zával ve štole II).

Fig. 2. Equal area plots (lower hemisphere) of main structures in the Křtiny Valley. a – countoured plot of joints poles in limestones (adit II); b – countoured plot of joints poles in granodiorites of the Brno massif (adit IV); c – bedding planes poles (adits I–IV); d – great circles plot of fault planes (adits I–IV); black great circles denote marginal faults of the cave-in in adit II).

a po cca 30 m zastihla krasovou dutinu; její stěny pokrývá 1–5 cm mocná vrstva hrubě krystalického kalcitu a celá je vyplněna jílovitým materiálem. Štola IV, která byla jako jediná ražena v horninách brněnského masivu, je 350 m dlouhá, směřuje k JV a zachytila kontakt brněnského masivu s bazálními klastikami devonu i lažáneckými vápenci.

Horniny brněnského masivu (biotitické granodiority) byly zastihly štoly I, II a IV. V prvních dvou jde o silně alterované, místy budinované tektonické šupiny. Petrograficky to je středně zrnitý kataklazovaný granodiorit. Hornina se skládá z porfyroklastických zrn křemene, živců a chloritu se základní hmotou tvořenou křemenem, sericitem a karbonáty. Xenomorfně omezený křemen tvoří silně undulozně zhášeující, až 3 mm velká, popraskaná zrna. Živce jsou zcela rozloženy na sericit.

Bazální klastika devonu jsou vyvinuta jako fialově šedé až zelenošedé, místy silně alterované pískovce. Z klastické složky je většinou přítomen pouze křemen, ojediněle se nacházejí zcela sericitizované živce. Základní hmota má bazální charakter, koroduje okolní zrna a tvoří ji karbonát a jílové minerály. Pískovec je zrnitostně špatně vytříbený, klastická zrna mají velikost 0,1–3 mm. Křemenná zrna jsou většinou tvarově polozaoblená až poloostrohranná, silně undulozní a rozpraskaná.

Vápence zastihlé všemi štoly patří druhému sedimentačnímu cyklu – cyklu Byčí skály. Jde o vápence spodního givetu, patrně přechodné vápence mezi josefovskými až lažáneckými (byly nalezeny i polohy s lumachelami brachiopodů). Jsou to vápence vysloveně mělkovodní, pravděpodobně lagunární sedimenty a sedimenty začínající karbonátové sedimentace.

Z tektonického hlediska jsou nejzajímavější štoly II a IV. Ve štole II byly zachyceny dvě důležité křížící se tektonické linie – pravděpodobně starší násunový zlom s duplexovitou stavbou je křížen mladší a strmější zlomovou linií se zavlečenými tektonickými šupinami brněnského masivu a bazálních klastik. Tento původně variský(?) zlom byl pozděně alpínsky reaktivován, což se projevilo vznikem několik metrů mocné zóny tektonického jílu, vzniklého jak z granodioritu, tak i z bazálních klastik. Tato mladší, alpínsky reaktivovaná tektonická zóna byla zachycena i štolou I, ovšem bez staršího násunu s duplexovitou stavbou. Proto je celková mocnost jílovité zóny ve štole I podstatně menší, cca 1–1,5 m. Ve štole IV byl zachycen kontakt brněnského masivu s bazálními klastikami a na ně nasedajícími vápenci.

Přestože je zachována relativní stratigrafická posloupnost sledu, intenzivní deformace na kontaktech, která se ve vápencích projevuje deformační zónou mocnou až několik desítek metrů, potvrzuje tektonizaci původně stratigrafických kontaktů.

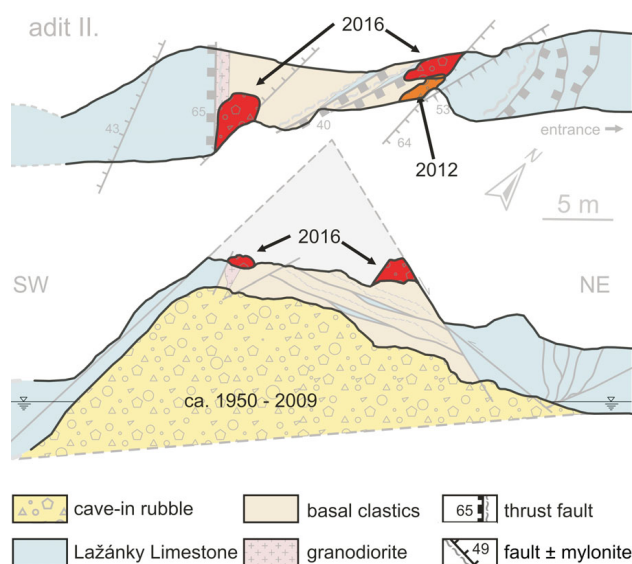
Stabilita skalních stěn

Všechny štolý jsou vyraženy v nezávětralých skalních horninách. Na stabilitu skalních stěn mají tedy hlavní vliv diskontinuity – vrstevnatost, pukliny a zlomy. Vzhledem k tomu, že jsou štolý v nezámrzných hloubkách, neovlivňují stabilitu stěn sezónní výkyvy teplot. Hlavním faktorem tak zůstává skapová voda, která ovlivňuje hlavně kohezi jílovitých výplní zlomů.

Ve štolách II a IV byla měřena orientace puklin a určena puklinatost podle modifikace RQD v liniových podzemních dílech (Palmströ 1982). Z diagramů na obr. 2a a 2b vyplývá, že ve vápencích i v granodioritech je vyvinuto větší množství systémů puklin, a to jak subvertikálních (a tedy nevýhodně orientovaných), tak i relativně ploše ukloněných. Tuto mnohdy nevhodnou orientaci puklin do jisté míry zmírňuje nevysoká hustota puklin, respektive značná velikost jednotlivých bloků. Hodnoty RQD jak pro vápence, tak pro granodiority dosahují velikosti nad 75, jde tedy o dobrou kvalitu horninového prostředí. Jednotlivé bloky dosahují velikostí přibližně 8–45 cm u vápenců a 12–100 cm u granodioritů. Velmi dobrou stabilitu stěn dokládá také relativně malé množství vypadaných bloků nacházejících se ve štolách (obr. 3b, f), které se za 65 let jejich existence nashromáždily. Většina stěn je pokryta různě silnou vrstvou bahna, čistá hornina se ukazuje pouze na několika málo místech, kde došlo k vypadnutí bloku. Ve vápencích se k puklinám přidává vrstevnatost, která se mírně uklání k JV (obr. 2c). Kombinace subvertikálních puklin minimálně tří systémů s mírně ukloněnou vrstevnatostí se projevuje vyšším vypadáváním bloků ze stropů štol, než je tomu u štol IV, vyražené v granodioritech. Ve štolě IV se poblíž kontaktu brněnského masivu a bazálních klastik nachází drobný zával (respektive tři drobné závaly) s kubaturou kolem 1 m³ (obr. 4a). Ztrouchnivělé zbytky výdřevy dokládají, že strop štol byl nestabilní již při ražbě, kdy bylo přistoupeno k zapažení nestabilního místa. Nestabilitu stropu v tomto místě způsobila přítomnost několika zlomů. Od roku 2009, kdy zde práce započaly, nebylo zaznamenáno řízení stropu.

Ve štolách I a II byly dokumentovány masivní závaly, které vznikaly pravděpodobně postupně během 65 let od jejich vyražení. Ve štolě I jde o zával o celkové kubatuře cca 100 m³, ve štolě II o zával o celkové kubatuře cca 1500 m³. Oba závaly jsou jednoznačně vázány na jílovitou deformační zónu alpsky reaktivovaného zlomu popsaného výše. Rozdíl v kubatuře jsou dány intenzitou křehké deformace v okolí této deformační zóny.

Ve štolě I není bezprostřední okolí tohoto zlomu výrazně deformováno, skalní prostředí je tedy velmi stabilní a vypadaný materiál je v podstatě pouze jílovitý materiál smíchaný s materiálem tektonických šupin střížné zóny. Pů-



Obr. 3. Revidovaná situace závalu ve štolě II (půdorys a podélný řez chodbou). Oranžově je vyznačen zával z roku 2012, červeně závaly z roku 2016.

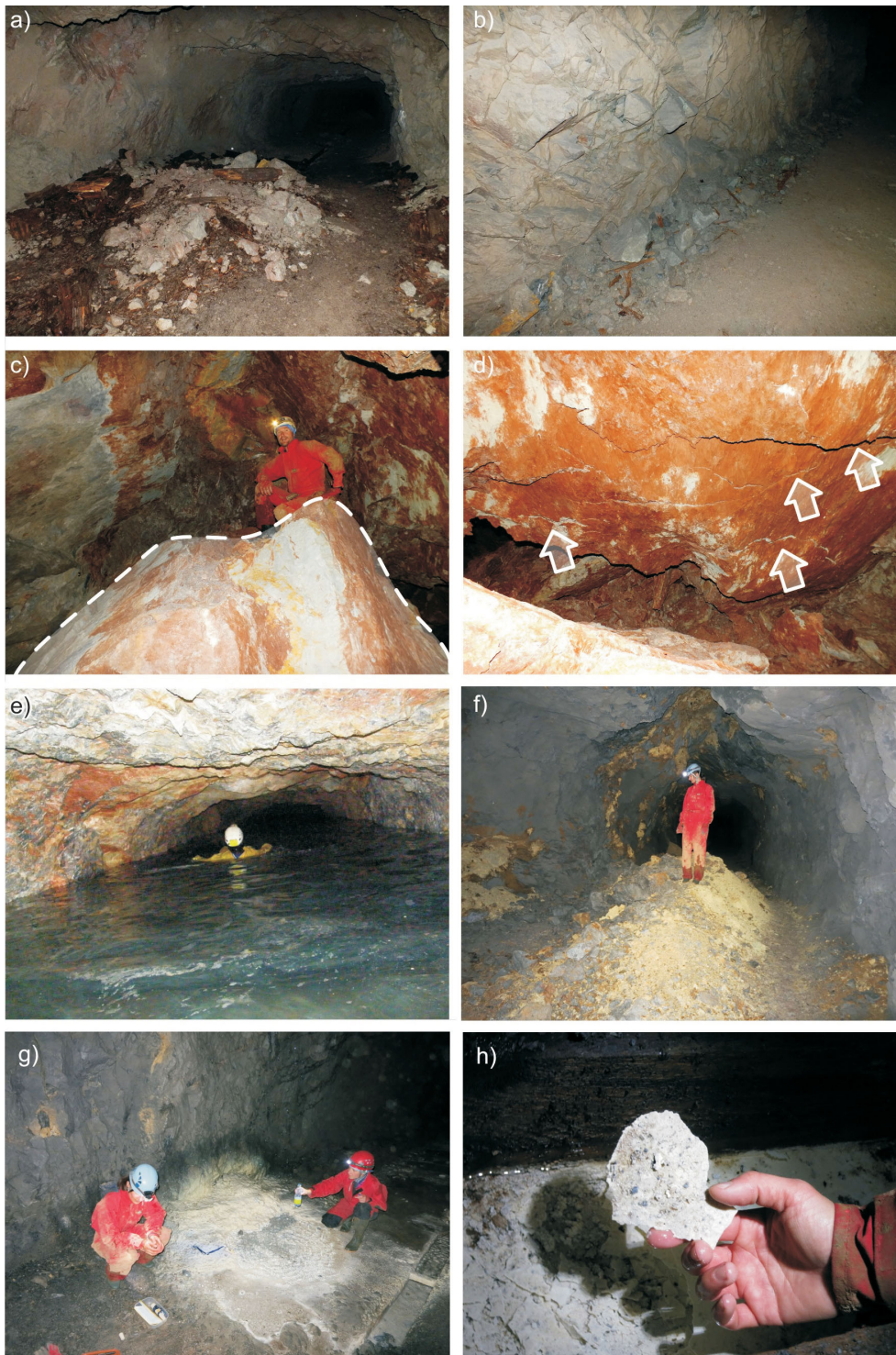
Fig. 3. Revised situation of adit II cave-in (floor plan and cross-section along the adit). 2012 cave in is in orange, 2016 cave-in is in red.

vodní profil štolý narušuje pouze úzký strmý výběžek, jakýsi komín, který vznikl po vypadnutí deformovaného materiálu ze zlomu. Okolí tohoto zlomu je stabilní.

Ve štolě II je situace diametrálně odlišná. Jak již bylo uvedeno, v této štolě se křížují dvě tektonické zóny, starší plošší násunový zlom s duplexovitou stavbou se kříží s mladším, alpsky reaktivovaným zlomem, dokumentovaným i ve štolě I. Následkem toho došlo k podstatnému zvýšení mocnosti alpské reaktivace, spojené se vznikem velkých objemů tektonického jílu. V důsledku toho je také kubatura závalu podstatně větší než ve štolě I. Tento zával navíc omezují z obou stran mladší zlomy, na JZ zlom s orientací 256/43, na SV zlom s orientací 95/65 (obr. 3), i když v tomto případě není omezení tak ostré jako v případě jihozápadního ohraničení (obr. 3), skalní stěna je nestabilní i dále na SV od tohoto zlomu. Od počátku geologické dokumentace a namátkového monitoringu štol došlo ke dvěma dalším řízením ve štolě II. V roce 2012 došlo ke zřícení cca 2 m³ stropu u sv. ohraničení závalu a v roce 2016 se zřítil strop na dvou místech – cca 1 m³ u jihozápadního a cca 4 m³ u severovýchodního zlomu (obr. 3, 4c). U severovýchodního zlomu lze v tektonickém jílu pozorovat vznikající tahové pukliny (obr. 4d), které indikují další pohyby. Prostou extrapolací obou okrajových zlomů lze odhadnout, že v nejbližších letech dojde pravděpodobně k postupnému zřícení trojúhelníkového bloku horniny o celkové kubatuře cca 470 m³ (šedá plocha na obr. 3).

Hydrogeologie a hydrologie

Většina vody, která přitéká do štol I–IV v Josefovském údolí, pochází z krasovo-puklinových kolektorů vázaných na devonské vápence, které jsou dotovány vodou z oblasti



Obr. 4. Fotografická dokumentace štol ve křtinském údolí. a – zával ve štolě IV se zbytky výdřevy; b – bloky vypadané ze stěn a stropu štol IV; c – zával z roku 2016 ve štolě II; d – tahové pukliny ve stěně/stropu štol II – nově vznikající zával; e – permanentně zaplavená část štol I za závalem; f – bloky vypadané ze stropu a stěn štol II; g – intenzivní skap ve štolě IV; h – sintrové krusty v odvodňovacím žlábků ve štolě IV.

Fig. 4. Photographic documentation of the Křtiny Valley adits. a – adit IV cave-in with timbering remnants; b – blocks fallen off the walls and ceiling of adit IV; c – 2016 cave-in in adit II; d – extension fractures in adit II wall/ceiling – a newly developing cave-in; e – permanently flooded part of adit I behind a cave-in; f – blocks fallen off the walls and ceiling in adit II; g – intensive water inflow into adit IV; h – sinter crusts in the drainage groove in adit IV.

Babické plošiny. Původ podzemní vody v kolektorech devonských vápenců potvrzují i hodnoty základních hydrochemických parametrů, naměřené v průběhu terénního šetření v červnu 2016 a uvedené v tabulce 1. Poněkud vyšší zjištěné hodnoty pH v rozmezí 7,45–8,05 jsou typické pro podzemní vody, které mají původ v karbonátovém prostředí. Na základě výsledků chemických analýz provedených v průběhu hydrogeologického mapování v letech 2012 a 2013 je podzemní vody v kolektorech devonských vápenců možné charakterizovat jako vody základního chemické-

ho typu Ca-HCO_3 s výraznou převahou iontů Ca^{2+} a HCO_3^- . Celková mineralizace dosahuje hodnot do $0,60 \text{ g.l}^{-1}$.

Dno štol I bylo v červnu 2016 po delším bezsrážkovém období zatopeno vodou, přičemž na jejích stěnách jsou patrné stopy po výrazně vyšším zatopení. Hlavní přítok vody do štol se nepodařilo lokalizovat.

Štola II byla v době terénního šetření v červnu 2016 za závalem zatopena vodou téměř ke stropu. Vlastní přítok vody do této štol se nepodařilo zjistit ani při průzkumu její zatopené části. V prostoru před závalem vzniklo jezírko

stojaté vody o hloubce do 0,5 m, dotované ze zadní části štoly průsakem přes zával, přední část štoly byla suchá. V tělese závalu však byly patrné výrazné erozní rýhy, způsobené tekoucí vodou patrně po intenzivní dotaci po vydatných srážkách nebo tání sněhu. Rovněž na stěnách štoly jsou patrné stopy po výrazně vyšším zatopení vodou. Vlastní tektonická zóna vyplněná velkým objemem tektonického jílu byla červnu 2016 zvodněná pouze nepatrně a přítoky vody po zlomových plochách a tahových puklinách byly minimální.

Velmi krátká štola III je celoročně zatopena vodou, která z ní vytéká na povrch za vzniku pěnovcové kaskády v tzv. Travertinovém prameni. Na základě hydrogeologických měření realizovaných v Josefovském údolí v průběhu hydrogeologického mapování v letech 2012 a 2013 je možno konstatovat, že vydatnost Travertinového pramene kolísala v tomto období v rozmezí tří řádů od 0,005 do 0,500 l.s⁻¹. Podobné výkyvy vydatnosti v závislosti na klimatických podmínkách a dotaci podzemních vod lze očekávat i v ostatních štolách v zájmové oblasti.

Ve štole IV je hlavním zdrojem vody intenzivní skap ze stropu štoly (obr. 4g). Skapová voda je silně nasycená hydrogenuhlíčanem vápenatým, který se v prostoru štoly sráží za vzniku krápníkových útvarů na stropě i podlaze štoly a sintrových povlaků i krust na hladině vody (obr. 4h), protékající štolou v odvodňovacím žlábků. V této štole se poblíž kontaktu brněnského masivu a bazálních devonských klastik nachází několik zlomů, vyplněných tektonickými jíly, a množství podzemní vody, která po nich přitéká do prostoru štoly, je minimální.

Závěr

Výzkumy z roku 2009 a následný příležitostný monitoring potvrdily relativní stabilitu skalního masivu zkoumaných štol s výjimkou úzce lokalizovaných tektonických zón. Jde hlavně o střížnou zónu zachycenou štolami I a II, vyplněnou tektonickým jílem. Zatímco ve štole I dochází pouze k vypadávání jílovitého materiálu samotné střížné zóny, přičemž okolní vápence jsou stabilní, ve štole II tato střížná zóna interferuje jak se starší, pravděpodobně variskou deformační zónou s detailní duplexovitou stavbou, tak i s mladšími zlomy. V důsledku této interference dochází

Tabulka 1. Základní hydrochemické parametry vod ve štolách I, III a IV naměřené v červnu 2016

Table 1. Basic hydrochemical characteristics of water in adits I, III and IV in June 2016

štola – místo měření	pH	EC (μS.cm ⁻¹)	t (°C)
II – chodba za závalem	7.45	670	9.9
III – pěnovcová kaskáda	7.82	690	8.5
IV – skap	8.05	660	8.3

EC – měrná elektrická vodivost, electrical conductivity

k vypadávání nejen jílovitého materiálu střížné zóny, ale i okolních vápenců. Z konfigurace zlomů (obr. 2, 3) vyplývá, že i nadále bude docházet k řízení stropu štoly (šedá plocha na obr. 3).

Zvodnění tektonických zón bylo po delším bezesrážkovém období v červnu 2016 minimální. Lze však očekávat, že po intenzivní dotaci prostřednictvím vydatných atmosférických srážek nebo tání sněhu se množství podzemní vody proudící po tektonických zónách zvýší i přes částečně izolační funkci tektonického jílu. Mocná poloha tektonického jílu není zcela jednotná a existují v ní pukliny a propustnější zóny, které fungují jako preferenční cesty pro pohyb podzemní vody. Kolísání množství podzemní vody proudící po zlomových zónách snižuje soudržnost a stabilitu jílové výplně zlomového pásma a usnadňuje vypadávání dalších bloků horniny.

Poděkování. Výzkum byl podpořen posudkovou činností České geologické služby č. 350000 a geologickým mapováním v oblasti Brněnsko č. 321180. Autoři děkují CHKO Moravský kras (dr. A. Tůmovi) za povolení vstupu do štol.

Literatura

- BALDÍK, V. – REZ, J. – OTAVA, J. – GILÍKOVÁ, H. (2012): Revize geologické dokumentace štol ve Křtinském údolí, Moravský kras. – Geol. Výzk. Mor. Slez. 19, 96–103.
- DVORÁK, J. et al. (1961): Zpráva o výzkumném úkole č. X. Základní výzkum moravského paleozoika, část I. Závěrečná zpráva o základním výzkumu devonu a spodního karbonu Moravského krasu. – MS Čes. geol. služba. Praha.
- PALMSTRÖM, A. (1982): The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock jointing. – Proc. IV Congr. Int. Assoc. Engng. Geology 2, 221–228. New Delhi.