

Hydrologie Bubovického potoka: srovnání stavu okolo let 1995 a 2021 a diskuze příčin zvýšených ztrát vody v současnosti

Hydrology of the Bubovice Stream: a comparison of conditions around 1995 and 2021 and a discussion of the causes of increasing water losses at present

Tomáš Herza¹, Jiří Bruthans^{1,2}

Abstract

Recent streamflow measurements showed a significant increase in water losses from the Bubovice Stream in the Bohemian Karst. In 2020 and 2021, more than 100 of discharge measurements were taken along the entire course of the Bubovice Stream between Bubovice and Srbsko villages. The flow rates were measured manually using the known volume of a container and a stopwatch, by the tracer dilution method, and on three important profiles also continuously using pressure transducers with dataloggers located behind the constructed temporary spillways. The obtained flow rates were compared to ones measured in 1990s, and the differences in streamflow losses were compared. As indicated in 1940s already, water losses in the Bubovice Stream bed are common. However, a significant increase in water losses is being detected along the entire length of the streambed from the 1990s onwards. The most distinct losses were found in the upper losing reach of the Bubovice Stream downstream of Bubovice, where the maximum streamflow losses increased by as much as the factor of 4 within 25 years, amounting to 24 l/s. Significant flow losses were detected during the exceptionally high flow rate at the Bubovice waterfalls and below, in the lower losing reach, in 2021. Losses from the entire catchment area of the Bubovice Stream reached up to 88 l/s in 2021. The major cause of water losses from this surface stream is the infiltration into permeable karstified limestones in the upper losing reach of the Bubovice Stream (downstream of the Bubovice village), and infiltration into gravels in the valley fill in the lower losing reach of the Bubovice Stream at the Srbsko village. Spring and stream chemistry and a tracer experiment proved that water sinking in the losing reach downstream of Bubovice does not reappear at the Bubovice waterfalls but flows to two large springs in the Loděnice (Kačák) Stream orographic catchment. Higher water losses were probably caused by more frequent drying of alluvial sediments due to climate change, disturbance of Holocene sediments during building of artificial wetlands and elevated permeability of the streambed due to the removal of biofilms related with the onset of wastewater treatment from the Bubovice municipality in recent years. To decipher groundwater flow directions, a tracer test should be performed at a sink in the lower part of the Bubovice waterfalls.

1. Úvod

1.1. Charakteristika povodí Bubovického potoka

Bubovický potok (obr. 1) je levostranným přítokem Berounky v Srbsku (tok 4. řádu). Celková délka toku Bubovického potoka je zhruba 5,8 km, plocha povodí 8,8 km², průměrný průtok v ústí lze obtížně stanovit, protože koryto je zde většinou suché. Povodňové N-leté průtoky v ústí jsou stanoveny (podle webových stránek Českého hydrometeorologického ústavu; 11/2018) takto: $Q_1 - 1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_5 - 3,8 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{20} - 8,3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100} - 16,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Průměrný sklon toku je 3,3 ‰, hustota říční sítě je 0,95 km/km². Průměrný roční

úhrn srážek se v oblasti pohybuje mezi 500–600 mm a průměrná roční teplota vzduchu je 7–9 °C (TOLASZ 2007). Potok je všeobecně známý pro své vodopády, které se však v posledních letech vyznačují velmi nízkými průtoky nebo i úplným vysycháním, trvajícím někdy po mnoho měsíců. Vodopády Bubovického potoka tvoří několik skalních stupňů z vápenců lochkovského a pražského souvrství zhruba v polovině délky jeho toku.

Potok pramení na nepropustných břidlicích srbského souvrství tvořících izolátor, ale jeho koryto pod Bubovicemi směřuje šikmo k osám geologických struktur, a potok tak postupně kříží několik pruhů zkrasovělých devonských vápenců, které jsou v hydrogeologickém slova smyslu součástí tzv. hlavního kolektoru (souvrství lochkovské, pražské, lokálně i zlíčovské; obr. 1; BRUTHANS a ZEMAN 2000). Tyto vápencové pruhy jsou po stránce hydrogeologické účinně odděleny výchozy spodního izolátoru, tvořeného horninami ordoviku a siluru, na vzájemně nesouvisějící segmenty. Naopak horniny svrchního poloizolátoru, tvořené vápenci a břidlicemi třebovského a chotečského souvrství, a stejně tak i izolátoru srbského souvrství, pouze překrývají vápence, které tvoří v hloubce pod nimi kontinuální těleso, ve kterém voda může v podloží (polo)izolátoru proudit, a to i ve značných hloubkách (BRUTHANS et al. 2022). Na Bubovickém potoce se nachází několik vodních ploch a bývalých rybníků (obr. 2).

¹Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 40 Praha 2; bruthans@natur.cuni.cz

²ZO ČSS 1-05 Geospeleos

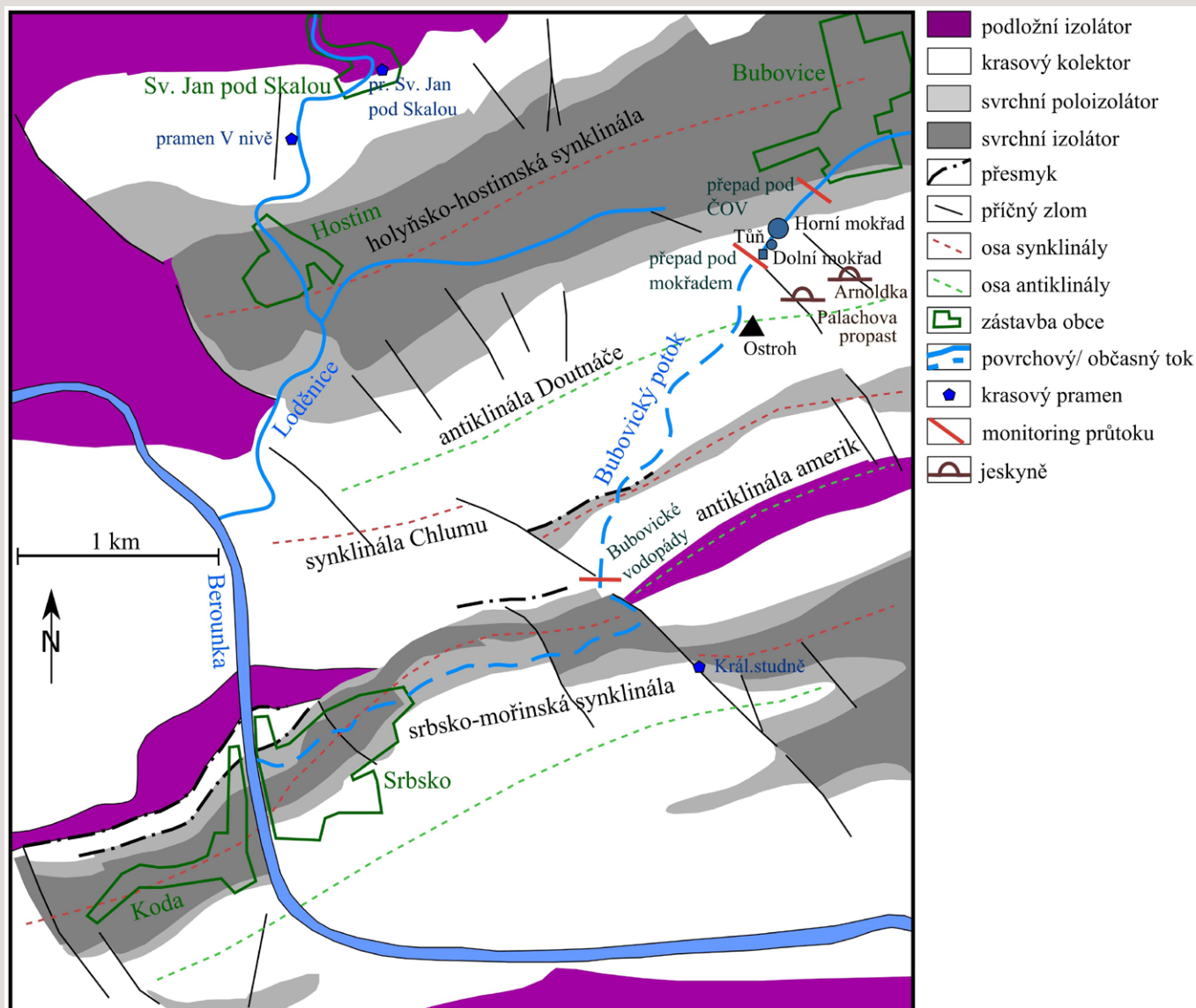
Poděkování: Poděkování patří ing. P. Královcové z Agentury ochrany přírody a krajiny ČR, regionálního pracoviště Střední Čechy, za impulz ke zpracování tématu, za poskytnutí cenných informací a dokumentaci k revitalizaci a obnově mokřadů v povodí Bubovického potoka. Dále děkujeme M. Dražské z Bubocentra za pomoc při dohledávání informací a kontaktů, ing. O. Šimunkovi ze Správy CHKO Český kras za poskytnutí cenných informací o budování a stavu čistírny odpadních vod v Bubovicích a za poskytnutí studie revitalizace z roku 1999, ing. J. Soukupovi ze společnosti Vodovody a kanalizace Beroun, a. s., za poskytnutí informací a dat o vypouštění čistírny odpadních vod v Bubovicích. Děkujeme panu M. Majerovi za poskytnutí archivních materiálů o historických vodních stavech potoka z Homolova deníku, Z. Menglerovi za poskytnutí fotografií a vlastních poznámek o historických stavech potoka, V. Bláhovi za poskytnutí informací o historických stavech potoka, přepsaných z kroniky obce Srbska. Za umožnění měření děkujeme Agentuře ochrany přírody, regionálnímu pracovišti Střední Čechy. M. Kolčavovi děkujeme za poskytnutí dodatečných informací o průběhu povodňové vlny na Bubovickém potoce v roce 2021. RNDr. K. Žákovi, CSc., a recenzentům Mgr. Ivě Kürkové, PhD., a Mgr. Janu Holečkovi, PhD., děkujeme za cenné připomínky k rukopisu.

Český kras (Beroun), 49 (2023), 23–36, 7 tab, 7 obr.

© Muzeum Českého krasu, p. o., Beroun

ISSN 1211-1643

ISBN 978-80-87708-19-4



Obr. 1. Hydrogeologická mapa zájmové oblasti. Mapa byla sestavena na základě geologických map 1 : 25 000 (KOVANDA et al. 1984; HAVLÍČEK et al. 1987, 1993; CHLUPÁČ et al. 1989). Příčné zlomy směru SZ–JV jsou v mapách vyznačeny pouze ve vápencových souvrstvích, protože v siliciklastickém srbském souvrství v jádru hostimsko-holýšské synklinály je nebylo možné vysledovat. Nepochybně ale procházejí napříč celou synklinálou.

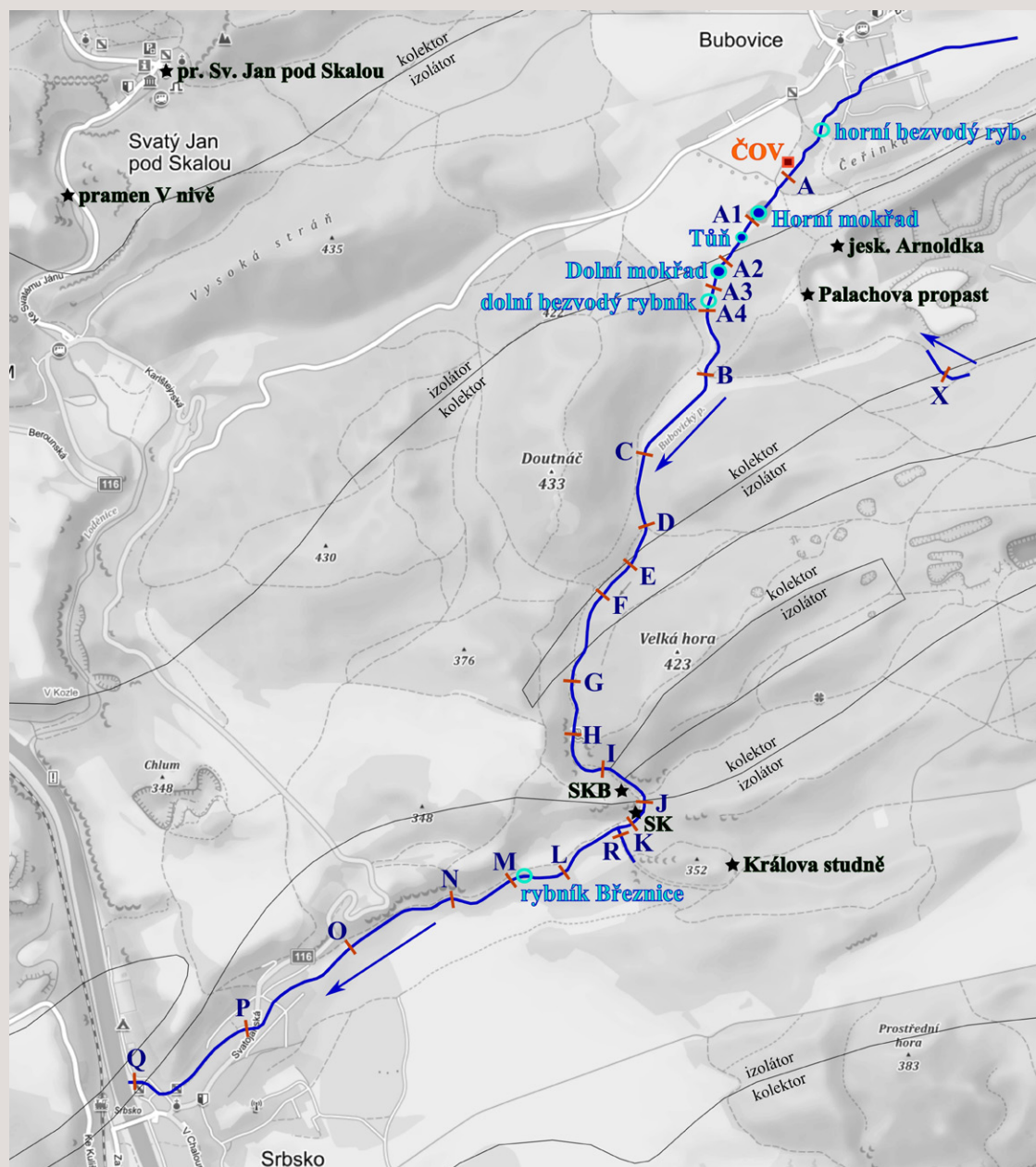
Fig. 1. Hydrogeological map of the study area. The map was compiled on the basis of 1 : 25,000 geological maps (KOVANDA et al. 1984; HAVLÍČEK et al. 1987, 1993; CHLUPÁČ et al. 1989). Transverse faults striking NW–SE are marked only in limestone formations on the maps because they cannot be detected in the siliciclastic Srbsko Formation in the core of the Hostim-Holýš syncline. However, they undoubtedly propagate across the entire syncline.

1.2. Ztráty průtoku potoka v minulosti a faktory ovlivňující hydrologii

Ztráty vody v potoce byly písemně zaznamenány Vladimírem Homolou již v letech 1942–1944, tedy před začátkem současné klimatické změny (tab. 1; HOMOLA 1945). Tehdy se voda zcela ztrácela v potočních štěrčích mezi Bubovickými vodopády a Srbskem. Při vyšších vodních stavech protékala voda celým údolím téměř až na začátek zastavby Srbska, při vysokých vodních stavech dotéká i dnes až k soutoku s řekou Berounkou. Naopak při nízkých stavech tekla voda přes vodopády, ale zcela se ztrácela už v jezírku těsně pod nimi (HOMOLA 1945). Do 80. let potom býval na jaře průtok až do ústí v Srbsku stabilní, v létě se konec toku pravidelně posouval zpět na začátek obce a dále až k rybníku Březnice, který je jen 800 m pod vodopády (Z. Mengler, ústní sdělení, 2021). V 90. letech již vysychalo koryto i v horní části toku pod Bubovicemi a těsně pod Bubo-

vickými vodopády, jak vyplývá z relativně rozsáhlého opakovaného měření průtoků (BRUTHANS 1999; seznam dokumentačních bodů, s. 21–31). Trend úbytku průtoku pokračuje až do současnosti, jelikož úbytek průtoku se od 90. let ještě výrazně zvýšil. Historické vodní stavy Bubovického potoka a výsledky rozsáhlých opakovaných měření průtoků v letech 2020–2021 podrobně popsal HERZA (2021) v bakalářské práci.

Pro zlepšení vodních stavů a zadržení vody v krajině byly, podle zadání Agentury pro ochranu přírody a krajiny, v roce 2018 vybudovány pod Bubovicemi mokřady v prostoru bývalých rybníků s protřazenými hrázemi. Bubovický potok je v současné době ovlivněn čistírnou odpadních vod (dále ČOV) v Bubovicích, která na základě výjimky, platné od 18. 5. 2020 do 30. 6. 2023, vypouští do jeho toku přečištěnou odpadní vodu (ČIROKOVÁ 2020, s. 1–4). Nicméně v minulosti, po dokončení výstavby ČOV v roce 2008, se veškerá



Obr. 2. Profily pro měření průtoků na Bubovickém potoce. Označení profilů zčásti převzato z práce BRUTHANSE (1999).

Fig. 2. Profiles for flow measurements on the Bubovický Stream. Designation of the profiles is partly adopted from BRUTHANSE (1999).

Tab. 1. Pozorování vodních stavů na Bubovickém potoce ze 40. let 20. století z deníku Vladimíra Homoly (HOMOLA 1945).

Tab. 1. Observation of water levels at the Bubovický Stream from the 1940s based on the diary of Vladimír Homola (HOMOLA 1945).

datum pozorování	vodní stav	kde se potok ztrácel
27.09.1942		pod jezírkem pod vodopády („asi 200 m pod vodopády“)
22.11.1942	vyšší („voda protéká vodopády ve značném množství“)	v zalesněném údolí nad Srbskem
20.12.1942	vyšší	v zalesněném údolí nad Srbskem, „u jeskyně pod silnicí“ (o 30 m výš než 22. 11. 1942)
23.05.1943	nízký	v jezírku pod vodopády
20.06.1943	nízký	v jezírku pod vodopády
28.11.1943	nízký	v jezírku pod vodopády
18.04.1944	vysoký (průtok na vodopádech cca 5 l/s)	na začátku Srbska
14.05.1944	nízký	pod jezírkem pod vodopády
16.07.1944	vysoký	na začátku Srbska

odpadní voda přečerpávala potrubím mimo povodí Bubovického potoka do lokality Jánská, kde vytékala do toku Loděnice (VAK BEROUN 2014, s. 8–9). V letech 2020 a 2021 byly rozsáhlým měřením průtoku v obdobích s podprůměrnými i nadprůměrnými vodními stavy získány cenné údaje o ztrátách vody v povodí Bubovického potoka (HERZA 2021).

1.3. Cíle studie

Cílem tohoto příspěvku je popis ztrátových a výronových úseků Bubovického potoka, kvantifikace ztrát a nárůstů průtoku, a to jak přímo v toku, tak i v dílčích povodích Bubovického potoka. Jsou diskutovány příčiny ztrát, důvod jejich změn v čase a také původ vody v pramenech a výronových úsecích podél toku Bubovického potoka na základě chemizmu vody a dalších dat.

2. Metodika

2.1. Měření průtoků a chemického složení

Měření průtoku za účelem zjištění úbytků a nárůstů vodnosti v korytě bylo prováděno až na 23 profilech rozmístěných podél celého toku Bubovického potoka (obr. 2, tab. 2). Označení profilů bylo zčásti převzato z práce BRUTHANSE (1999). Začátek měřeného úseku za-

čínal těsně pod ČOV v Bubovicích, ještě na nepropustném srbském souvrství, kde, pokud je autorům známo, nikdy nedošlo k úplné ztrátě průtoku.

Pro kontinuální záznam průtoku byly ve dvou místech v korytě toku (A a A3) vybudovány měrné přelivy z tenkého hliníkového plechu, roxorů a jílu. Do vzdutí nad přelivy, stejně jako pod odshora prvním vodopádovým stupněm Bubovických vodopádů, byla pro kontinuální záznam tlaku a teploty umístěna tlaková čidla Solinst (Kanada) se záznamem v kroku 30 minut. Zaznamenaný tlak byl, po sestavení měrných křivek z manuálních měření průtoku, přepočítán na průtok. Na přelivech byl průtok měřen manuálně za použití stopek a nádob s objemy 8, 10 a 45 litrů. Před měřením průtoku bylo kontrolováno rozptýlením kalu na návodní straně přepadu i pozorováním ze spodní strany, zda přepad nepodtéká.

V případě ostatních profilů nebylo kvůli nízkému spádu koryta možné měřit průtok nádobami, a proto byla využita i metoda založená na ředění uměle dávkovaného stopovače. Tato metoda byla využita i na přelivech při vysokých průtocích. Metoda ředění je rutinně používána i ČHMÚ na malých tocích nebo za velmi nízkých vodních stavů, kdy je použití ostatní techniky kvůli mělké vodě znemožněno (BRUTHANS et al. 2020). Metoda je založena na principu

Tab. 2. Lokalizace profilů pro měření průtoků na Bubovickém potoce. Částečně převzato z práce BRUTHANSE (1999).

Tab. 2. Location of profiles for flow measurements at the Bubovice Stream. Designation of the profiles is partly adopted from Bruthans (1999).

označení profilu	souřadnice (WGS84 (stupně))	umístění profilu
A	49.9657208N, 14.1641800E	10 m pod ČOV Bubovice
A1	49.9644269N, 14.1619056E	na přepadu Horního mokřadu
A2	49.9631106N, 14.1612108E	u vtoku do Dolního mokřadu
A3	49.9623186N, 14.1606047E	pod hrází Dolního mokřadu
A4	49.9615989N, 14.1602344E	v úrovni probořené hráze dolního bezvodého rybníka
B	49.9595181N, 14.1601408E	ostrož
C	49.9571281N, 14.1572011E	na konci louky
D	49.9549503N, 14.1572600E	křížení potoka a cesty od Karlštejna
E	49.9537803N, 14.1566056E	pod skalními stupni na toku
F	49.9527725N, 14.1552056E	v úrovni připojení červené tur. značky do údolí
G	49.9500353N, 14.1536444E	v meandru, 50 m pod křížením cesty a potoka
H	49.9484456N, 14.1538000E	nejvyšší stupeň vodopádů
I	49.9473411N, 14.1552592E	první lávka pod vodopády
J	49.9463417N, 14.1572117E	v úrovni Kubrychtovy boudy
K	49.9456911N, 14.1566806E	u studánky SK
L	49.9442100N, 14.1533253E	nad rybníkem Březnice
M	49.9439753N, 14.1510211E	těsně pod hrází rybníka Březnice
N	49.9433608N, 14.1478617E	pod jeskyní Pod Skalou
O	49.9418211N, 14.1431142E	na konci zalesněného údolí
P	49.9393492N, 14.1379964E	pod mostem silnice z Hostimi
Q	49.9376953N, 14.1329269E	v ústí potoka do Berounky
R	49.9454736N, 14.1560531E	profil přítoku od cesty od Královky Studné
X	49.9594247N, 14.1718619E	rozcestí nad Mužíkovým polem
PN	49.9651481N, 14.1293622E	pramen V nivě
SKB	49.9466369N, 14.1565600E	studna u Kubrychtovy boudy
SK	49.9456911N, 14.1566806E	studánka u koryta toku pod Kubr. boudou

dokonalého promísení známého množství konzervativního stopovače a lze ji s NaCl stopovačem použít na tocích s průtokem do cca 1 000 l/s (BRUTHANS et al. 2020), ale s využitím jiných stopovačů lze touto metodou měřit průtok i velkých řek. Koncentrace malého množství rozpuštěného NaCl byla sledována v kroku 5 sekund konduktometry Cond 3310 s automatickým záznamem (WTW, Německo). Vztah mezi konduktivitou (vodivostí) a koncentrací injektovaného NaCl byl získán kalibrací přístroje pomocí kalibračního roztoku s koncentrací 10 g/l NaCl, míšeného v různém poměru s vodou z toku. Navážený stopovač, rozpuštěný ve vodě, byl vždy injektován ve vhodném profilu na začátku měřeného úseku tak, aby množství stopovače bylo úměrné k množství vody v každé proudnici (KOPÁČ 2007). Měření konduktivity probíhalo od okamžiku injektáže až po pokles konduktivity na původní požadovou hodnotu v toku (KOPÁČ 2007), přičemž měřený úsek měl typicky délku desítek metrů.

Od podzimu 2020 bylo provedeno přes 100 měření průtoku. Z nich bylo 90 % měření opakovaných, tj. jeden profil byl ve stejném čase změřen 2–5krát (v průměru 3×) pro určení nejistoty měření průtoku. Průměrná směrodatná odchylka měření průtoku činila

4 % z měřené hodnoty a jen 5 % ze všech měření mělo odchylku mezi 10–20 %, ostatní měření pod 10 %. Průtoky jsou tedy měřeny relativně velmi přesně.

Pro určení možné spojitosti mezi ztrátovými úseky Bubovického potoka a prameny byly odebírány vzorky vody ke stanovení chemického složení. Vzorky byly uchovávány v chladu. Chemismus byl analyzován v Laboratořích geologických ústavů Přírodovědecké fakulty UK v Praze, kationty pomocí ICP-OES, anionty pomocí HPLC, alkalita pomocí titrace.

2.2. Výpočet vodní bilance v mezipovodích

Na základě manuálního měření v jednotlivých profilech v korytě bylo z rozdílu průtoku zjišťováno, jestli v úseku mezi profilem dochází k nárůstu nebo úbytku průtoku. Tímto způsobem byly vždy mezi následujícími profilem stanoveny dílčí přírůstky nebo ztráty. Na sebe navazující profile, ve kterých buď narůstala, nebo se naopak snižovala vodnost, byly spojeny do 5 úseků (mezi hraničními profilem A, E, H a M), ke kterým byla vymezena orografická mezipovodí 1–5 (obr. 3). Tato mezipovodí byla ručně vymezena v mapové aplikaci Analýzy výskopisu – Geopohlížeč.



Obr. 3. a – Bubovické vodopády bez průtoku 25. 1. 2021, b – Bubovické vodopády po kulminaci 14. 5. 2021, c – vybudovaný přeliv v profilu A pod Bubovicemi, d – vybudovaný přeliv v profilu A3 pod hrází Dolního mokřadu, e – suché koryto ve ztrátovém úseku pod profilem A3, f – Studánka pod Kubrychtovou boudou u koryta toku (dok. bod SK). Foto autoři.

Fig. 3. a – the Bubovice waterfalls with no flow on January 25, 2021, b – the Bubovice waterfalls at high flow rates after culmination on May 14, 2021, c – a constructed spillway at profile A downstream of Bubovice village, d – constructed spillway at profile A3, located under the dam of pond Dolní mokřad, e – a dry streambed in the upper losing reach downstream of profile A3, f – a well downstream of the Kubrychtova bouda Lodge and near the streambed (doc. point SK). Photos by the authors.

V práci rozlišujeme dva typy ztrát: přímé ztráty (z toku) a nepřímé ztráty (z mezipovodí mimo tok), jejich součtem jsou celkové ztráty v daném orografickém mezipovodí. Pokud je průtok toku na konci úseku nižší než na jeho začátku, jde o přímou ztrátu. Z rozdílů průtoků v profilech v korytě toku pod a nad zájmovým úsekem byly zjišťovány přímé ztráty průtoku v litrech za sekundu.

Kromě přímých ztrát v korytě ale může docházet i ke ztrátám nepřímým, které se úbytkem průtoku v toku neprojeví. Srážková voda se může vsakovat do vápenců a odtékat jimi do jiného mezipovodí, aniž by se voda vůbec dostala do povrchového toku. Nepřímé ztráty byly kvantifikovány postupem KUKAČKY et al. (2008) za předpokladu, že všechna mezipovodí v jedné oblasti by měla mít v určitém čase stejný specifický odtok (stejný odtok na jednotku plochy v l/s/km²). Pokud se specifické odtoky liší, je to dané tím, že z některých povodí (ztrátových) odtéká voda vápencovými pruhy do jiných (přebytkových povodí). Jako referenční bylo proto vybráno povodí A na srbských břidlicích, kde orografické povodí souhlasí se skutečným, protože přetékání do jiných povodí lze prakticky vyloučit. Vůči tomuto povodí byla ostatní povodí srovnávána:

Balance jednotlivých mezipovodí byly zjišťovány ze vzorce [1]:

$$B_n = O_n - S_a \times P_n \quad [1]$$

kde B_n je přebývající (+) nebo chybějící (-) množství vody v daném mezipovodí n (l/s)

O_n je rozdíl průtoků vodního toku odtékajícího a přitékajícího do daného mezipovodí (l/s), tj. průtok na koncovém profilu minus průtok na vstupním profilu do mezipovodí

S_a je specifický neovlivněný odtok, tedy průtok na profilu A v daném čase vydělený plochou povodí profilu A (l/s/km²)

P_n je plocha mezipovodí n (km²)

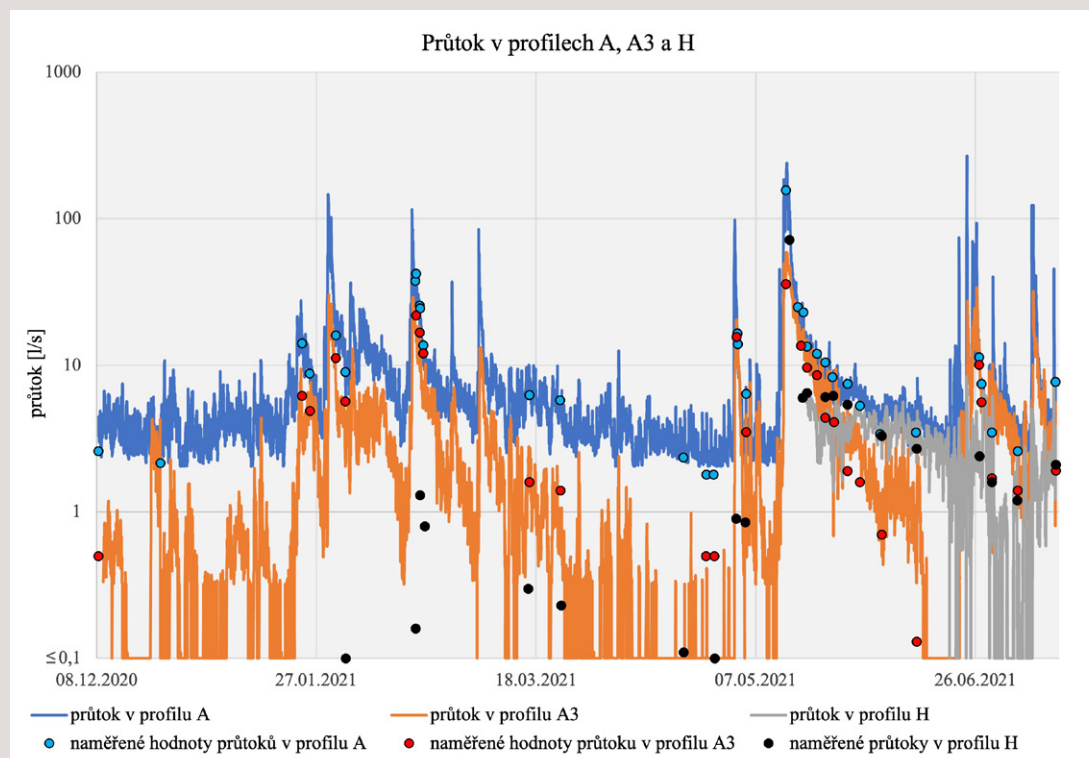
Aby se odlišily ztráty vody do vápenců od ztrát výparem (evapotranspirací) z potoční nivy, byla pro vybrané plochy vypočtena potenciální evapotranspirace pomocí Oudinovy metody (OUDIN et al. 2005), která využívá průměrných denních teplot vzduchu a která je v ČR běžně využívána i v modelu Bilan (VÚV TGM 2015). OUDIN et al. (2005) na rozsáhlém souboru dat prokázal, že teplota vzduchu je spolu se zeměpisnou šířkou povodí a pořadovým dnem v roce (vše ve výpočtu uvažováno) dostatečným parametrem pro věrohodný výpočet potenciální evapotranspirace z povodí. Použitá data teploty pochází z klimatické stanice Ondřejov, která je nejbližší stanicí s kontinuálním měřením, dostupnou na portálu ČHMÚ a s podobným průběhem teploty jako studovaná oblast a přitom mimo tepelný ostrov Prahy.

3. Výsledky a diskuze

3.1. Změny průtoku v čase, maximální a minimální průtoky

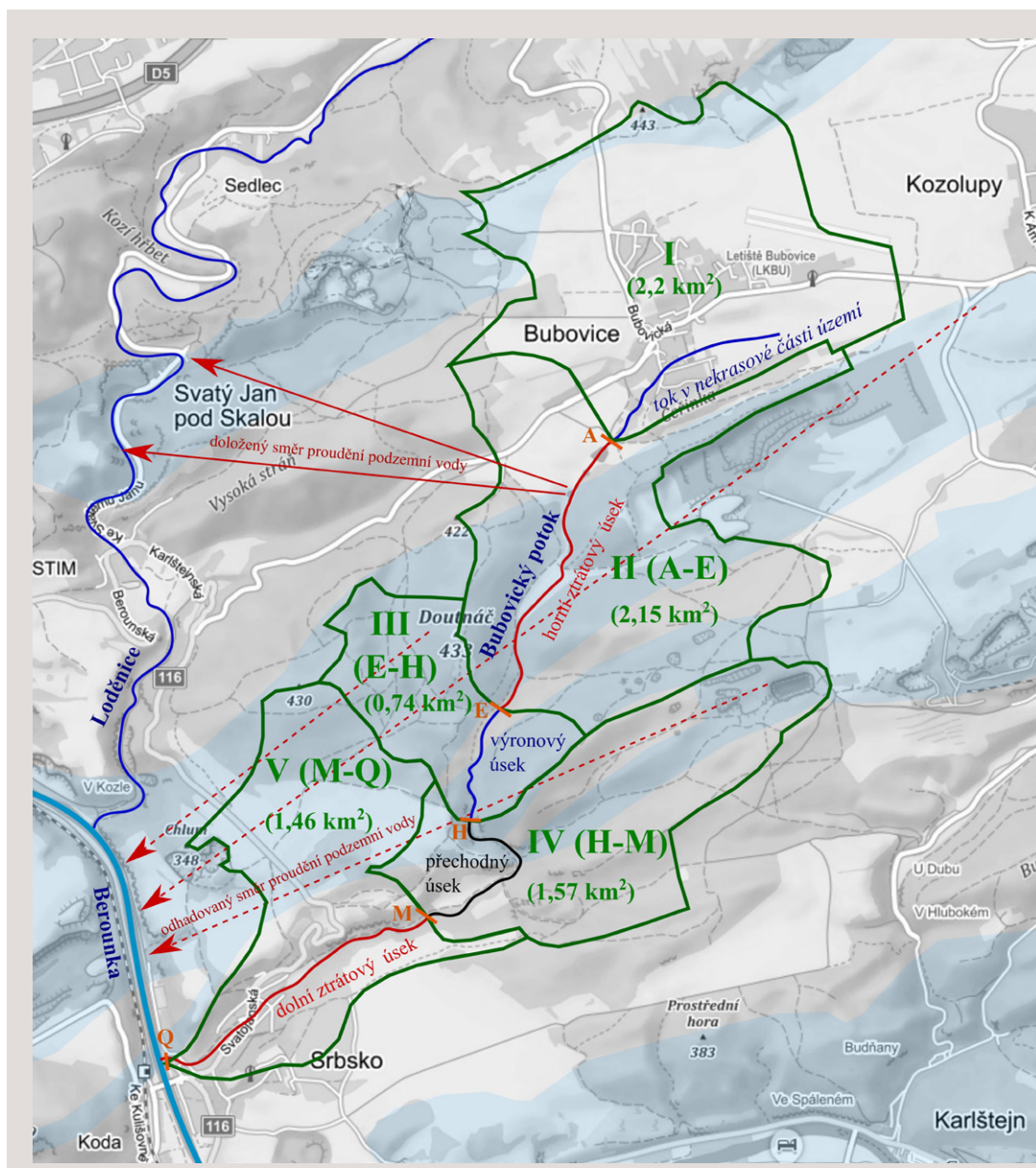
Kontinuálním měřením hladiny pomocí tlakových čidel a z ní a kalibrací odvozeného průtoku ve dvou profilech Bubovického potoka od prosince 2020 (profile A a A3), resp. května 2021 (profil H) do července 2021 byly zaznamenány nízké i nadprůměrně vysoké vodní stavy. Obrázek 4 popisuje v 30minutovém kroku vývoj průtoku v profilu A (nejvýše na toku), v profilu A3, který leží těsně pod obnovenou soustavou mokřadů a v profilu H na Bubovických vodopádech.

Nejvyšší průtok na Bubovickém potoce v roce 2021 (vždy kalendářní roky) nastal při kulminaci ze srážky ze 13.–14. 5. Při této kulminaci byl v profilu A změřen průtok 157 l/s, na Bubovických vodopádech průtok 72 l/s, u rybníka Březnice (nad Srbskem) průtok 108 l/s a v jinak téměř trvale suchém ústí Bubovického poto-



Obr. 4. Záznam tlakových čidel v profilech A, A3 a H převedený na průtok. V grafu jsou spojnicemi uvedeny průtoky v kroku 30 min, body zachycují manuálně měřené průtoky v těchto profilech.

Fig. 4. The record from pressure transducers at profiles A, A3 and H was converted to flow rates. In the diagram, flow rates in 30 min increments are indicated by full lines. Manually measured flow rates at these profiles are indicated by points.



Obr. 5. Tok Bubovického potoka rozdělený profily A, E, H a M na orografická mezipovodí 1–5. Hraniční profily byly vybrány tak, aby bylo povodí pokud možno pouze se ztrátami nebo, naopak, s nárůsty vodnosti potoka. Světle modrou poloprůhlednou barvou jsou zvýrazněny polohy souvrství hlavního kolektoru. Modrou čarou jsou vyznačeny výronové úseky, červenou čarou ztrátové úseky a černou čarou přechodný úsek. Plné červené šipky ukazují směry proudění podzemní vody doložené stopovací zkouškou (BRUTHANS et al. 2022), přerušované pak předpokládané proudění.

Fig. 5. The Bubovický Stream divided by profiles A, E, H and M into orographic subcatchments 1–5. Boundary profiles were set to divide the course of the stream into subcatchments with either purely losing or purely gaining reaches. Positions of the main aquifer are highlighted in light blue semi-transparent color. Gaining reaches of the stream are marked by a blue line, losing reaches are marked by a red line, and reaches with a variable function in space and time are marked by a black line. Full red arrows show the groundwater flow direction documented by the tracer test (BRUTHANS et al. 2022) while the dashed arrows show the assumed groundwater flow.

ka do Berounky průtok 52 l/s. Nejnižší průtok 1,4 l/s byl v profilu A zaznamenán 8. prosince 2020.

Dne 14. 5. 2021, ihned po významné kulminaci, byly změřeny průtoky v profilech H až Q. Mezi profilem I a profilem M, průtok narůstal až o 40 l/s, přičemž nejvýraznější změna vodnosti byla pozorována u profilu K. V úseku pod rybníkem Březnice už docházelo jen k pozvolné ztrátě vodnosti a z průtoku v celém úseku až k ústí do Berounky (profil Q) se ztrácelo 56 l/s.

Za nejnižších pozorovaných vodních stavů, kdy profilem A protékalo méně než 2 l/s vody, se tok zcela ztrácel mezi profilem A3 a B (pod hrází Dolního mokřadu). Níže, od profilu B až k ústí, bylo koryto za tohoto stavu suché. I Bubovické vodopády byly v období 10. 11. 2020 – 23. 1. 2021 zcela vyschlé. Při dalším nízkém vodním stavu v dubnu 2021 již vyvěral tok z vápenců 10 m nad prvním stupněm Bubovických vodopádů, v profilu H ale dosáhl průtoku jen pod 0,1 l/s a pod 3. jezírkem pod 1. stupněm vodopádů se úplně ztrácel do podzemí.

3.2. Bilance přímých změn průtoků v korytě toku

Tok Bubovického potoka lze rozdělit na několik úseků, které se vyznačují úbytky nebo nárůsty vodnosti (obr. 5). Od rozvodnice

Tab. 3. Vybrané ztráty průtoku mezi profily A–B (A–C), které popisují úplnou hltlost koryta (koryto bylo protékáno v celé délce segmentu).

Tab. 3. Selected streamflow losses between profiles A–B (A–C) which describe the full infiltration capacity of the streambed (the streambed was holding water in the whole of the given reach).

datum	ztráty A–B		ztráty A–C	
21.04.1996	2,1	l/s		
17.06.1996	0,5	l/s	1,5	l/s
01.07.1996	-0,5	l/s	-0,4	l/s
04.08.1996			0,3	l/s
06.11.1996	0,4	l/s	0,8	l/s
datum	ztráty A–B		ztráty A–C	
18.02.2021			28	l/s
20.02.2021	10,1	l/s		
02.05.2021	11,2	l/s		
17.05.2021	17,7	l/s		

po profil A se nachází neovlivněné povodí I, kde průtok v toku narůstá. Od profilu A až po profil F se nachází horní ztrátový úsek, ve kterém dochází ke ztrátám vodnosti vždy. Dále po proudu, od profilu F až po profil H (těsně před vodopády) je výronový úsek, kde obvykle postupně roste vodnost potoka, ale ve srážkově výrazně deficitním období je úsek zcela suchý. Od profilu H do profilu M je potom přechodný úsek, ve kterém byly zaznamenány jak ztráty, tak i nárůsty vodnosti. Tento úsek ale není účelné dále dělit. A nakonec, od profilu M až do posledního profilu Q (v ústí potoka do Berounky) je dolní ztrátový úsek, kde dochází k ztrátám vždy, pokud je ovšem na profilu M vůbec nějaký průtok.

Z měřených průtoků vyplývá (tab. 3), že v 90. letech dosahovaly ztráty mezi profily A–B v horním ztrátovém úseku až 2,1 l/s, přičemž byly zaznamenány i nárůsty do 0,5 l/s (v průměru dosahovaly ztráty 1,5 l/s). V roce 2020 a 2021 byly zaznamenány mezi profily A–B jen ztráty, které ale dosahovaly až 17,7 l/s (v průměru 5,7 l/s). Z maximálních ztrát plyne, že přímé ztráty mezi profily A–B se od 90. let zvýšily až čtyřikrát. Ztráty mezi profily A–B v tab. 3 lze srovnávat, jelikož byly zohledněny pouze případy, kdy voda dotékala korytem až do profilu B a ztráta se tak odehrávala v jednotně dlouhém úseku. V roce 2020 a 2021 byla už ve vzdálenosti 20 až 100 m pod hrází Dolního mokřadu (od profilu A3 do profilu B) běžně zjištěna až úplná ztráta průtoku a dál bylo koryto suché. Voda v horním ztrátovém úseku se tedy běžně ztrácela o 250 m výše než v 90. letech a jen po vydatnějších deštích dotékala do profilu B.

Mezi profily B–C (v horním ztrátovém úseku) dosahovaly zjištěné ztráty v 90. letech až 1 l/s (v průměru 0,3 l/s) a v roce 2020 a 2021 až 5,4 l/s (v průměru 0,4 l/s; HERZA 2021). Již v 90. letech dotékala voda k profilu C jen při kulminacích a ztráty mezi profily B–C tak byly běžně omezeny hltností různě dlouhé protékající části koryta. Hltností jsou zde myšleny maximální dosažitelné ztráty vodnosti do dna koryta v daném úseku za stavu, kdy je celý úsek protékán. Termín hltnost se běžně používá u ponorů jako limitní průtok, který je ponor schopen pohlcovat, než dojde k jeho zahlcení a voda v toku pokračuje dále korytem po proudu. Hltnost lze tedy určit jen při plném přetékání daného ztrátového úseku, při částečném přetékání jsou naměřené ztráty vždy nižší než hltnost.

V horním ztrátovém úseku mezi profily A až C se voda z toku vsakuje do sedimentů nivy. Odtok nivními sedimenty je ale vyloučen, protože mezi profily C a F je místy koryto vymleto až na suché vápencové skalní dno. Vsáklá voda se tedy může buď vypařit, nebo se musí vczovat do zkrasovělých vápenců. Plocha nivy mezi profily A a C činí pouhých 0,023 km². Ztráty průtoku v l/s mezi profily A a C, přepočtené na tuto nepatrnou plochu nivy, dosahovaly stovek l/s/km² a jsou tedy násobně vyšší než maximální možná evapotranspirace v letním období, která dosahuje jen 60 l/s/km². Je tak zjevné, že vliv evapotranspirace na ztráty vody v horním ztrátovém úseku je zanedbatelný (HERZA 2021). Vczování do vápenců potvrdil i výsledek opakovaných stopovacích zkoušek, který ukázal, že voda z horního ztrátového úseku opouští orografické povodí Bubovického potoka a pokračuje do pramenů v údolí Loděnice (BRUTHANS et al. 2022).

Ve výronovém úseku nad vodopády je nárůst průtoku běžně v řádu prvních l/s. Zatímco v 90. letech dosahovaly nárůsty průtoku mezi profily E–H až 15 l/s (v průměru 2,1 l/s), v roce 2020 a 2021 zde byly změřeny nárůsty průtoku do 6,5 l/s (v průměru 2 l/s) i ztráty do 0,5 l/s, které ale byly zřejmě jen tranzitním jevem sycení předtím suchých náplavů. Od 10. 11. 2020 do 23. 1. 2021 byl ale výronový úsek včetně Bubovických vodopádů zcela suchý v celé délce. Je tak zřejmé, že vývěry vody z vápenců jsou zde jen přetokovým

pramenem a že za nižších stavů stačí voda z povodí II odtékat vápenci zřejmě do Berounky.

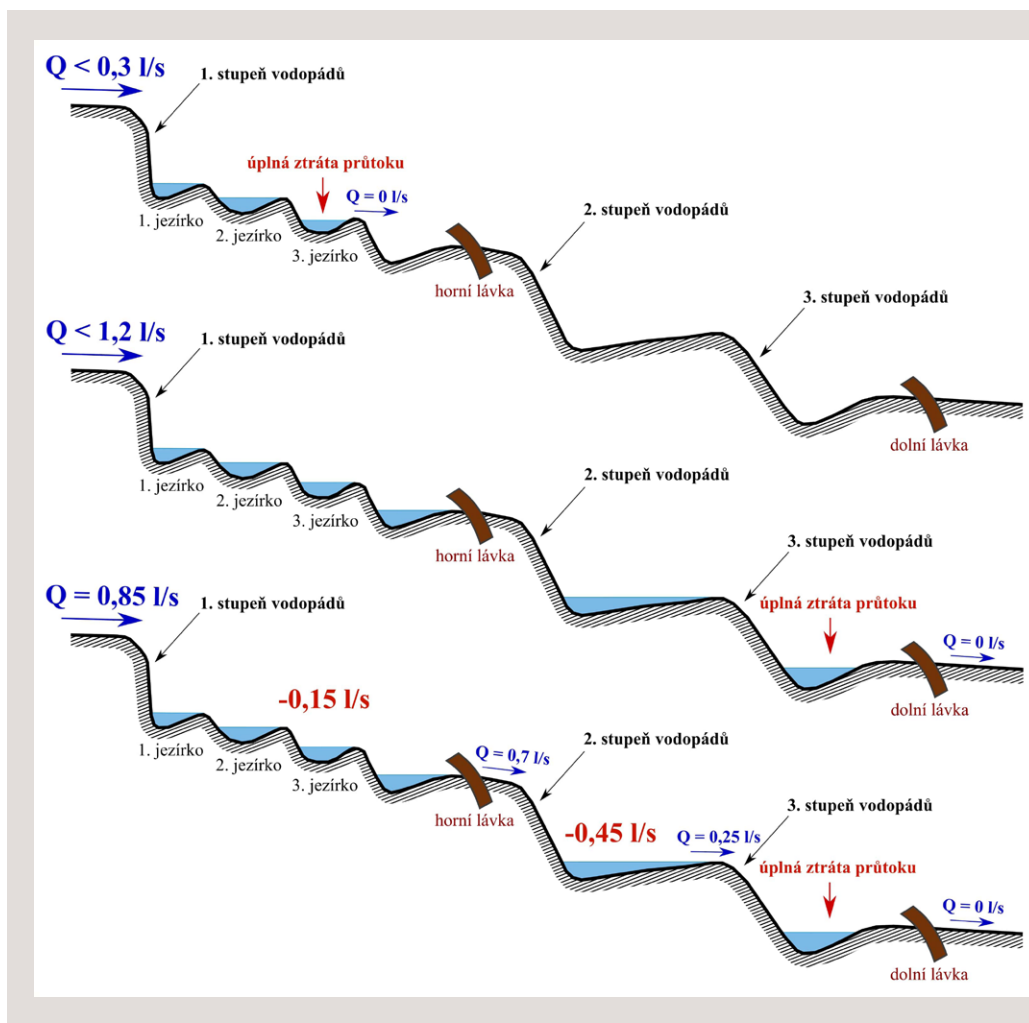
V přechodném úseku mezi Bubovickými vodopády dochází až do profilu J (Kubrychtova bouda) k výrazným ztrátám průtoku do štěrků ve výplni údolního dna a hladina podzemní vody bývá běžně až 3 m pod úroveň terénu (studna u Kubrychtovy boudy; HERZA 2021). Ztráty mezi profily H–I (od nejvyššího stupně vodopádů po první lávku pod vodopády) dosahovaly v 90. letech až 2,5 l/s a v roce 2021 až 4 l/s. Od profilu I až do úrovně profilu J však bývá koryto obvykle suché. Za vyšších vodních stavů ale dochází k nárůstu průtoku i těsně pod Kubrychtovou boudou od profilu J. Za nižších vodních stavů se ale voda objevuje pouze u studánky SK pod profilem K a z koryta po několika desítkách metrů opět mizí. Nárůsty průtoku mezi profily I–M výjimečně po vydatných deštích převyšují i ztráty mezi profily H–I. V 90. letech byly v mezipovodí IV zjištěny nárůsty průtoku až o 4,5 l/s. Dne 15. 5. 2021 ale došlo po kulminaci ze 14. 5. k nárůstu průtoku v mezipovodí IV až o 40 l/s.

Bubovické vodopády, které začínají profilem H (první stupeň vodopádů odshora), jsou samy o sobě rovněž ztrátovým úsekem. Úbytek průtoku až úplná ztráta průtoku byly zaznamenány počínaje 3. jezírkiem odshora. Měřením bylo zjištěno, že při průtoku 0,3 l/s profilem H se vsákne veškerá voda ve 3. jezírku odshora (ztráta do vápenců) a při průtoku do 1,2 l/s se vsákne veškerá voda v jezírku pod posledním 3. stupněm vodopádů, které ovšem už nemá pod sebou skalní práh, takže voda mizí do náplavů, kterými může pokračovat dále po proudu (obr. 6). 4. 5. 2021 byly změřeny přímé ztráty pod 1. a 2. stupněm Bubovických vodopádů, které popisují hltnost vápenců na vodopádech.

V celém dolním ztrátovém úseku (pod rybníkem Březnice) se voda až po ústí v Srbsku vsakuje do mocných potočních štěrků. Protože dolní ztrátový úsek je po velkou většinu času suchý, dochází zde k větším ztrátám vody jen při vysokých průtocích. Zatímco v 90. letech docházelo k přímým ztrátám až 7,5 l/s (v průměru o 2,4 l/s), v roce 2021 se z průtoku ztrácelo až 56 l/s (v průměru o 4,3 l/s). V případě tohoto úseku dotékal potok do závěrového profilu Q (ústí do Berounky) jen výjimečně a plná hltnost dna koryta tudíž nebyla téměř nikdy plně využita. Z vývoje po kulminaci ze 14. 5. 2021 je zřejmé, že se ztráty v dolním ztrátovém úseku snížily z 56 l/s (14. 5. 2021, 1 den po kulminaci) na 5,3 l/s (12. 6. 2021, 30 dní po kulminaci) a byly tak již srovnatelné se ztrátami z června 1995. V době měření průtoků v 90. letech byly štěrkové náplavy pravděpodobně nasycené a ztráty tak byly výrazně nižší, než při náhlém průtoku korytem do té doby suchého potoka. Postupné sycení náplavů a tím snižování jejich hltnosti (v důsledku zaplnění pórů vodou a tím snížení hydraulického spádu) může tedy výrazně snižovat na daném úseku ztráty v čase, a to i při přetékání stejné délky ztrátového úseku, a je proto nutné tento efekt uvažovat. Rozdíly v průtocích, respektive ztrátách a nárůstu vodnosti v jednotlivých úsecích mezi profily uvádí tabulka 4.

3.3. *Bilance jednotlivých mezipovodí Bubovického potoka*

Ztráty a nárůsty odtoku z jednotlivých mezipovodí i z celého povodí Bubovického potoka jsou popsány v tabulce 4. Na základě pozorování ztrát vody v korytě lze předpokládat však vody do vápenců ve všech mezipovodích, do kterých zasahuje hlavní kolektor (tab. 5). Ke ztrátám vody do vápenců dochází zřejmě přes většinu plochy mezipovodí II, ve kterém se v 90. letech ztrácelo až 14 l/s a které se v roce 2021 se ztrátami až 47 l/s podílelo na celkových ztrátách v povodí až z 50 %. Přitom jen přímé ztráty horního ztrátového úseku toku dosahovaly v roce 2021 až 24 l/s. K vysokým ztrátám



Obr. 6. Ztráty průtoku na Bubovických vodopádech. Nejnížší část obrázku odpovídá situaci ze dne 4. 5. 2021.

Fig. 6. Streamflow losses at the Bubovické waterfalls. The lowest frame of the figure corresponds to the situation on May 4, 2021.

dochází rovněž v mezipovodí V nad Srbskem. V 90. letech se zde celkově ztrácelo až 12,2 l/s. Ale po kulminaci ze 14. 5. 2021 bylo zjištěno, že jen přímé ztráty do náplavů potočních štěrků (a z nich případně do vápenců) mohou v mezipovodí V dosahovat dokonce až 56 l/s. Storativita volně zvodně ve štěrčích se pohybuje okolo 15 % (např. Káraný; BRUTHANS et al. 2018), protože zbytek je vyplněn kapilární vodou, čili asi 1/7 objemu přechodně zaplavených štěrků tvoří uvolnitelná gravitační podzemní voda. Při šířce nivy okolo 30–100 m a mocnosti štěrků okolo 10–15 m je maximální objem této dočasně zachytitelné vody zhruba 50–200 tis. m³, což odpovídá zásobní kapacitě schopné po dobu jednoho měsíce pohlcovat průtok v řádu nižších až vyšších desítek l/s, tedy v souladu s pozorovatelnými hltanostmi štěrkového koryta. Navíc nelze vyloučit vceřování vody z náplavů do chotečských vápenců.

Z přímých ztrát v horním ztrátovém úseku i z vypočtených ztrát přes plochy mezipovodí lze vyvodit, že celkové ztráty v mezipovodí II byly v roce 2020 a 2021 až trojnásobné oproti ztrátám v 90. letech. Bylo zjištěno, že zatímco v 90. letech se celkově ztrácelo a odtékalo mimo povodí Bubovického potoka až 26 l/s vody, v roce 2020 a 2021 se ztrácelo a odtékalo až 88 l/s vody.

V mezipovodí IV dochází ke ztrátám vody především do potočních štěrků, ale alespoň na Bubovických vodopádech také přímo do vápenců. V 90. letech dosahovaly celkové ztráty v mezipovodí IV až 3,3 l/s. V roce 2020 a 2021 ale byly zjištěny jak celkové ztráty až 18,3 l/s, tak po kulminacích naopak i nárůsty odtoku z mezipovodí IV až 11,1 l/s. U Kubrychtovy boudy pod profilem I se totiž nachází významné přírny, které se aktivují pouze po vydatných srážkách.

Celé mezipovodí III se vyznačuje výrony vody. Během měření bylo ale zjištěno, že délka protékané části výronového úseku toku se výrazně měnila. Vydělením průtoku v závěrovém profilu mezipovodí III (profil H) specifickým odtokem z neovlivněného povodí I bylo proto spočítáno i procento drénované plochy nad vodopády. Bylo zjištěno, že v 90. letech odpovídal medián drénované plochy 0,7 km², tj. 100 % plochy vymezeného orografického povodí 3, přičemž drénovaná plocha dosáhla v 90. letech i v roce 2021 po vydatných srážkách až 2,7 km², což odpovídá 386 % plochy povodí III. V roce 2020 a 2021 dosahoval medián drénované plochy jen 0,2 km², tj. 35 % plochy povodí III. Z toho lze usoudit, že po významnějších srážkových událostech zde dochází k přetoku vody do toku z jiného povodí či mezipovodí. Naopak za sucha stačí vody z tohoto povodí odtékat podzemím, aniž by se vůbec objevily na povrchu.

3.4. Chemické složení vody

Vzorky vody na chemické rozbory byly v letech 2004 a zejména 2020–2021 odebrány na profilech A, H a ze studánky u Kubrychtovy boudy (SK) a dalších objektech v povodí Bubovického potoka a okolí. Z analýzy iontů (tab. 6, obr. 7), konkrétně z velmi odlišných koncentrací chloridů a sodíku, je patrné, že voda na Bubovických vodopádech má jiný zdroj než voda Bubovického potoka v horním ztrátovém úseku. Sodík a zejména chloridy jsou v podzemní vodě stabilní a jejich koncentrace jsou tak jakýmsi otiskem prstu prostředí, ze kterého voda pochází. Oba ionty se v nízkých koncentracích vyskytují ve vodě infiltrované na lesních pozemcích a jejich vysoká koncentrace je naopak typická pro splachy ze solených silnic

Tab. 4. Souhrn přímých ztrát a nárůstů průtoku v jednotlivých úsecích potoka, nepřímých ztrát z dílčích povodí a celkových ztrát z povodí Bubovického potoka. Sestaveno z dat BRUTHANSE (1999) a HERZY (2021). Přímé ztráty nebo nárůsty průtoku označené * jsou získány z přetékání celého úseku, lze vzájemně srovnávat (hltnost), ostatní jsou jen z částečného přetékání a představují neúplnou hltnost. # při odtoku na profilu A pod 1 l/s/km² je pravděpodobné, že významná část vody teče náplavy a průtok na profilu je výrazně nižší, než skutečný průtok po započtení vody tekoucí náplavy.

Tab. 4 A summary of direct losses and gains in streamflow in individual reaches of the Bubovice Stream, indirect losses from its sub-catchments and total losses from the whole catchment. Compiled from data by Bruthans (1999) and Herza (2021). Direct losses or gains in streamflow marked with * were obtained where the entire stream reach was traversed by a stream and can be compared therefore with each other. Unmarked losses and gains in streamflow were obtained where the stream reach was only partly traversed by a stream and represents an incomplete infiltration capacity of the streambed. Symbol # refers to cases where the flow rate in profile A was below 1 l/s/km² and it is therefore likely that a significant part of water flows subsurface and the flow rate at the profile is significantly lower than the real flow rate.

datum měření	Specifický odtok A (l/s/ km ²)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku A-E (l/s)	odtok z povodí A-E by měl podle referenčního povodí A být (l/s)	v A-E se z toku a okolní krajiny celkově ztrácelo (l/s)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku E-H (l/s)	odtok z povodí E-H by měl podle referenčního povodí A být (l/s)	plocha povodí odpovídající nárůstu průtoku E-H (km ²)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku H-M (l/s)	odtok z povodí H-M by podle referenčního povodí měl být (l/s)	v H-M se z toku a okolní krajiny ztrácelo (+) / odtékalo (-) (l/s)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku M-Q (l/s)	odtok z povodí M-Q podle referenčního povodí A by měl být (l/s)	v M-Q se z toku a okolní krajiny ztrácelo (l/s)	v A-Q se z toku a okolní krajiny celkově ztrácelo (l/s)
16.03.1995	# 0,7	-1,5	1,5	3,0										5,6
22.04.1995	2,3	-5,0	4,9	9,9										18,6
21.05.1995	3,2	-7,0	6,9	13,9	2,1	2,4	0,7	*2,9	5,0	2,1	-5,0	4,7	9,7	26,0
03.09.1995	3,2										-7,5	4,7	12,2	26,0
08.10.1995	# 0,7	-1,5	1,5	3,0							-0,9	1,0	1,9	5,6
16.12.1995	# 0,6	-1,4	1,4	2,8										5,2
29.12.1995	2,1	*-4,2	4,4	8,6	1,2	1,5	0,6	0,3	3,2	2,9	-1,8	3,0	4,8	16,7
14.01.1996	2,3	-5,0	4,9	9,9	1,5	1,7	0,7							18,6
04.04.1996	2,7	-6,0	5,9	11,9	1,8	2,0	0,7	1,0	4,3	3,3	-2,8	4,0	6,8	22,3
21.04.1996	1,4	-3,0	3,0	6,0	2,0	1,0	1,5	1,3	2,2	0,9	-3,3	2,0	5,3	11,1
01.07.1996	1,1	*-0,8	2,5	3,3										9,3
04.08.1996	1,3	*-1,2	2,8	4,0	*3,4	0,9	2,7							10,4
01.10.1996	1,1							-0,7	1,8	2,5	-1,8	1,7	3,5	9,3
06.11.1996	# 0,8	*-1,3	1,8	3,0	1,1	0,6	1,3	-0,6	1,3	1,9	-1,0	1,2	2,2	6,7
13.12.1996	1,1							-1,4	1,7	3,1	-0,9	1,5	2,4	8,5
22.09.1997	# 0,1	-0,3	0,3	0,6										1,1
10.11.2020	# 0,8	-1,9	1,8	3,7	0,0	0,6	0,0	0,0	1,3	1,3	0,0	1,2	1,2	6,9
08.12.2020	# 0,3	-0,7	0,7	1,3	0,0	0,2	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	2,5
22.12.2020	# 0,4	-0,8	0,8	1,5	0,0	0,3	0,0	0,0	0,6	0,6	0,0	0,5	0,5	2,9
23.01.2021	5,1	-11,2	11,0	22,2	0,0	3,8	0,0	0,0	8,1	8,1	0,0	7,5	7,5	41,6
25.01.2021	2,8	-6,1	6,0	12,0							0,0	4,1	4,1	22,5
31.01.2021	6,9	-15,2	14,9	30,1							0,0	10,2	10,2	56,3
02.02.2021	3,7	-8,1	8,0	16,1	0,0	2,7	0,0	0,0	5,8	5,9	0,0	5,4	5,4	30,0
19.02.2021	10,8	-23,7	23,3	47,0	1,3	8,0	0,1	-1,3	17,0	18,3	0,0	15,8	15,8	87,8
20.02.2021	5,9	-12,8	12,6	25,4	0,8	4,3	0,1	-0,8	9,2	10,0	0,0	8,6	8,6	47,5
16.03.2021	2,5	-5,5	5,4	10,9	0,3	1,9	0,1	-0,3	4,0	4,3	0,0	3,7	3,7	20,4
23.03.2021	2,4	-5,3	5,2	10,5	0,2	1,8	0,1	-0,2	3,8	4,0	0,0	3,5	3,5	19,6
20.04.2021	# 0,7	-1,6	1,6	3,2	0,1	0,5	0,2	-0,1	1,1	1,3	0,0	1,1	1,1	5,9
25.04.2021	# 0,5	-1,0	1,0	2,1							0,0	0,7	0,7	3,9
27.04.2021	# 0,6	-1,3	1,3	2,7	0,1	0,5	0,1	-0,1	1,0	1,0	0,0	0,9	0,9	5,0
04.05.2021	2,5	-5,5	5,4	10,9	0,9	1,9	0,3	-0,9	3,9	4,8	0,0	3,7	3,7	20,3
14.05.2021								36,1			-56,0			
18.05.2021	5,8	-12,6	12,4	25,0	6,5	4,3	1,1	*20,2	9,1	-11,1				46,7
20.05.2021	5,1	-11,1	10,9	22,0										

datum měření	Specifický odtok A (l/s/km ²)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku A-E (l/s)	odtok z povodí A-E by měl podle referenčního povodí A být (l/s)	v A-E se z toku a okolní krajiny celkově ztrácelo (l/s)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku E-H (l/s)	odtok z povodí E-H by měl podle referenčního povodí A být (l/s)	plocha povodí odpovídající nárůstu průtoku E-H (km ²)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku H-M (l/s)	odtok z povodí H-M by měl podle referenčního povodí M být (l/s)	v H-M se z toku a okolní krajiny ztrácelo (+) / odtékalo (-) (l/s)	přímá ztráta (-) / nárůst (+) průtoku toku M-Q (l/s)	odtok z povodí M-Q podle referenčního povodí A by měl být (l/s)	v M-Q se z toku a okolní krajiny ztrácelo (l/s)	v A-Q se z toku a okolní krajiny celkově ztrácelo (l/s)
22.05.2021	4,4	-9,6	9,4	19,0	6,1	3,2	1,4	*11,8	6,9	-4,9	-17,9	6,4	24,3	35,6
24.05.2021	3,4	-7,4	7,3	14,7	6,2	2,5	1,8	*9,6	5,3	-4,3	-15,8	4,9	20,7	27,4
27.05.2021	3,0	-6,6	6,5	13,1	5,4	2,2	1,8							24,4
30.05.2021	2,0	-4,4	4,3	8,7										16,3
04.06.2021	1,2	-2,7	2,7	5,4	3,3	0,9	2,7							10,0
12.06.2021	1,3	-2,8	2,8	5,5	2,7	0,9	2,1							10,4
26.06.2021	4,9				2,4	3,6	0,5							39,7
29.06.2021	1,3	-2,8	2,8	5,5	1,6	0,9	1,2							10,4
05.07.2021	# 0,9	-2,1	2,0	4,1	1,2	0,7	1,3	-1,2	1,5	2,7	0,0	1,4	1,4	7,6
14.07.2021	3,2	-7,0	6,9	13,9	2,1	2,4	0,7							26,0

a hnojených polí a pro úniky ze septiků. Podobně i výsledky stopovací zkoušky (BRUTHANS et al. 2022), ukázaly, že voda z horního ztrátového úseku opouští orografické povodí Bubovického potoka a přetéká vápenci do povodí Loděnice.

Nárůsty sladkovodních vápenců – pěnoveců na stupních Bubovických vodopádů – ukazují, že na profil H přitéká, s výjimkou vysokých průtoků, jiná voda, než ta z horní části povodí Bubovického potoka. Pokud by se jednalo o povrchovou vodu z nekrasové části povodí, nemohly by z ní pěnovce v takovém množství narůstat. V minulých desetiletích dosahovala mocnost narostlého karbonátu až 0,5 m, po roce 2000 ale byla většina akumulací pěnoveců zničena kombinací velkých průtoků v roce 2013, period sucha a promrzání suchého koryta v zimě a pohybu osob a cyklistů (na dolním stupni) po pěnovecích.

Voda na Bubovických vodopádech, vyvěrající v mezipovodí 3, má výrazně vyšší koncentrace dusičnanů, než voda z horního ztrátového úseku nebo voda ve studánce u Kubrychtovy boudy,

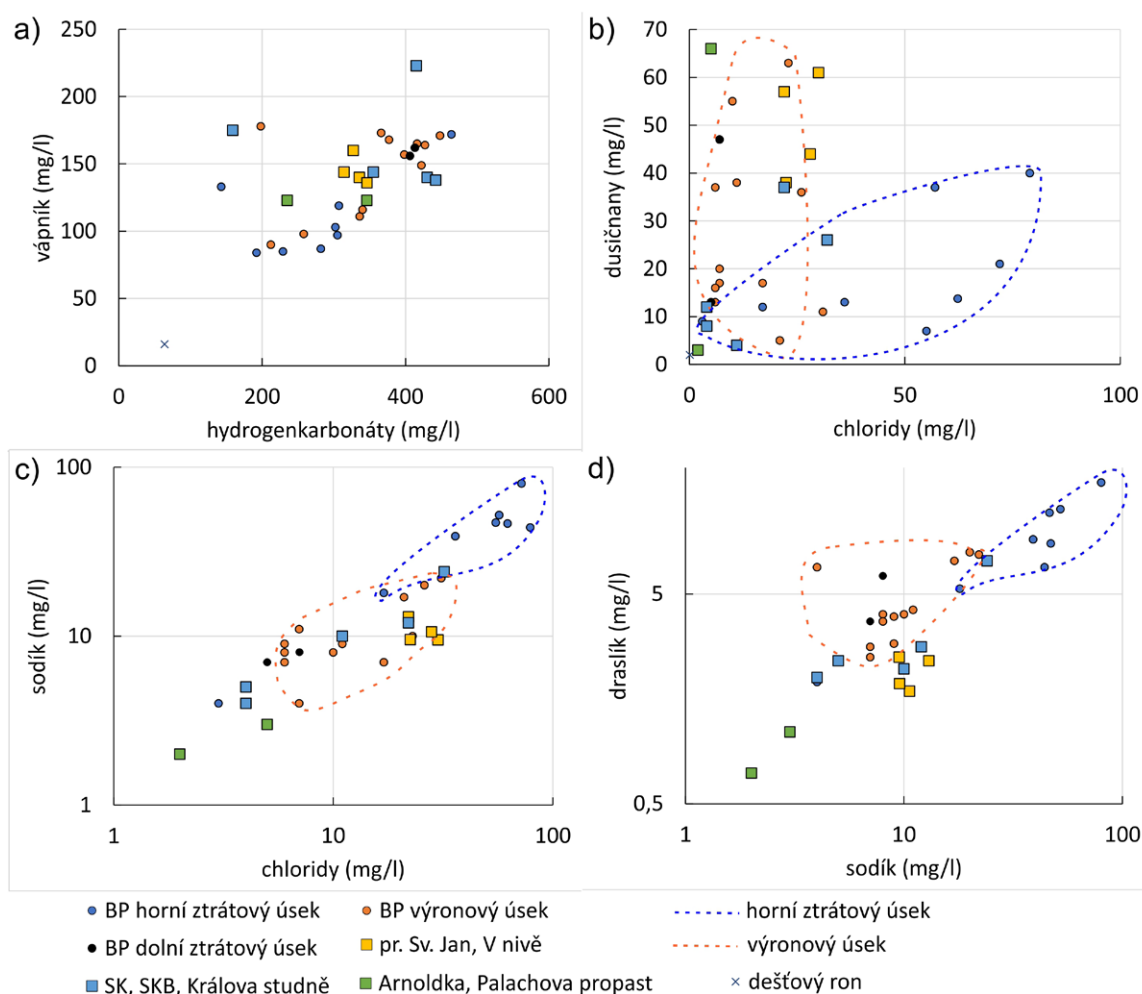
což svědčí o jejím pravděpodobném původu ze zemědělsky využívaných ploch. To je velmi překvapivé, protože v bližším okolí žádné pole ani jiné zdroje dusičnanů nejsou. Je možné, že zdrojem vody je část povodí II, a to vápence hlavního kolektoru j. od osy antiklinály Doutháče a jz. od obce Kozolupy. Pro tuto zdrojovou oblast vody svědčí vyšší koncentrace dusičnanů ze zde existujících polí a také skutečnost, že horniny siluru se rozdělují již v hloubkách několika desítek metrů pod povrchem horniny hlavního kolektoru v ose antiklinály Doutháče na dva samostatné pruhy. Severní pruh je podle stopovací zkoušky drénován do povodí Kačáku, vody z j. pruhu ale mohou směřovat k Bubovickým vodopádům (obr. 5, tab. 5).

Studánka u Kubrychtovy boudy má výrazně nižší koncentrace dusičnanů, sodíku, síranů a chloridů než voda potoka na Bubovických vodopádech a zřejmě tedy pochází z jiného zdroje (lesní povodí). Jedná se pravděpodobně o vodu z hlavního kolektoru z oblasti lomů u Malé Ameriky

Tab. 5. Popis mezipovodí Bubovického potoka, která byla vymezena na základě znalostí o ztrátových a výronových úsecích.

Tab. 5 Descriptions of the sub-catchments of the Bubovice Stream, defined on the basis of known reaches with negative and positive streamflow balance.

mezipovodí Bubovického potoka	Geologický a hydrogeologický popis
I (do profilu A)	Na izolátoru srbského souvrství. Oblast neovlivněná průsaky vody do hlavního kolektoru. Referenční mezipovodí, kde skutečná plocha povodí odpovídá ploše orografického povodí
II (profily A–E, horní ztrátový úsek)	Celé mezipovodí je tvořeno souvrstvími hlavního kolektoru. Sev. od osy antiklinály Doutháče odtok do povodí Kačáku, jižně od osy antiklinály Doutháče odtok zřejmě do povodí III (obr. 5)
III (profily E–H, výronový úsek)	Mezipovodí je tvořeno souvrstvími hlavního kolektoru a místy zasahuje i svrchní izolátor, který částečně tvoří i podloží koryta toku. Za velmi nízkých stavů povodí drénováno vápenci zřejmě do Berounky, za vyšších stavů vyvěrá voda, která přetéká Bubovické vodopády (obr. 5)
IV (profily H–M, přechodný úsek)	Severní část mezipovodí tvoří hlavní kolektor, jižní část svrchní poloizolátor a izolátor. Tok teče podél příčného zlomu, ze severovýchodu je v kontaktu se souvrstvími hlavního kolektoru a z jihozápadu je pod akumulacemi potočních štěrků v kontaktu s izolátorem. Severní část povodí drénována vápenci do Berounky (obr. 5)
V (profily M–Q, dolní ztrátový úsek)	Pod akumulacemi potočních štěrků je podloží tvořeno izolátorem a svrchním poloizolátorem, který je v okolí Srbska propustnější, protože choťečské vápence, které ho tvoří, jsou zde silně zkrasovělé. Voda proudí štěrky buď přímo do Berounky, nebo dotuje zkrasovělé choťečské vápence.



Obr. 7. Vztahy mezi ionty.

Fig. 7. Relationships between ions.

3.5. Diskuze důvodů zvýšené hltnosti ztrátových úseků

Možných příčin zvýšení ztrát průtoků Bubovického potoka od 90. let je více a pravděpodobně jsou způsobeny kombinací více faktorů. Základním faktorem je klimatická změna, v důsledku které se v posledních desetiletích prohlubují a prodlužují suchá období. Faktorem, který mohl přispět ke zvýšení ztrát vody, je snazší rozliv z postupně se zanářejícího koryta do nivy. Při průtoku 11,2–15,6 l/s se rozlivem z koryta do nivy ztrácelo 3–4 l/s a v samotném korytě se do profilu B ztrácelo 4–7 l/s. Při průtoku 6,2 l/s, kdy k rozlivu z koryta nedocházelo, se ztrácelo v korytě toku 6 l/s (tab. 7). Nárůst ztrát v horním ztrátovém úseku by tak mohl být částečně dán vsakem vody přes větší plochu. Zvýšení ztrát v horním ztrátovém úseku zřejmě způsobila, kromě klimatické změny, také zvýšená infiltrace vody kvůli jejímu zadržování v obnovených mokřadech po roce 2018. Při hloubení mokřadů došlo k porušení těsnící vrstvy holocenních sedimentů nivy a úniku vody do podložní výplně údolí z posledního glaciálu, které je mnohem propustnější (K. Žák, ústní sdělení). Z porovnání přímých ztrát v 90. letech a v roce 2020 a 2021 je zřejmé, že obnovené mokřady v horním ztrátovém úseku způsobily vyšší hltnost, tedy sice vyšší infiltraci do krasu, ale tím také nižší zbývající průtok Bubovického potoka na vodopádech (tab. 3; HERZA 2021). Ztráty v mokřadech samotných dosáhly v roce 2021 až 20 l/s a na přímých ztrátách mezi profily A–B se podílely až z 58 %.

Netradiční vysvětlení zvýšené ztrátivosti toku poskytlo pozorování z Turnovského krasu. Několik málo let po vybudování ČOV v Jenišovicích u Turnova se otevřel v korytě drobného toku od Jenišovic ponor s hltností přes 5 l/s (KŮRKOVÁ 2023), ačkoli během předchozích 20 let, kdy byl tok dotován z významné části nečištěnou kanalizační vodou, zde byly beze změny zaznamenány rozptýlené ztráty do sedimentů v korytě v řádu desetin l/s. Důvodem byly zřejmě organické nečistoty ulpívající na dně koryta a vytvářející málo propustné biofilmy, které po vybudování ČOV zmizely. Jedním z příčinných faktorů vyšších ztrát vodnosti Bubovického potoka tedy paradoxně mohlo být vybudování ČOV v Bubovicích. Absence organických nečistot může omezit tvorbu biofilmů, schopných snižovat propustnost dna koryta a ucpávat vznikající hltače ve dně koryta. Vliv blízkého lomu Čerínka na zvyšování ztrát vody je nepravděpodobný, jelikož prostor nejblíže toku byl vyláman již před měřením v devadesátých letech, těžba se od té doby posunula mnohem dále od toku (stovky m) a ani na průběhu hladin podzemní vody v jeskyních Čerínka a Arnoldka nebyly zjištěny změny (KOLČAVA 2013).

Za současného stavu se nedá očekávat, že by nějakým představitelným a přírodě blízkým způsobem bylo možné vodnost Bubovického potoka zvýšit nebo vodu převést přes horní ztrátový úsek a zvýšit tak vodnost na Bubovických vodopádech.

Tab. 6. Chemické složení vody Bubovického potoka, pramenů a dalších objektů.*Tab. 6. Chemical composition of water from the Bubovice Stream, springs and other objects.*

datum	místo	Ca (mg/l)	Fe (ug/l)	K (mg/l)	Li (ug/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	P (ug/l)	Si (mg/l)	Sr (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	pH lab
28.09.2004	profil H	178		2,5	5	13	7		3,9		17	134	17	198	
28.09.2004	profil B	133		5,3	11	16	18		5		17	87	12	143	
28.09.2004	Král. st.	175		2,2	18	19	10		4,5		11	167	4	159	
14.04.2005	pr. Sv. Jan	160	<5	2,5		15	9,5	20			30	110	61	327	
10.11.2020	profil A3	103	10	9,1	25	12	39	90	3,3		36	82	13	302	7,4
10.11.2020	SK	140	<5	2,4	20	16	5	<30	4,5		4	90	8	430	7
08.12.2020	profil A	87	<5	17	<2	14	80	300	5	0,3	72	137	21	282	7,2
08.12.2020	SKB	223	<5	7,2	<2	32	24	20	4,4	0,6	32	432	26	415	7,1
25.01.2021	profil H	90	20	6,7	<2	7	4	30	3,5	0,2	7	114	17	212	7,9
18.02.2021	profil A	84	900	6,7	14	9	44	200	6,8	0,2	79	62	40	192	7,3
18.02.2021	profil H	168	<5	4	8	11	8	<30	2,9	0,3	10	200	55	377	7,5
18.02.2021	SK	138	<5	2	11	15	4	<30	3,9	0,3	4	117	12	442	7,2
18.02.2021	profil M	162	<5	6,1	12	14	8	70	5,2	0,3	7	162	47	413	7,3
20.02.2021	profil H	173	<5	4	9	12	10	<30	3,1	0,3	23	180	63	366	7,2
16.03.2021	profil H	149	<5	2,9	<2	11	9	<30	3,3	0,3	11	103	38	422	7,9
02.05.2021	profil H	165	<5	2,8	<2	10	7	40	3,8	0,3	6	100	37	416	8,6
02.05.2021	profil B	85	10	8,7	<2	10	47	300	2,3	0,3	55	76	7	229	7,1
13.05.2021	dešťový ron	16	400	6	<2	1	0,4	150	5	0,02	<0,1	5	2	64	6,7
13.05.2021	profil H	98	20	7,7	3	8	22	200	4	0,2	31	62	11	258	7,5
17.05.2021	profil F	111	<5	7,2	3	10	17	200	5,4	0,3	21	62	5	336	7,3
17.05.2021	profil H	157	<5	4,2	<2	10	11	40	4,5	0,3	7	114	20	398	7,4
24.05.2021	profil H	164	<5	3,9	<2	11	9	30	4,3	0,3	6	112	16	427	8
24.05.2021	profil F	116	<5	7,9	<2	11	20	200	5,6	0,3	26	52	36	340	7,5
24.05.2021	profil B2	172	<5	1,9	10	6	4	<30	4,1	0,3	3	84	9	464	7,4
30.05.2021	pr. V nivě	144	<5	2,8	<2	12	12	<30	4,1	0,3	22	98	37	355	6,9
30.05.2021	Arnoldka	123	<5	1,1	<2	8	3	<30	2,7	0,2	5	90	66	235	7,1
30.05.2021	Palachova p.	123	170	0,7	<2	3	2	<30	2,9	0,1	2	50	3	346	7,2
30.05.2021	pr. Sv. Jan	144	<5	2,4	9	14	13	<30	4,1	0,3	22	110	57	314	6,8
12.06.2021	profil M	156	<5	3,7	10	14	7	<30	3,6	0,3	5	125	13	406	7,2
12.06.2021	profil H	171	<5	3,7	8	11	8	<30	4,2	0,3	6	115	13	448	7,1
12.06.2021	profil A	119	20	12,7	12	12	52	1000	5,1	0,3	57	101	37	307	7,1
18.09.2022	pr. V nivě	136	<5	1,87	6	12,5	9,54	<30	4,31	0,25	22,4	74,9	38	346	6,78
18.09.2022	pr. Sv. Jan	140	<5	1,72	6	13,8	10,6	<30	4,59	0,27	28	83,2	44	336	7,06
18.09.2022	profil A2	97	8	12,2	9	11,1	46,4	295	5,19	0,26	62,3	72	13,7	305	7,64

Tab. 7. Porovnání situací, kdy v úseku mezi profily A3 a B docházelo/nedocházelo ke ztrátám průtoku rozlivem z koryta.*Tab. 7. A comparison of situations in the reach between profiles A3 and B where losses of flow rate due to floodplain inundation were/were not encountered.*

datum	průtok v profilu A3		průtok v profilu B		rozliv	ztráta rozlivem		ztráta v korytě do profilu B	
23.01.2021	6,2	l/s	0,35	l/s	ne		l/s	5,85	l/s
31.01.2021	11,2	l/s	2,5	l/s	ano	4-5	l/s	3,7-4,7	l/s
20.02.2021	12,1	l/s	3,6	l/s	ano	3-4	l/s	3,5-4,5	l/s
02.05.2021	15,6	l/s	5,4	l/s	ano	3	l/s	7,2	l/s

4. Závěr

Úbytek průtoku Bubovického potoka ve ztrátových úsecích, stejně jako celkový deficit vody v jeho povodí, je dán zejména geologickými poměry oblasti (tok kříží pruhy propustných vápenců hlavního kolektoru). Vliv evapotranspirace na úbytek vody je zanedbatelný.

Velmi odlišné koncentrace chloridů i sodíku prokázaly, že voda vyvěrající nad Bubovickými vodopády má jiný zdroj, než voda Bubovického potoka v horním ztrátovém úseku. Rovněž voda objevující se ve studánce u Kubrychtovy boudy nepochází od vodopádů, pokud je koryto pod nimi suché.

Ze stopovací zkoušky je zřejmé, že voda z horního ztrátového úseku míří mimo povodí Bubovického potoka. Kvůli velmi vysoké hltivosti horního ztrátového úseku (přes 24 l/s) lze za současných podmínek očekávat, že voda Bubovického potoka z Bubovic bude dotékat na vodopády pouze vzácně.

Ze srovnání měření z 90. let a z roku 2020 a 2021 vyplynulo, že maximální ztráty průtoku v horním ztrátovém úseku pod Bubovicemi se zvýšily až čtyřikrát na 24 l/s a že místa v korytě, ve kterých běžně docházelo k úplné ztrátě vodnosti, se od 90. let posunula o 250 m výše proti proudu. Zatímco v tomto úseku prosakuje veškerá voda do vápenců, v dolním ztrátovém úseku (od rybníka Březnice nad Srbskem až k ústí) se voda při výjimečném průtoku korytem vcezuje do mocných potůčnických štěrků. Bylo zjištěno, v dolním ztrátovém úseku se může z průtoku ztrácet až 56 l/s.

Zásadním poznatkem je, že ztráty vody z celé plochy povodí Bubovického potoka, které v 90. letech činily maximálně 26 l/s, dosahují dnes až 88 l/s. Přitom mezipovodí II (vymezené pro horní ztrátový úsek), ve kterém se v 90. letech ztrácelo až 14 l/s, se v roce 2021 se ztrátami až 47 l/s podílelo na celkových ztrátách v povodí až z 50 %.

Příčinou zvýšení ztrát vodnosti v horní části toku Bubovického potoka může být jak častější vydrénování a vysychání nivních sedimentů, které pak mohou pohltit více vody z dočasně zavodněného koryta, tak i rozliv vody ze zaneseného koryta a její průsak přes plochu nivy. Významným faktorem je také podpora infiltrace do krasu v obnovených mokřadech pod Bubovicemi. Ke zvýšení ztrát možná paradoxně přispívá i relativně nedávné zavedení čištění odpadních vod, díky kterému se již netvoří šlemy na dně koryta snižující jeho propustnost. Tento jev je třeba ověřit přesnějším dlouhodobým monitoringem ztrát a bylo by zajímavé ho zkoumat i na jiných lokalitách v ČR.

V budoucnu by pak bylo přínosné provést stopovací zkoušku přímo na ztrátovém úseku na Bubovických vodopádech a určit, kam tato voda proudí.

Literatura

- BRUTHANS J. (1999). *Hydrogeologické poměry Českého krasu severně od řeky Berounky*. – Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta: 1–99. Praha.
- BRUTHANS J., KADLECOVÁ R., SLAVÍK M., KRÁLOVÁ M., FRYČ T., ČURDA J. (2020). 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. – *Geoscience Research Reports*, 53 (1): 47–54. Praha.
- BRUTHANS J., KŮRKOVÁ I., KADLECOVÁ R. (2018): Factors controlling nitrate concentration in space and time in wells distributed along an aquifer/river interface (Káraný, Czechia). – *Hydrogeology Journal*, 27: 195–210.

- BRUTHANS J., MAREŠ J., JÄGER O., HERZA T. (2022): Voda z ponoru Bubovického potoka v hloubce rychle podtéká klastickou výplň holiňsko-hostimské synklinály do pramenů v údolí Loděnice. – *Český kras*, 48: 5–17. Beroun.
- BRUTHANS J., ZEMAN O. (2000). Nové poznatky o hydrogeologii Českého krasu. – *Český kras*, 26: 41–49. Beroun.
- CIROKOVÁ J. (2020). *Rozhodnutí o nakládání s vodami, čj. MBE/18628/2020/ŽP-MôV*. – Městský úřad Beroun, Odbor životního prostředí. Beroun.
- HAVLÍČEK V. (Red. 1987): *Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000. List 12-414 Černošice*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- HAVLÍČEK V. (Red. 1993): *Základní geologická mapa ČSFR 1 : 25 000. List 12-411 Beroun*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- HERZA T. (2021): *Hydrologie a hydrogeologie Bubovického potoka*. – Bakalářská práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy: 1–55. Praha.
- HOMOLA V. (1945). *Deníky Vladimíra Homoly z let 1942–1945*. – Knihovna Správy jeskyní ČR. Průhonice.
- CHLUPÁČ I. (Red., 1989): *Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000. List 12-413 Králův Dvůr*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- KOLČAVA M. (2013): Sledování hladin podzemní vody v jeskyních na Paní hoře v Českém krasu a jejich abnormální stav v roce 2013. – *Český kras*, 39: 13–24; Beroun.
- KOPÁČ J. (2007). *Měření průtoku pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity*. – Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta: 1–68. Praha.
- KOVANDA J. (Red., 1984): *Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000. List 12-412 Rudná*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- KUKAČKA J., ALTOVÁ V., BRUTHANS J., ZEMAN O. (2008). Groundwater Flow in Crystalline Carbonates (Jeseniky Mts., Czech Rep.): Using Stream Thermometry and Groundwater Balance for Catchment Delineation. – *Acta Carsologica*, 37 (1): 125–131.
- KŮRKOVÁ I. (2023). *Charakter proudění podzemní vody v silně propustných sedimentech v západní části České křídové pánve*. – Doktorská disertační práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta: 1–205. Praha.
- LOUDIN L., HERVIEU F., MICHEL C., PERRIN CH., ANDRÉASSIAN V., ANCTIL F., LOUMAGNE C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling – *Journal of Hydrology*, 303 (1–4): 290–306.
- TOLASZ R. (2007). *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. – Český hydrometeorologický ústav: 1–255. Praha.
- VAK BEROUN (2014). *Kanalizační řád stokové sítě obce Bubovice*. – Vodovody a kanalizace Beroun: 1–24. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: https://www.vakberoun.cz/documents/verejne/bubovice_531103/kanalizacni_rad/kr-bubovice-2014.pdf
- VÚV TGM (2015). *Uživatelská příručka modelu Bilan*. – Dostupné z: <http://bilan.vuv.cz/bilan/uzivatelska-prirucka-modelu-bilan/dokumentace-modelu>.