

Příčina prudkého snížení průtoků některých menších toků ve středních Čechách v létě 2019 a extrémně nízkých specifických odtoků: vliv evapotranspirace z příbřežní zóny toku a ploch s mělkou hladinou podzemní vody

Cause of rapid decrease of discharge of minor streams in Central Bohemia during summer 2019, and extremely low specific runoff: effect of evapotranspiration from riparian zone and areas with shallow groundwater table

JIŘÍ BRUTHANS^{1,2} – RENÁTA KADLECOVÁ² – MARTIN SLAVÍK¹ –
MAGDALENA KRÁLOVÁ² – TOMÁŠ FRYČ³ – JAN ČURDA²

¹ Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, Praha 2, 128 00; bruthans@natur.cuni.cz, martin.slavik@natur.cuni.cz

² Česká geologická služba, Klárov 3, Praha 1, 118 21; renata.kadlecova@geology.cz, magdalena.kralova@geology.cz, jan.curda@geology.cz

³ Český hydrometeorologický ústav, pobočka Praha, Na Šabatce 17, Praha 4, 143 06; tomas.fryc@chmi.cz

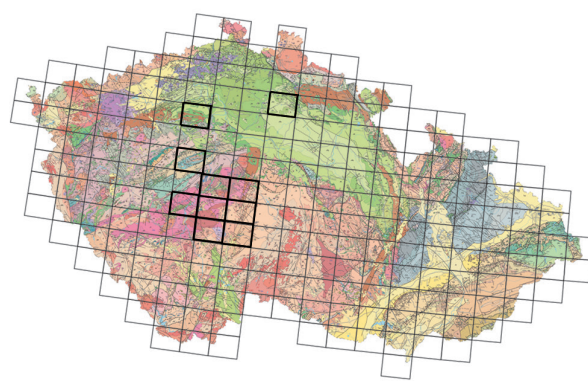
Please cite this article as: Bruthans, J. – Kadlecová, R. – Slavík, M. – Králová, M. – Fryč, T. – Čurda, J. (2020): Cause of rapid decrease of discharge of minor streams in Central Bohemia during summer 2019, and extremely low specific runoff: effect of evapotranspiration from riparian zone and areas with shallow groundwater table. – Geoscience Research Reports, 53, 1, 47–54. (in Czech)

Key words: alluvium, base flow, water scarcity, evapotranspiration, groundwater, remediation measures

Summary: In the years 2018 and 2019, an extremely low specific discharge in several streams in Central Bohemia was observed. For example, the Brzina stream with the catchment area of 133 km² was dry for part of the summer in both years (Figs 1, 2; Table 1). To determine the cause of very low discharge of streams, the following methods were applied: (i) streamflow measurements in high summer, (ii) hydrograph analysis during spring and summer, (iii) calculation of potential evapotranspiration (PET), and its comparison to the stream discharge and antecedent precipitation index (API), (iv) comparison of discharge and baseflow of springs.

Field measurements confirmed extremely low specific discharge of some streams in the peak summer in Central Bohemia indicated by a long term monitoring of the Czech Hydrometeorological Institute. The specific discharge of some streams (within the catchment area exceeding 100 km²) dropped below 0.1 l/s/km². Alluvium transmissivity is too low to explain such a low stream discharge by groundwater flow parallel with the stream course. The water abstraction is also too low to play important role.

Based on various approaches, the intense evapotranspiration in the summer period from that part of alluvium, where the groundwater level and stream water are within the reach of plant roots (PET



(03-34, 12-21, 12-41, 12-44, 13-33, 22-21, 22-22, 22-24, 23-11, 23-13)

alluvium), is probably the major cause for a decrease of discharge to very low values (Fig. 1). This assumption is supported by the times of the lowest discharges corresponding to the highest summer temperatures (Fig. 4), extremely high PET during the summer, and a rapid drop in baseflow of streams observed in June 2019 (Fig. 2). In agreement with this assumption, the yield of springs unaffected by evapotranspiration from the PET alluvium has not decreased considerably (Fig. 3). Based on the obtained data, and providing that the PET alluvium occupies about 2–5% of the catchment, this can result in the total loss of stream discharge in the hot summer period in Central Bohemia (mean specific base flow 1–2 l/s/km²).

Providing that some, recently favored, remediation measures will be taken in the future, such as streambeds return to near-natural state or plugging the underground artificial drainages to increase the water table in adjacent alluvial plain and to get larger storage capacity and consequently to increase the streamflow during dry periods, an opposite result is likely to occur. The rise of water table will boost up the evapotranspiration in summer, and thus decrease the stream discharge. This clearly shows that intense evapotranspiration from the PET alluvium must be considered an important part of the hydrologic balance, and its effect should be taken into account when planning the remediation measures and actions. The evapotranspiration from the PET alluvium should also be considered when calculating the upper limit for groundwater abstraction and for minimum streamflow to limit surface water withdrawal. The effect of evapotranspiration from alluvium on streamflow in hot summer seems to be underestimated or even ignored issue in the Czech Republic

V letech 2018 i 2019 došlo na některých tocích ve středních Čechách k extrémnímu snížení specifických odtoků. Příkladem je tok Brziny na Sedlčansku s povodím o ploše 133 km², který po část léta zcela vysychal. V hydrogeologii je z pozorování pramenů známo, že základní odtok, který tvoří veškerý odtok za sušších období, by měl klesat velmi pomalu podle exponenciálního vztahu, kdy rychlost poklesu průtoku se v čase neustále zpomaluje (Mailletova rovnice, Maillet 1905). Je proto překvapivé, že může dojít k úplnému vyschnutí toků v tak rozsáhlých povodích. Vysvětlením tohoto jevu mohou být v zásadě tři faktory nebo jejich kombinace: 1) vody povrchového toku zapadly pod dno koryta, protože propustnost kvartérních fluvialních sedimentů nebo podložních hornin dovoluje, aby se veškerý odtok odehrával podzemní cestou; 2) v teplejších obdobích dochází k tak masivní evapotranspiraci, že voda se z náplavů podél toku vypařuje a tím ubývá i z toku, až po jeho úplné vyschnutí; 3) voda se intenzivně odčerpává z toku nebo dochází k velkým odběrům podzemní vody v příslušném povodí. Je třeba určit, který z faktorů je příčinou ztráty průtoku povrchových toků, protože každý z nich vede k velmi odlišným důsledkům. Například v případě, že povrchová voda infiltruje do kvartérních sedimentů, je možné počítat se značnými zdroji podzemní vody, které lze ze sedimentů využívat. Pokud se voda naopak ztrácí převážně výparem z ploch, kde je hladina podzemní vody mělko pod terénem, je při očekávaném prodloužení a zintenzivnění teplejších období v budoucnu možné předpokládat větší míru vysychání toků. V Česku je evapotranspirace nejvýznamnějším členem hydrologické bilance, který odvádí vody pryč z povodí. Na základě dlouhodobých řad pozorování ČHMÚ z let 1970–2000 dosahuje evapotranspirace i v horských oblastech 50% úhrnu srážek a v nížinách je to až přes 90% úhrnu srážek (Bruthans – Soukup 2011, Oulehle 2019). Pouze zbývající procenta odpovídají odtoku podzemní a povrchovou vodou.

Metodika

Pro řešení nastíněné problematiky bylo zvoleno kombinování měření průtoků v terénu s analýzou časových řad průtoků naměřených ČHMÚ, doplněné o výpočet potenciální evapotranspirace (PET). Potenciální evapotranspirace je evapotranspirace za situace, kdy rostliny mají nelimitovaný přístup k půdní vodě (vodě z nenasycené zóny), takže výpar odpovídá jen vstupující energii nutné k přeměně skupenství vody, výpar není nijak limitován nedostatkem vody.

Průtok na vybraných vodních tocích byl měřen metodou stopovačů. Jedná se o metodu pracující na principu ředění známého množství konzervativního stopovače, kdy průtok toku je určen z míry zředění stopovače (Kilpatrick – Cobb 1985, Käss et al. 1998, Kopáč 2007). Metoda má velmi dobré výsledky u menších toků s nepravidelnými profily koryt do průtoku cca 1000 l/s. K měření bylo použito malého množství NaCl. Koncentrace rozpuštěného NaCl v toku byla sledována pomocí automatického měření konduktivity v kroku 5 sekund. Vztah mezi množstvím NaCl a navýšením konduktivity byl získán kalibrací. K měření

byly využity konduktometry Cond 3310 s automatickým záznamem 5000 hodnot (výrobce Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG, WTW). Konduktometry byly rozmístěny rovnoměrně přes celé koryto. Měřilo se obvykle 3 až 4 přístroji ve 3 opakováních (tj. 3 injektaže stopovače). Průtoky a kalibrace byly zpracovány v aplikaci Visual Basic „prutok.xls“. Celkem bylo získáno pro každý profil až 12 nezávislých hodnot průtoků. Ze všech měření byl spočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

Potenciální evapotranspirace byla vypočtena podle Oudina et al. (2010) stejným způsobem, jako je využívána v modelu Bilan (2019). Teploty a vlhkost vzduchu pro výpočet PET byly měřeny v kroku 30 minut v oblasti Čerčan na Benešovsku a byly přepočteny na denní průměry pro použití v modelu.

Pro srovnání srážek s PET byly denní hodnoty srážek přepočteny na index předchozích srážek ($index_0$) podle následujícího vzorce, který se liší od běžné definice indexu předchozích srážek:

$$index_0 = \frac{\sum_{i=-30}^0 w_i S_i}{\sum_{i=-30}^0 w_i} \quad \text{s vahami} \quad w_i = 30 - |i|$$

Kde číselný index i značí počet dní předcházejících dni, pro který je index srážek ($index_0$) počítán. Srážky v daném dni (S_i) jsou tedy násobeny vahou w_i 30, srážky z předcházejícího dne vahou 29 a tak dále až po dvacátý devátý předcházející den, kdy jsou srážky násobeny vahou 1. Poté se všechny hodnoty sečtou a vydělí sumou vah. Aplikací vzorce se redistribuuje signál srážek do jisté míry podobně jako v odtoku. Vzorec ale nemění souhrnný úhrn srážek za období delší než 30 dní.

Byly sestaveny hydrogramy z průtoků vybraných toků sledovaných ČHMÚ se zaměřením na přechod jarního, poměrně vodného období do období velmi nízkých odtoků v červnu 2019. Hydrogramy toků byly srovnány s odtokem podzemní vody z vybraných lokalit (oblast Chýnova a Českého krasu).

Výsledky

Terénní měření průtoků

Ve dnech 25. června až 10. července 2019 bylo ve výrazně suchém a velmi teplém období provedeno na vybraných tocích ve středních Čechách měření průtoků pro ověření extrémně nízkých specifických odtoků indikovaných na některých tocích měřeními ČHMÚ. U většiny toků byly zjištěny specifické odtoky mezi 0 a 0,25 l/s/km², což jsou extrémně nízké hodnoty (tab. 1). Vyšší hodnoty (okolo 0,5–0,6 l/s/km²) byly zjištěny pouze na drobných tocích zařízých do skalního podkladu bez nivy nebo s úzkou nivou. Nebyla zjištěna korelace mezi specifickým odtokem a střední nadmořskou výškou povodí, ani s podílem délky říční sítě vůči ploše povodí, ani se spádem toku. Zdá se, že velmi nízké odtoky jsou vázány zejména na vějířovitá povodí, tj. povodí sestávající z řady drobnějších a přitom značně dlouhých toků s relativně plochým a širokým údo-

Tabulka 1. Terénní měření s charakteristikami povodí (údaje ve sloupcích 4–7 z databáze DIBAVOD VÚV TGM), ostatní vlastní měření. Ve sloupci průtok je uveden aritmetický průměr \pm směrodatná odchylka průtoků a v závorce počet měření průtoků na daném profilu
 Table 1. Field measurements including catchment characteristics. In the column discharge, the arithmetic mean \pm standard deviation is listed, and in parentheses there is the number of discharge measurements in the given profile

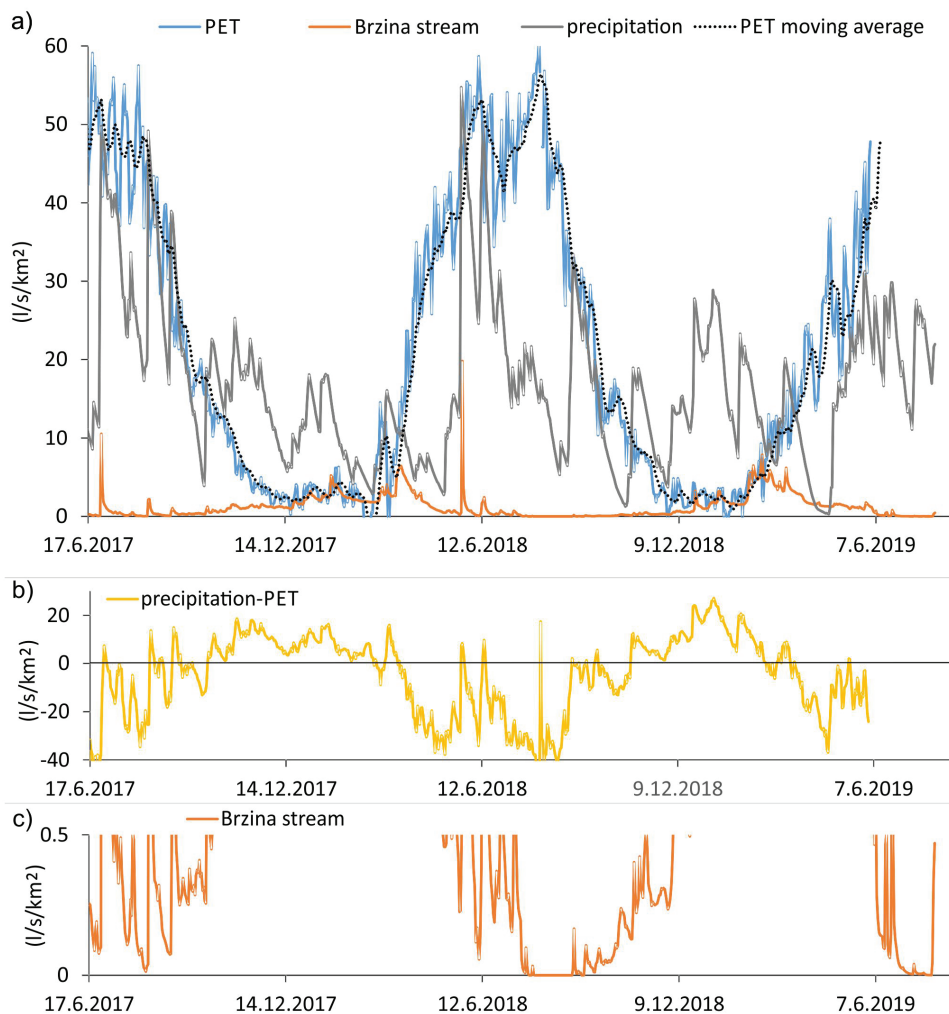
N	E	Profile	Catchment area (km ²)	Ratio of stream course and catchment (km ⁻¹)	Stream gradient (%)	Mean catchment elevation (m a. s. l.)	Date	Discharge (l/s)	Base flow (l/s/ km ²)	Other measurements
49.53602	14.34873	Brzina below Mašov village	4.8	1.8	2.4	526	25.6.2019	3.1 \pm 0.2 (12)	0.64	
49.56376	14.34573	Brzina above Varovský stream	16.2	1.7	1.7	506	25.6.2019	3.4 \pm 0.2 (11)	0.21	
49.58331	14.31932	Brzina below Předbořický stream	49	1.5	1.4	507	25.6.2019	3.4 \pm 0.4 (8)	0.07	
49.66151	14.30155	Brzina (Hrachov)	133.2	1.4	1	475	25.6.2019	27.5 \pm 1.1 (9)	0.21	0 l/s (10. 7. 2019)
49.53597	14.35243	Inflow to Brzina	2.2	1.7	4.4	540	25.6.2019	0.5 \pm 0.02 (6)	0.20	0 l/s (10. 7. 2019)
49.56364	14.34698	Varovský stream	14.8	1.5	2.8	534	25.6.2019	0	0	0 l/s (10. 7. 2019)
49.5812	14.31387	Předbořický stream	18.8	1.4	1.4	501	25.6.2019	0.5 \pm 0.02 (6)	0.03	
49.61008	14.31583	Počepický stream	26.3	1.1	2.1	498	25.6.2019	5.1 \pm 0.1 (9)	0.19	0 l/s (10. 7. 2019)
49.71492	14.41579	Mastník (Radíč)	268.6	1.5	0.7	480	30.6.2019	67 \pm 5.8 (12)	0.25	
49.72279	14.43811	Křečovický stream	52.9	1	1.5	425	30.6.2019	5 \pm 0.2 (12)	0.09	
49.63187	14.44427	Sedlecký stream	123.7	1.4	1.5	484	1.7.2019	7.4 \pm 0.4 (12)	0.06	
49.84553	14.45694	Krňanský stream*	5.7	1.3	3.7	377	30.6.2019	2.9 \pm 0.2 (8)	0.52	1.6 \pm 0.04 l/s (9) 10. 7. 2019
49.82253	14.45612	Teletínský stream*	1.9	1	7.1	386	30.6.2019	1.1 \pm 0.02 (12)	0.62	
49.82217	14.45355	Třeblová stream	8.2	1.2	3.2	392	30.6.2019	1.9 \pm 0.1 (8)	0.23	
49.72148	14.37892	Musík stream	35.6	1	1.3	384	30.6.2019	0.5 \pm 0.02 (8)	0.02	
49.60928	14.21539	Jahodový stream	6.2	0.7	3.7	425	30.6.2019	0.8 \pm 0.01 (8)	0.13	
49.52286	14.21171	Žebrákovský stream	11.1	1.2	2.7	496	30.6.2019	0.4 \pm 0.1 (8)	0.04	
49.4227	14.27899	Hrejkovický stream	58.2	1.4	0.8	499	1.7.2019	3 \pm 0.2 (12)	0.05	
49.75169	14.88937	Chotýšanka (Slověnice)	117.1	1.4	0.7	478	6.7.2019	7.8 \pm 0.2 (9)	0.07	
49.99262	14.16004	Loděnice (Loděnice)	253.9	1.3	0.4	407	6.7.2019	16.8 \pm 1.0 (9)	0.07	
49.9692	14.13268	Loděnice above Svatý Jan	265.5	1.3	0.4	407	6.7.2019	17.4 \pm 2.7 (8)	0.07	
49.96554	14.1294	Loděnice below Svatý Jan	267	1.3	0.4	407	6.7.2019	33.4 \pm 2.0 (9)	0.13	
49.96288	14.12889	Loděnice above Hostim village	267.1	1.3	0.4	407	6.7.2019	36.1 \pm 1.9 (9)	0.14	
50.40929	14.90462	Klenice (Mladá Boleslav)	168.6	1.5	0.4	262	9.7.2019	23.3 \pm 0.9 (8)	0.13	
50.54885	15.04296	Žehrovka (Březina)	90.2	1.4	0.6	316	9.7.2019	19.6 \pm 1.6 (9)	0.22	

* tok přetéká skalní dno v měrném profilu / the stream flows over the rocky bottom in the given profile

lím. Jak jednotlivé drobné toky zapadají pod dna koryt, klesá povrchový průtok na závěrovém profilu a v nenasycené zóně pod dny koryt se tvoří značný retenční objem volného pórového prostoru. Po výraznějších srážkách v létě, kdy povrchový tok propaguje i do předtím suchých úseků koryt, proto dochází k značným ztrátám vodnosti toků v úsecích suchých koryt, kde je hladina podzemní vody pod úrovní toku. K tomu přispívá zřejmě i to, že dna

koryt tvoří šterky. Vliv tvaru říční sítě nebo šířky a geometrie údolí na odtok však nebyl statisticky vyhodnocen.

Při měření průtoků byly přes velmi vysoké teploty vzduchu (rekordní hodnoty zaznamenané v některých stanicích ČHMÚ) pozorovány v nivě rostliny bez jakýchkoli známek vadnutí, zatímco na svazích mimo nivu již v některých případech k vadnutí rostlin docházelo. To naznačuje, že v nivě se evapotranspirace blížila PET.



Obr. 1. a – index předchozích srážek (API), PET podle Oudina et al. (2010) a specifický odtok na profilu Brzina v Hrachově, vše v jednotkách l/s/km²; b – rozdíl mezi API a PET; c – nejnižší naměřené odtoky na Brzině.

Fig. 1. a – antecedent precipitation index (API), PET according to Oudin et al. (2010), and specific discharge in Brzina stream at Hrachov, all in l/s/km² units; b – difference between API and PET; c – the lowest specific discharges in Brzina stream at Hrachov.

Potenciální evapotranspirace a extrémně nízké odtoky

Dlouhodobý průměrný úhrn srážek v povodí Brziny v letech 1999 až 2018 (20 let) dosahoval podle údajů ze 4 stanic ČHMÚ (Kovářov, Nadějkov, Kamýk, Nedrahovice) 584 mm/rok, což odpovídá v jiných jednotkách 18,5 l/s/km². Tomuto srážkovému úhrnu odpovídá podle dat ČHMÚ v horninách krystalinika v různých oblastech se stejným srážkovým úhrnem celkový odtok 2–3,5 l/s/km² a základní odtok 0,9–1,8 l/s/km² (Bruthans – Soukup 2011). Pro samotné povodí Brziny vychází celkový průměrný odtok za období 1999–2018 3,3 l/s/km². Odtok Brziny tedy tvoří jen 18% srážek spadlých do jejího povodí, zbylých 82% srážek připadá na evapotranspiraci. Typický base flow index (průměrné zastoupení základního odtoku na celkovém odtoku v dané oblasti) je podle ČHMÚ 0,4–0,5 (Vlnas 2010); což pro povodí Brziny odpovídá základnímu odtoku v rozsahu 1,3–1,7 l/s/km².

Srovnání velikosti srážek, PET a odtoku z povodí Brziny v čase ukazuje obr. 1a. Z obrázku je zřejmé, že pokud je index předchozích srážek vyšší než PET, dochází na povrchovém toku k nárůstu průtoků (obr. 1a, b), což ukazuje, že vypočtené hodnoty PET jsou realistické. Nejnižší prů-

toky Brziny nastávají v období, kdy hodnota PET přesahuje index předchozích srážek, a to s určitým zpožděním, daným vyčerpáním nebo naopak doplňováním vody do půdy (obr. 1b, 1c).

Potenciální evapotranspirace podle Oudina et al. (2010) dosahovala v letních měsících posledních let průměrných hodnot okolo 40–60 l/s/km² (obr. 1a). Při takto vysokých hodnotách PET a průměrném základním odtoku mezi 0,9 a 1,8 l/s/km² stačí, aby PET probíhala na 2–5% plochy povodí, a dojde k úplné ztrátě průtoku povrchového toku na uzávěrovém profilu. Jakmile plocha takové části nivy, kde je hladina podzemní vody mělko pod povrchem a v dosahu vegetace – a tedy se v ní i během vrcholného léta uplatňuje PET, protože zdrojem vody není půdní vlhkost, ale podzemní voda (jedná se o příbřežní zónu a plochy, kde potenciální evapotranspirace není redukována nedostatkem půdní vody na aktuální evapotranspiraci; dále je tato část nivy označena „PET niva“) – přesáhne 2–5% plochy povodí, lze očekávat masivní až úplné ztráty vodnosti povrchových toků za vysokých teplot ve vrcholném létě za suchších období.

Z tabulky 1 vyplývá, že poměr délky podrobné říční sítě (databáze DIBAVOD provozovaná VÚV TGM) vůči ploše povodí se pohybuje ve velké většině povodí mezi

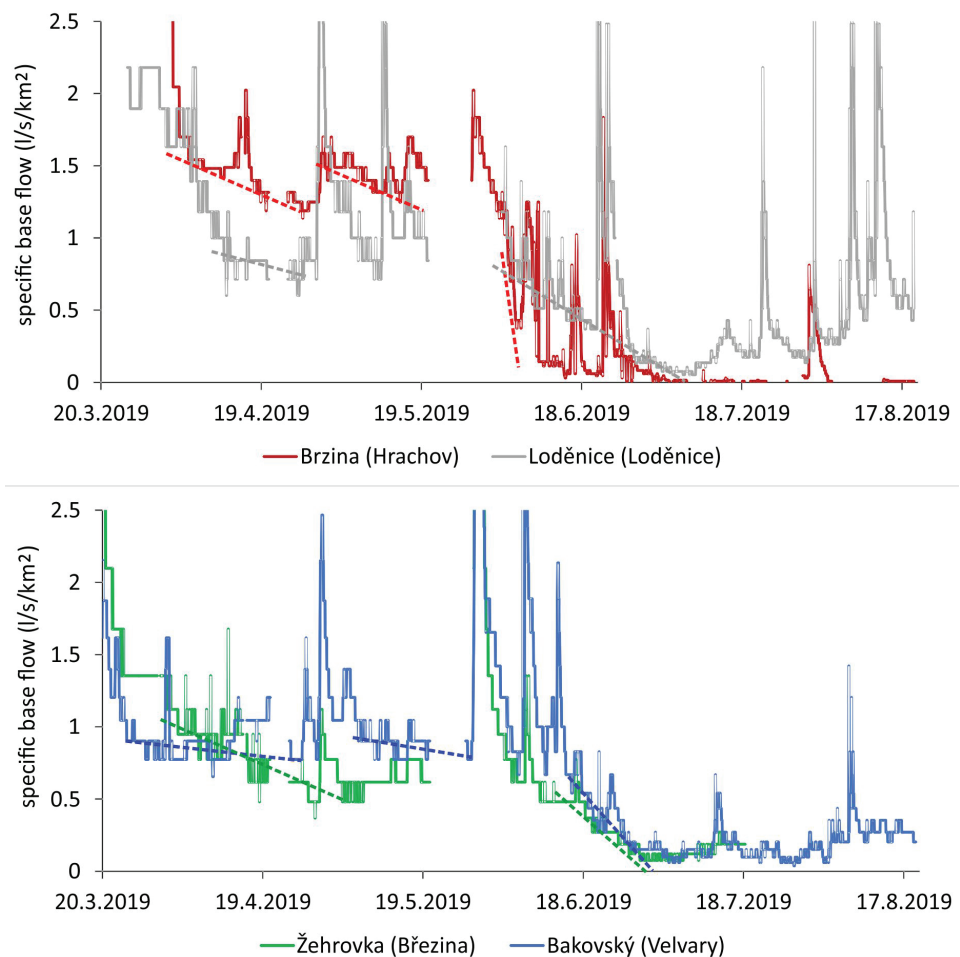
1–1,5 km⁻¹. Jinými slovy na 1 km² plochy povodí připadá zpravidla 1 až 1,5 km délky vodního toku. Pro výše zmíněné průměrné 2 až 5% pokrytí tedy stačí, aby průměrná šířka PET nivy byla 15–50 m podél všech toků. Protože řada zmapovaných vodních toků je v horních částech povodí ve skutečnosti vyschlá a hladina je zde hlouběji pod povrchem, bude šířka PET nivy ve zbylých částech povodí ve skutečnosti i několikanásobně vyšší pro zaručení úplného odparu vody z vodního toku. Nicméně stále se jedná o realistickou šířku nivy, která se vyskytuje v daných povodích.

Hydrogramy vodních toků s extrémně nízkými odtoky v létě 2019

Pokud by velmi malé průtoky povrchových toků byly způsobeny nízkými základními odtoky (nízkým přítokem podzemní vody do toku), měl by na hydrogramech povrchových toků být vidět postupný pokles základního odtoku podle exponenciální čáry vyprazdňování. Hydrogramy toků sledovaných ČHMÚ (obr. 2) však ukazují, že základní odtok na tocích se držel v březnu až květnu 2019 okolo 1 l/s/km² a klesal pouze pozvolna. Po srážkách se obvykle vracel na původní hodnotu. Teprve v červnu 2019, zřejmě po vyčerpání dostupné vody v půdě rostlinami, do-

chází k velmi prudkému poklesu základního odtoku pod 0,1 l/s/km² – tedy na extrémně nízké hodnoty. V červenci 2019 za nejvyšších teplot dosahují v některých případech průtoky vodních toků minima, poté přes pokračující sucho, avšak po všeobecném poklesu teplot vzduchu a snížení intenzity slunečního záření, na těchto tocích průtok mírně narůstá (Loděnice, Bakovský potok). Extrémně prudký pokles základního odtoku na různých tocích v červnu 2019 nelze vysvětlit vyprázdněním zásob podzemní vody. Tak prudké prázdnění zásob podzemní vody není možné a je ve výrazném kontrastu s pozvolným prázdněním zásob podzemní vody v předchozím období. Načasování tohoto poklesu naopak dobře odpovídá extrémním hodnotám PET díky velmi vysokým teplotám a převládajícímu jasnému počasí. Protože povodí na obr. 2 mají plochy mezi 90–290 km², odpovídá pokles specifického odtoku z 1 l/s/km² na 0,1 l/s/km² poklesu průtoky povrchových toků za jeden měsíc zhruba o 80–260 l/s. Jde tedy o velmi výrazné a přitom rychlé ztráty základního odtoku povrchových toků. Tak velké množství vody v žádném případě nemůže proudit náplavy vodních toků paralelně s tokem, na to je propustnost náplavů příliš nízká. V povodí horní Brziny v širším okolí Petrovic se transmisivita prostředí krystalinika včetně eluvia i v okolí vodních toků pohybuje v nízkých hodnotách mezi 1 · 10⁻⁵ a 1 · 10⁻⁴ m²/s (průměr 5 · 10⁻⁵ m²/s; Kadlecová – Bruthans 2020). Při typické šířce nivy 50–100 m

Obr. 2. Hydrogramy toků sledovaných ČHMÚ (průměrné denní průtoky), které vykazaly extrémně nízké specifické odtoky během července 2019 (průtoky byly vyděleny plochou povodí). Přerušovanými čarami znázorněn základní odtok a jeho prudký pokles v červnu 2019. Fig. 2. Hydrographs of streams recorded by the Czech Hydrometeorological Institute (mean daily flow rates), which showed extremely low values of specific discharge during July 2019 (flow rate divided by catchment area). Dashed lines show the baseflow and its rapid drop in June 2019.



a běžném spádu vodního toku okolo 1–2 % pro průměrnou hodnotu transmisivity vychází průtok podzemní vody v nivě paralelně s tokem pod 0,1 l/s. I v případě velmi silně propustných říčních náplavů z jiných oblastí ČR (průměrná transmisivita až $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) by průtok nivou dosahoval méně než 5 l/s. Množství vody proudící podzemní cestou v nivě je tedy velmi nízké a nemůže být důvodem, proč povrchový tok ztrácí vodnost.

V profilu Brziny v Hrachově je rozdíl mezi dlouhodobým průměrem odběrů a vypouštění vody pouhé 2 l/s. Při měření průtoků na vodních tocích nebyly pozorovány umělé odběry vody z vodních toků v míře, která by mohla vysvětlit tak nízké odtoky díky čerpání vody. Odběry z vodních toků v úrovni 80–260 l/s, které by k takovému poklesu byly nutné, jsou řádově vyšší než horní hranice myslitelných nepovolených odběrů, které jsou v činnosti navíc jen po část dne. Nejpravděpodobnějším vysvětlením pozorovaného propadu průtoků vodních toků v čase je tak výpar vody z povodí toků. Při hustotě říční sítě 1–1,5 km⁻¹ odpovídají ztráty základního odtoku 1 l/s/km² ztrátám 0,7–1 l/s na 1 km délky vodního toku, což jsou nižší ztráty než běžně pozorované v aridních oblastech, kde se voda podél povrchových toků masivně ztrácí. Přitom byly teplotní podmínky v červnu 2019 podmínkami v aridních oblastech velmi blízké. Je nutné zmínit, že prudký pokles průtoků a specifických odtoků je pozorovatelný jen na některých tocích sledovaných ČHMÚ. Jedná se o toky, které měly již v jarním období 2019 relativně nízké základní odtoky (okolo 1 l/s/km²). Právě na těchto tocích se může evapotranspirace z nivы výrazně projevit, protože úbytek vody díky evapotranspiraci z PET nivы je podobný jako původní průtok toku. Proto se výrazný pokles průtoků projevuje měřitelně jen na některých tocích, a to pouze v letech, kdy jsou nízké základních odtoky již během jara. Bylo by zajímavé v budoucnu provést srovnání s povodím, kde je niva vysoko nad tokem a kde zároveň chybí stromy s hlub-

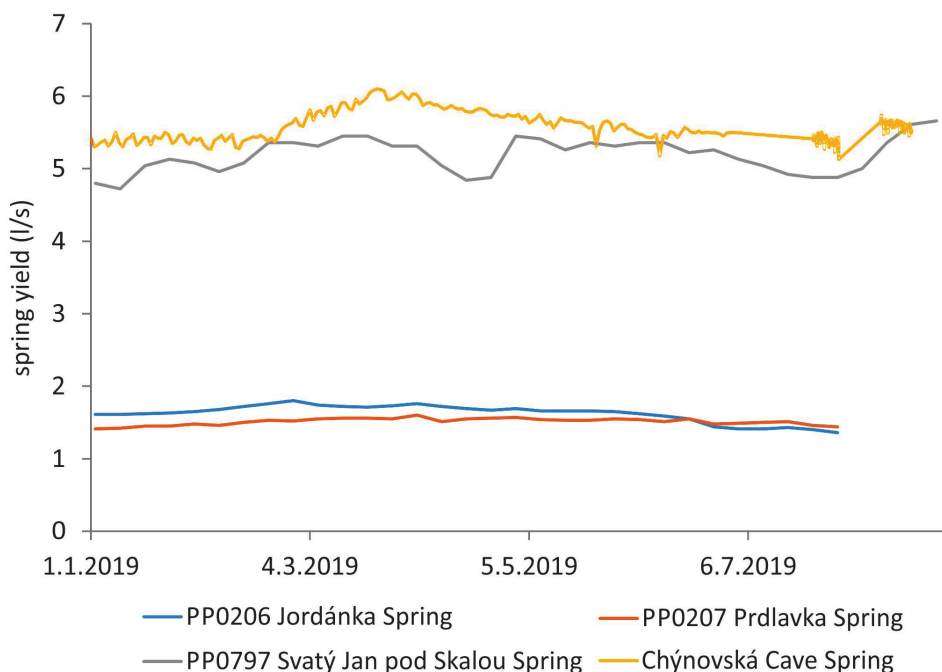
ším dosahem kořenů a kde proto k intenzivnímu výparu docházet nemůže.

Odtok podzemní vody neovlivněné sekundární evapotranspirací

Evapotranspirace se v ČR především týká půdní zóny a půdní vody, nastává víceméně na celé ploše ČR (snad s výjimkou nepropustných povrchů s okamžitým odtokem). Sekundární evapotranspirací se v tomto textu rozumí evapotranspirace gravitační podzemní vody (z nasycené zóny), která je tak blízko zemskému povrchu, že je dostupná pro kořeny rostlin a stromů. Ta naopak nastává na relativně malé ploše ČR. Typickým prostorem, kde dochází k sekundární evapotranspiraci, je příbřežní zóna u povrchových toků a další části PET nivы, tedy níže položené části nivы s dobrým přístupem kořenů k půdní vlhkosti vázané na podzemní vodu.

Pro porovnání, jak klesal odtok podzemní vody nepostižené sekundární evapotranspirací, byly k dispozici údaje z toku v Chýnovské jeskyni, který sice protéká karbonátovou čočkou, ale přes 90 % jeho vody tvoří drenáž z okolního krystalinika (Bruthans – Krejča 2016). Podzemní voda zde proudí v hloubkách několika desítek metrů pod zemským povrchem, vegetace tak bezpochyby není schopna dosáhnout kořeny na podzemní vodu. Průtok podzemního toku klesl z maxima v březnu 2019 z 6,1 l/s na minimum 5,3 l/s na konci července – tedy o pouhých 13 %, dále již neklesal (obr. 3). To je v ostrém protikladu s výrazným poklesem základního odtoku na hydrogramech v obr. 2.

Podobný příklad prudkého poklesu vodnosti povrchového toku vůči podzemní vodě nepostižené sekundární evapotranspirací je vodnost toku Loděnice a pramene Sv. Jan pod Skalou v Českém krasu, který drénuje krasový kolektor s hladinou podzemní vody přes 100 m pod



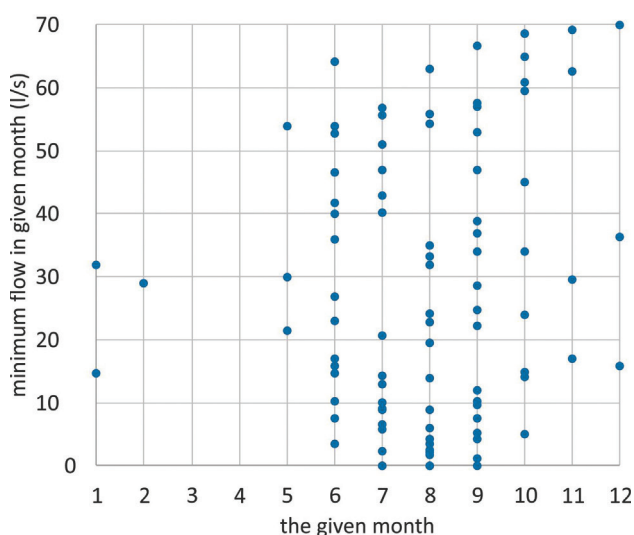
Obr. 3. Průběh průtoku pramenů v povodí Žehrovky a Loděnice (zdroj ČHMÚ) a podzemního toku v Chýnovské jeskyni (zdroj: F. Krejča) na jaře a léto 2019. Fig. 3. Yield of springs in the Žehrovka and Loděnice catchments (source: CHMI), and the underground stream in the Chýnov Cave (F. Krejča) in spring and summer 2019.

terénem. Měření provedené dne 6. července 2019 ukázalo, že pramen Sv. Jan pod Skalou (vydatnost celého pramene včetně části nesledované ČHMÚ v daném dni 16 l/s) tvořil okolo 50% vodnosti toku Loděnice pod soutokem. Přitom povodí pramene Sv. Jan pod Skalou je odhadováno na 8 km² (Žák et al. 2001), zatímco tok Loděnice má v tomto místě povodí o ploše 265 km² – tedy asi 33krát rozsáhlejší (!).

Posledním příkladem je průtok toku Žehrovky v Březině. Žehrovka odvodňuje kvádrové pískovce s řadou vydatných a dosti stálých pramenů (obr. 3; prameny Jordánka, Prdlavka). Přesto dne 9. července 2019 její průtok na profilu v Březině pod rybníkem Žabakor vlivem evapotranspirace klesl na pouhých 19 l/s (specifický odtok 0,22 l/s/km²; tabulka 1). Tyto příklady ukazují, že průtok vodních toků neklesá v důsledku výrazného poklesu odtoku podzemní vody. Naopak, odtok podzemní vody tam, kde prokazatelně není ovlivněn sekundární evapotranspirací, nijak výrazně mezi zimou 2018/2019 a létem 2019 neklesl (obr. 3). V případě rybníku Žabakor je třeba vedle výparu z nivy uvažovat i výpar z volné hladiny tohoto velmi rozsáhlého rybníka (plocha přes 60 ha).

Dlouhodobé pozorování v profilu Brziny v Hrachově

V dalším kroku bylo analyzováno, v jakém období se vyskytují minimální průtoky na vodním toku. Zda k minimálním průtokům dochází v období vrcholného léta, za maximální evapotranspirace, po vyčerpání vlhkosti nesaturované zóny ze zimního období, nebo i během podzimu, kdy se již evapotranspirace nemůže tak výrazně projevit a vyskytují se minima daná sníženým odtokem podzemní vody (nízká zásobnost podzemní vody). K analýze byly k dispozici denní průměry průtoků ve stanici Brzina v Hrachově od 1. 1. 1990 do 31. 7. 2019 (zdroj ČHMÚ). Brzina je jedním z nejvíce



Obr. 4. Měsíce, kdy dochází k minimálním průtokům na profilu Brzina v Hrachově.

Fig. 4. Months with minimum monthly flow rates in the Brzina stream at Hrachov profile.

suchem postižených toků s poklesem průtoku až na 0 l/s v uzavřevém profilu. Obrázek 4 ukazuje, že za uplynulých 30 let klesal průtok Brziny pod 10 l/s s jedinou výjimkou pouze v měsících červen až září, tedy v měsících s vysokou evapotranspirací (celkem 25 měsíčních minim). Průtok 10 l/s odpovídá specifickému odtoku 0,08 l/s/km².

Závěr

Provedená terénní měření souhlasí s extrémně nízkými odtoky na některých tocích ve středních Čechách režimně naměřenými na sledovaných vodoměrných stanicích ČHMÚ. Na řadě toků klesly v červenci 2019 specifické odtoky pod 0,1 l/s/km². Tok Brziny v profilu Hrachov s plochou povodí 133 km² zcela vyschl. Propustnost náplavů je příliš nízká na to, aby tento jev bylo možné vysvětlit pouze prouděním podzemní vody v náplavech. Nepovolenými odběry vody z toku rovněž nelze odůvodnit tak značné ztráty vodnosti povrchových toků.

Z různých analyzovaných dat a přístupů vyplývá, že masivní výpar v letním období blížící se PET z té části nivy, která má hladinu podzemní vody tak blízko povrchu terénu, že je dostupná pro kořeny vegetace (tzv. PET niva), je velmi pravděpodobně rozhodující příčinou drastického poklesu vodnosti povrchových toků pozorovaného v posledních letech na některých vodních tocích ve středních Čechách. Svědčí pro to jak načasování nejnižších průtoků na vrcholné léto, tak i extrémně vysoké hodnoty PET v tomto období, a v neposlední řadě i prudký pokles základního odtoku pozorovaný během června 2019 na některých tocích (Brzina, Loděnice, Bakovský potok, Žehrovka). Průtok pramenů nepostižených sekundární evapotranspirací přitom v červnu 2019 nijak výrazně nepoklesl.

Pokud bude v budoucnu dále narůstat teplota vzduchu nebo počet tropických dní, lze předpokládat, že ztráty vodnosti některých toků až po úplné vyschnutí koryt budou četnější a projeví se též na dalších tocích. K úplné ztrátě vodnosti povrchových toků v nižších polohách středních Čech (se základními odtoky 1–2 l/s/km²) dostačuje zastoupení plochy PET nivy okolo 2–5% rozlohy celého povodí, resp. průměrná šířka PET nivy 20–50 m.

Pokud by se realizovala některá plánovaná opatření, jako je „návrat koryt vodních toků do přírodně blízkého stavu“ a „zahrazování drenáží“ s cílem zvyšovat hladinu vody v tocích a potažmo i hladinu podzemní vody v okolní nivě, lze předpokládat výrazné rozšíření PET nivy a tím výrazné zvýšení evapotranspirace v daném povodí v letních měsících. To povede k dalšímu poklesu až úplné ztrátě vodnosti vodních toků. Laické představy, že zvyšování hladiny podzemní vody povede k většímu odtoku povrchových toků v letním období, je nutno prizmatem výše uvedených poznatků označit za nepodložené. Zvýšením hladiny podzemní vody dojde sice k zadržení určité části vody a jejímu pomalejšímu odtoku, ale mnohem významněji se projeví opačný efekt nárůstu evapotranspirace vyvolaný lepší dostupností vody pro vegetaci a velmi vysokými teplotami, které se vyskytují mnohem častěji než v minulosti. Protože již v letech 1970–2000 dosahovala průměrná

evapotranspirace v povodích České republiky s nejnižšími srážkami více než 90% a na odtok tak připadalo pouze méně než 10% srážek, povede další zvýšení evapotranspirace ke značným poklesům odtoků, zejména v sušších letech.

Nová měření ukazují, že je zcela **nezbytné pokládat intenzivní evapotranspiraci z PET nivy v letních měsících za velmi významnou složku hydrologické bilance povodí a zohlednit ji ve všech plánovaných opatřeních**. Pomocí podrobných geografických dat (lidar) a typu vegetace by mělo být možné určit rozsah PET nivy v daném povodí (podle převýšení mezi povrchem nivy a korytem vodního toku a typu vegetace rozlišit, jaká část nivy se účastní sekundární evapotranspirace a ve které části nivy je již hladina podzemní vody příliš hluboko) a tato data využívat při plánování úprav vodních toků.

Výše uvedené poznatky také ukazují, že u některých toků je iluzorní aplikovat minimální zůstatkové průtoky, protože již za současných podmínek mohou vybrané toky ztrácet veškerou vodu evapotranspirací i bez jakýchkoli odběrů podzemní vody nebo jiného umělého zásahu. Na dalších tocích může být pokles průtoků falešně vydáván za lokální antropogenní ovlivnění, přitom má klimatickou příčinu. **Výpar z PET nivy je proto zapotřebí zohlednit i při bilanci odběrů podzemní vody jako velmi významný faktor**, který se může spolupodílet na citelném úbytku vody v posledních letech.

Pro získání podrobnějších dat by výpar z PET nivy měl být sledován pomocí piezometrů osazených datalogery a analýzou podstatně většího množství hydrogramů ČHMÚ. V České republice jde o dosud zcela nedostatečně studovaný fenomén, který by si zasloužil podstatně větší pozornost, zejména s ohledem na různá plánovaná nápravná opatření.

Poděkování. Martinu Zrzaveckému děkujeme za poskytnutí dat o vydatnosti pramenů sledovaných ČHMÚ, Františku Krejčovi za poskytnutí průtoků podzemního toku v Chýnovské jeskyni, Martinu Lanzendörferovi děkujeme za pomoc s matematickou formulací API. Miroslavu Tesařovi, Ondřeji Jägerovi a recenzentům J. V. Datlovi a P. Šerclovi děkujeme za cenné připomínky k rukopisu.

Literatura

- BILAN (2019): Dostupné z: <http://bilan.vuv.cz/bilan/uzivatelska-prihrucka-modelu-bilan/dokumentace-modelu>. Citováno 19. 8. 2019.
- BRUTHANS, J. – KREJČA, F. (2016): Poznámky k hydrogeologii a vývoji chýnovského krasu. In: Krejča, F., ed.: 150 let Chýnovské jeskyně. Sborník příspěvků semináře k 150. výročí objevení Chýnovské jeskyně. – Acta speleol. 7, 48–55.
- BRUTHANS, J. – SOUKUP, J. (2011): Vyhodnocení některých parametrů, návrh úprav regionalizace základního odtoku a poznámky k metodice stanovení přírodních zdrojů. – MS Čes. geol. služba.
- KADLECOVÁ, R. – BRUTHANS, J. (2020): Hydrogeologické poměry ve správním území obce Petrovice. – 28 str. MS Čes. geol. služba.
- KÄSS, W. – BEHRENS, H. – HIMMELSBACH, T. – HÖTZL, H. – HUNKELER, D. – LEIBUNDGUT, C. H. – MOSER, H. – ROSSI, P. – SCHULTZ, H. D. – STOBER, I. – WERNER, A. (1998): Tracer technique in geohydrology. – Balkema. Rotterdam.
- KILPATRICK, F. A. – COBB, E. D. (1985): Measurement of discharge using tracers. – U.S. Geological Survey. Open-File Records 84–116. Washington.
- KOPÁČ, J. (2007): Měření průtoků pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity. Diplomová práce. – Přírodověd. fakulta Univ. Karlovy. Praha.
- MAILLET, E. T. (1905): Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale. – Librairie Scientifique A. Hermann. Paris.
- UDIN, L. – MOULIN, L. – BENDJOUDI, H. – RIBSTEIN, P. (2010): Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. – Hydrolog. Sci. J. 55, 2, 209–222.
- OULEHLE, F. (2019): Koloběh vody a živin v lesích. – Les. Práce 8, 17–21.
- VĚNAS, R. (2010): Návrh metodiky stanovení přírodních zdrojů podzemních vod. – 20 str. MS. Čes. hydrometeorol. ústav.
- ŽÁK, K. – HLADÍKOVÁ, J. – BUZEK, F. – KADLECOVÁ, R. – LOŽEK, V. – CÍLEK, V. – KADLEC, J. – ŽIGOVÁ, A. – BRUTHANS, J. – ŠTASTNÝ, M. (2001): Holocenní vápenec a krasový pramen ve Svatém Janu pod Skalou v Českém krasu. – Special Papers No. 13. Czech Geol. Survey. Praha.