

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



Charakter proudění a šíření hydraulické odezvy ve vybraných jeskyních Moravského krasu

Flow pattern and hydraulic response propagation in selected
caves of Moravian Karst

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Iva Kůrková

Vedoucí: RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

Praha, září 2011

Abstrakt

Tato práce je rozdělena do dvou částí. V první části se zabývám stopovacími zkouškami provedenými na několika lokalitách v Moravském krasu. V případě, že na stejném místě je k dispozici více stopovacích zkoušek provedených za různých průtoků, je možné zjistit závislosti rychlosti proudění, průměrné plochy průtočného řezu, podélné disperzivity a Pecletova čísla na průtoku. Z tohoto srovnání jsem interpretovala vlastnosti krasových kanálů, například, zda se jedná o plně zaplavený kanál, kanál s volnou hladinou nebo se v úseku nacházejí paralelní kanály. Dále jsem se zaměřila na srovnání mých výsledků s odbornými články věnujícími se stejné problematice jinde ve světě. V druhé části se věnuji záznamu hladiny a teploty vody ze tří čidel umístěných na různých místech jeskynního systému. Cílem bylo zjistit závislost rychlosti šíření hydraulické odezvy na průtoku. Bohužel výsledky tuto závislost nepotvrzují, rychlost šíření hydraulické odezvy pravděpodobně ovlivňuje řada dalších parametrů, např. změna délky plně zaplavených úseků.

Abstract

This thesis is divided into two parts. The first one is focused on tracer tests carried out in several karst conduits in the Moravian Karst. Several conduits were tracer repeatedly during different discharges. Flow velocity, flow cross section area, longitudinal dispersivity and Peclet number were plotted against discharge for each studied conduit. Based on this comparison of parameters I deduced characteristics of karst conduits for example presence of phreatic channel or vadose channel or multiple channels. I also focused on comparison of my results with publications dealing with the same subject elsewhere in the world. Second part of the thesis is based on measurements of water stage, discharge and temperature by pressure transducers at inlet and outlet points of karst conduit logged in 10 minutes interval. The goal was to find a relation between the velocity of hydraulic response propagation and discharge. Unfortunately, results show no correlation because there are probably more parameters influencing the velocity such as ratio of vadose/phreatic segments which may change rapidly during flood events.

Prohlašuji, že tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškerou literaturu a ostatní prameny, z nichž jsem při přípravě práce čerpala, řádně cituji a uvádím je v seznamu použité literatury.

V Praze, 17. 8. 2011

Iva Kůrková

Poděkování

V úvodu bych ráda poděkovala vedoucímu práce RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při vyhodnocování. Za poskytnutí dat průtoků z profilu na Jedovnickém potoce nad Rudickým propadáním děkuji Mgr. Stanislavu Lejskovi. Velké díky patří jeskyňářům z ZO 6-04 Rudice a ZO 6-01 Býčí Skála za zapůjčení materiálu a pomoc při instalaci tlakových čidel. Sandře Kejíkové a členům ZO 6-05 Křtinské údolí děkuji za pomoc při odběrech vzorků, za pomoc s analýzou vzorků potom Mgr. Jiřímu Kamasovi a Anitě Gregorové. Za výpomoc při stahování čidel v jeskyních patří díky Milanu Ježovi a všem kamarádům, kteří mě doprovázeli a také pomohli se stavbou přepadu na Staré řece. Především pak děkuji rodině za podporu a trpělivost.

Obsah

1.	ÚVOD A CÍL PRÁCE	- 6 -
2.	PŘÍRODNÍ POMĚRY	- 7 -
2.1.	GEOGRAFIE, KLIMA A HYDROLOGIE	- 7 -
2.2.	GEOLOGIE	- 7 -
2.3.	OCHOZSKÁ JESKYNĚ	- 11 -
2.3.1.	Geologie	- 11 -
2.3.2.	Geografie a hydrologie	- 11 -
2.4.	RUDICKÉ PROPADÁNÍ A BÝČÍ SKÁLA	- 14 -
2.4.1.	Geografie a hydrologie	- 15 -
3.	METODIKA	- 16 -
3.1.	MĚŘENÍ PRŮTOKŮ	- 16 -
3.1.1.	Chemická metoda	- 16 -
3.1.2.	Hydrologické křídlo	- 16 -
3.2.	MĚŘENÍ KONDUKTIVITY, HLADINY A TEPLoty VODY	- 17 -
3.3.	STOPOVACÍ ZKOUŠKY	- 20 -
3.2.1.	NaCl	- 21 -
3.2.2.	Fluorescein	- 22 -
3.2.3.	Vyhodnocení	- 22 -
4.	STOPOVACÍ ZKOUŠKY	- 27 -
4.2.	ARCHIVNÍ STOPOVACÍ ZKOUŠKY	- 27 -
4.2.1.	Povodí Říčky (Ochozská jeskyně)	- 27 -
4.2.2.	Povodí Křtinského potoka	- 33 -
4.2.3.	Jedovnický potok (Býčí skála)	- 34 -
4.2.4.	Povodí Punkvy	- 36 -
4.2.5.	Česká křídová pánev	- 37 -
4.3.	POPIS PROVEDENÝCH STOPOVACÍCH ZKOUŠEK	- 40 -
4.3.1.	Povodí Říčky (Ochozská jeskyně)	- 40 -
4.3.2.	Povodí Křtinského potoka	- 44 -
4.3.3.	Jedovnický potok (Býčí skála)	- 47 -
4.3.4.	Povodí Punkvy	- 50 -
4.4.	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ STOPOVACÍCH ZKOUŠEK PROVEDENÝCH ZA RŮZNÝCH VODNÍCH STAVŮ ...	- 51 -
4.4.1.	Rychlost proudění	- 51 -
4.4.2.	Koncentrace, disperze	- 57 -
5.	TEPLOTA A ŠÍŘENÍ HYDRAULICKÉHO RÁZU	- 62 -
5.1.	Rudické propadání – Býčí skála	- 62 -
5.2.	Přehrada	- 65 -
6.	ZÁVĚR	- 69 -
7.	POUŽITÁ LITERATURA	- 71 -

Seznam příloh

Příloha A: Data z provedených stopovacích zkoušek a výstupní soubory z programu Qtracer

Příloha B: Grafy a data týkající se vyhodnocení šíření hydraulického rázu v systému Rudického propadání a Býčí skály

Příloha C: Grafy znázorňující šíření hydraulické odezvy z Kaňonů v Býčí skále do vývěřů Jedovnického potoka

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

V krasových kanálech se v čase mění množství protékající vody, často i o několik řádů. Se změnou průtoku se mění i rychlost proudění a mnoho dalších parametrů (objem kanálu, disperzivita apod.). V ČR se dosud této problematice věnovala minimální pozornost, zejména proto, že až na výjimky nebylo na stejném úseku podzemního toku provedeno více stopovacích zkoušek, a pokud bylo, jednalo se obvykle pouze o kvalitativní stopovací zkoušky, které neumožňují určení většiny parametrů.

Cílem mé diplomové práce bylo popsat charakter proudění vody v krasových kanálech v Moravském krasu za různých vodních stavů. K tomu jsem měla použít stopovací zkoušky z terénních kurzů PŘF UK, které jsem prováděla spolu se studenty a místními jeskyňáři. Ve stejných lokalitách v minulosti provádělo stopovací zkoušky množství jiných autorů a záznamy o nich je možné dohledat v literatuře, proto by bylo zajímavé je srovnat s nově provedenými zkouškami.

Dílčím cílem práce bylo:

- 1) Vyhodnotit stopovací zkoušky z terénních kurzů a shromáždit archivní stopovací zkoušky ve stejných lokalitách s potřebnými údaji pro porovnání.
- 2) V krasových kanálech, kde byly na stejném úseku provedeny dvě a více stopovacích zkoušek za různých vodních stavů, srovnat jejich výsledky s vodním stavem a průtokem co se týče zejména rychlosti proudění, objemu kanálu a podélné disperzivity a případně návratnosti injektovaného stopovače.
- 3) Získané výsledky srovnat se zahraničními pracemi, zejména prací Morales et al. (2007), který podobou problematiku zpracovával v Pyrenejích.

Cílem druhé části práce bylo popsat šíření hydraulické odezvy v jeskynním systému Rudické propadání – Býčí skála na základě dlouhodobého měření hladiny a teploty na třech různých místech v tomto systému.

Poznámka:

Diskuze je v rámci přehlednosti a ucelení textu vždy na konci jednotlivých kapitol nebo jejich částí.

2. PŘÍRODNÍ POMĚRY

2.1. GEOGRAFIE, KLIMA A HYDROLOGIE

Moravský kras je tvořen pruhem vápenců severně od Brna o délce 25 km a šířce od 3 do 6 km. Plocha území je 85 km² (Musil et al. 1993). Průměrná teplota vzduchu klesá v závislosti na nadmořské výšce z 8,4 °C v jižní části na 6,5°C v severní části Moravského krasu. Podobně se mění i roční úhrn srážek – od 550 mm na jihu do 700 mm na severu (Atlas podnebí ČR). Kras se vyznačuje existencí větších toků s povodím na nekrasových horninách spodního karbonu východně od krasového území. Plochy povodí se pohybují od několika km² (Hostěnický potok) do 66 km² (Bílá voda; Musil et al. 1993). Toky se ztrácejí do ponorů, a to i za nejvyšších vodních stavů, a hltnost ponorů dosahuje až 18 m³.s⁻¹ a vydatnost největšího pramene (vývěru Punkvy) až 46 m³.s⁻¹ (Dostál in Musil et al. 1993). Všechny toky náleží do povodí Svitavy. Tabulka 2.1 uvádí průměrné průtoky na místech provádění stopovacích zkoušek.

Tabulka 2.1 Průměrné průtoky na zájmových tocích z dlouhodobého měření ČHMÚ (převzato z Dostál in Musil et al. 1993, poslední dva objekty z Bruthans 2006)

Profil	Průměrný průtok (l.s ⁻¹)
Lopač (Ostrov)	10
Malý vývěr Punkvy	134
Punkva (Tunel)	601
Vývěr Křtinského potoka	78
Křtinský potok (Josefov)	374
Vývěr Jedovnického potoka	160
Hostěnický potok (Hostěnice)	7,3
Říčka (Ochoz)	69
Vývěr Říčky I	51
Vývěr Říčky II	32
Říčka (Říčky)	160
Bartošova pec	28,4
Sv. Vojtěch	4,3

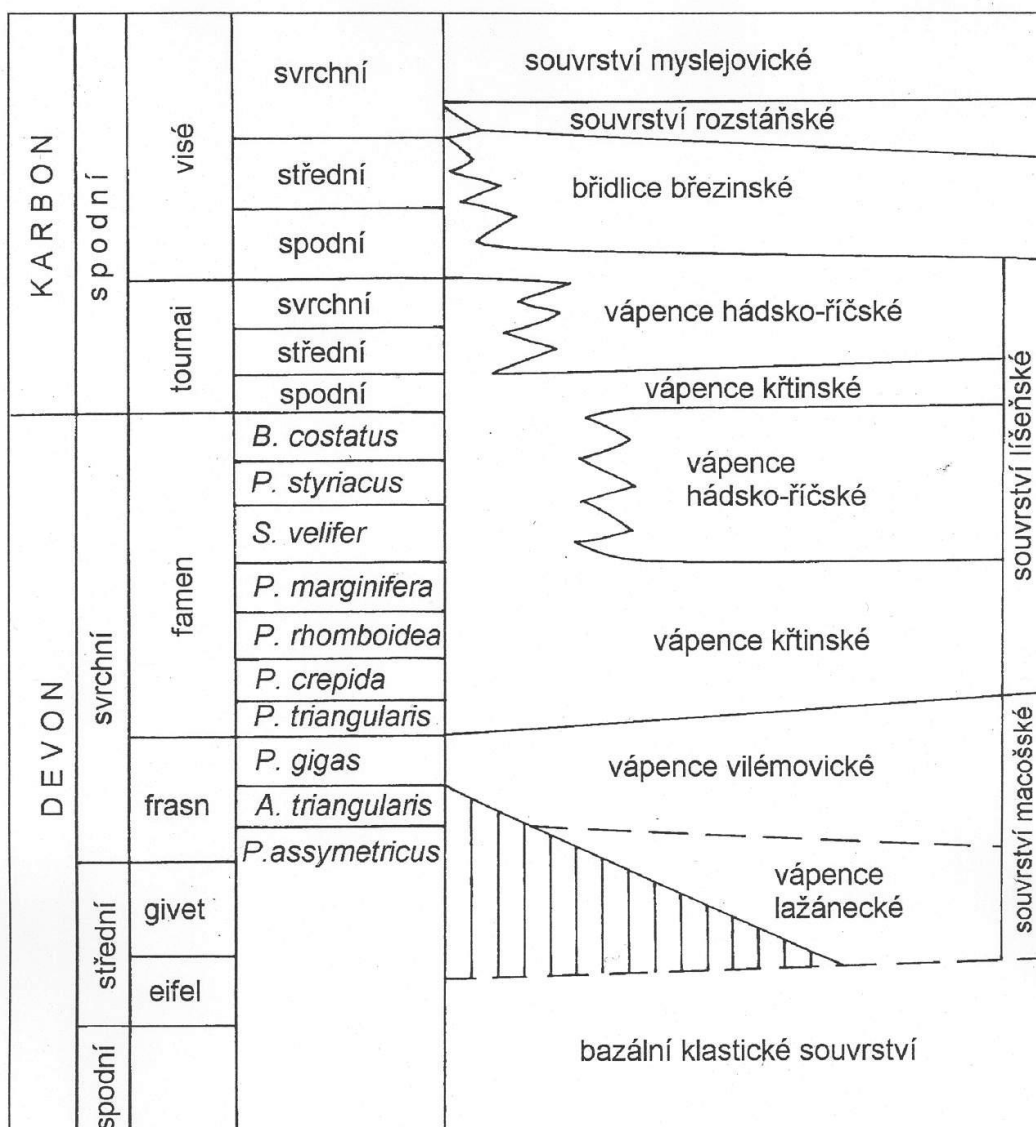
Moravský kras se podle příslušnosti k jednotlivým povodím dělí na tři části. Severní část náleží povodí Punkvy, která vzniká soutokem Bílé vody a Sloupského potoka a protéká nejrozsáhlejší jeskynní systém Sloupsko-Šošůvských jeskyní a Amatérské jeskyně. Střední část tvoří povodí Křtinského potoka, do kterého se těsně před koncem krasové oblasti vlévá Jedovnický potok protékající Rudickým propadáním a Býčí skálou. Jižní část Krasu je odvodňována Říčkou, která spolu s Hostěnickým potokem protékající Ochozskou jeskyní tvoří komplikovaný podzemní systém kanálů (Musil et al. 1993).

2.2. GEOLOGIE

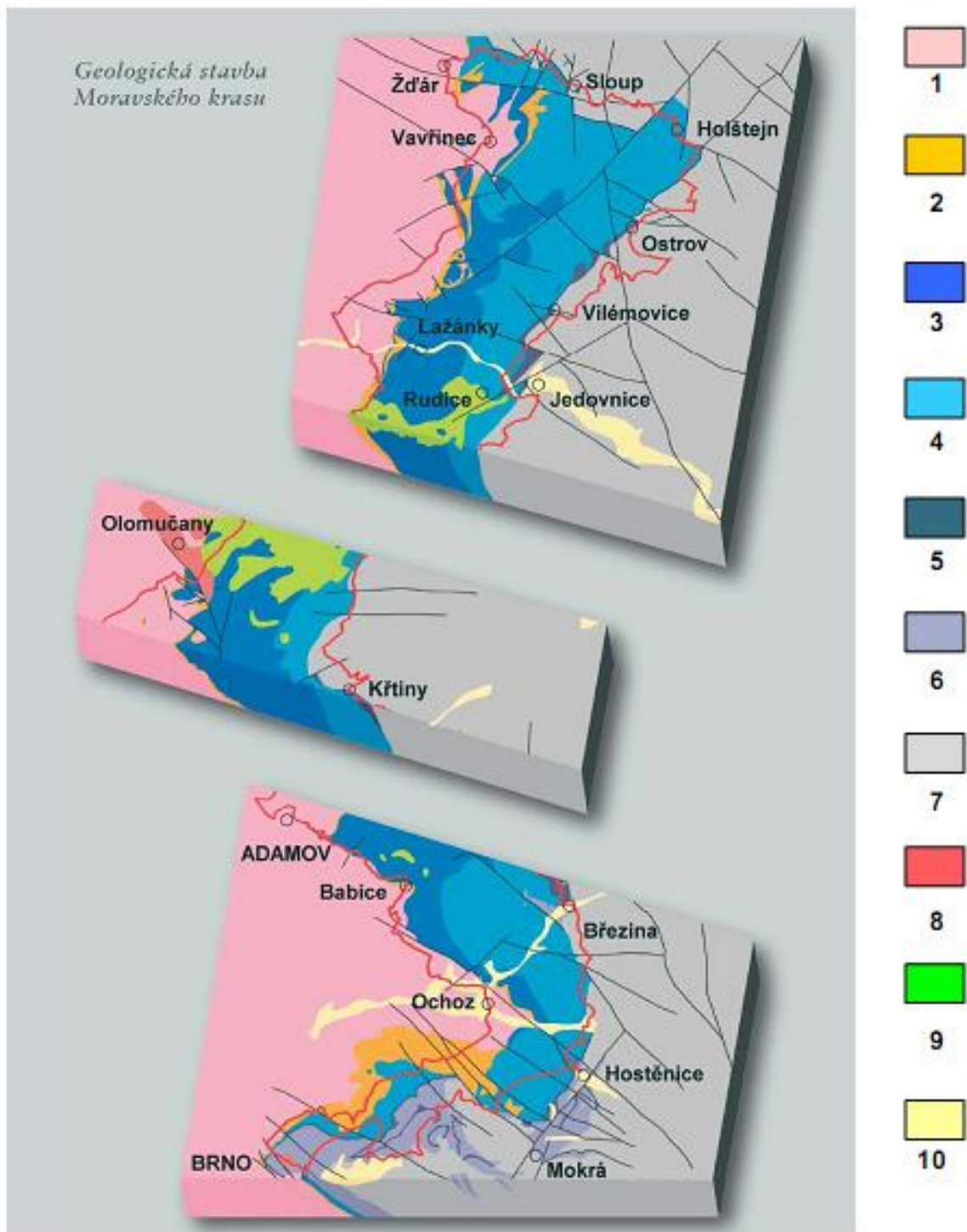
Podloží vápenců Moravského krasu tvoří brněnský granitoidní masiv a spodnodevonské bazální klastické souvrství, které v některých oblastech chybí. Dále následují devonské vápence, které se sestávají z macošského a líšeňského souvrství (obr. 2.1 a 2.2). Mocnost vápenců dosahuje okolo 1000 m (Hladil 1983). Lažánecké vápence jsou tmavě šedé, lavicovité a pozvolna přecházejí do světla

šedých korálových vápenců vilémovických (Dvořák a Pták 1963). V nadloží Macošských vápenců se nachází vápence líšeňského souvrství, které sedimentovalo od poloviny svrchního devonu až po začátek spodního karbonu. Skládá se z vápenců křtinských a hádecko-říčských. Nadloží vápenců tvoří ostrovské a březinské břidlice a kulmské prachovce a droby (Musil et al. 1993). Na Rudické a Babické plošině jsou zachovány nejstarší vrstvy křídových sedimentů - Rudické vrstvy. Jsou to pestré jíly s polohami pískovců, valouny vápenců a akumulacemi jurských rohovců, které tvoří výplň krasových depresí až do hloubky 100 m. Na jejich bázi se vytvořily polohy železných rud. V nadloží rudických vrstev se místy objevují sedimenty perucko-korycanského souvrství (Chlupáč et al. 2011).

Při variském vrásnění došlo k porušení devonských a spodnokarbonských sedimentů. Proces deformace mohl probíhat z části ještě během sedimentace pánvi. Produktem deformace byly vrásy, jejichž osy jsou většinou ve směru SSV – JJZ. Vrásové struktury jsou často porušeny kliváží, která je většinou ukloněna k západu. Nejmladšími deformacemi jsou horizontální posuny ker podél dislokací ve směru SSV – JJZ až SSZ – JJV, které uzavřely variskou orogenezi.



Obrázek 2.1 Stratigrafické schéma devonu a spodního karbonu jižní části Moravského krasu (Musil et al. 1993)



Obrázek 2.2 Geologická stavba Moravského krasu (Balák 1997): 1 – brněnský masiv, 2 – devonská bazální klastika, 3 – josefovské a lužánecké vápence macošského souvrství, 4 – vilémovické vápence macošského souvrství, 5 – křtinské vápence líšeňského souvrství, 6 – hádecko-říčské vápence líšeňského souvrství, 7 – břidlice, droby a slepence drahanského kulmu, 8 – svrchnojurské vápnité sedimenty, 9 – rudické vrstvy, 10 – badenské sedimenty.



Obrázek 2.3 Lokalizace nejdůležitějších zájmových lokalit

2.3. OCHOZSKÁ JESKYNĚ

Ochozská jeskyně se nachází v jižní části Moravského krasu v údolí Říčky (2.3). Tok Říčky prořezává původně celistvou krasovou plošinu od severovýchodu k jihozápadu v délce cca 6 km a rozděluje ji na dvě části: Mokerskou plošinu na jihovýchodě a Hádeckou na jihozápadě. Pod Hostěnicemi ústí zleva do Údolí Říčky Hostěnické údolí s Hostěnickým propadáním a Ochozskou jeskyní. Spodní část Hostěnického údolí pod propadáním se nazývá Kamenný žlíbek. Pravostranně se do Říčky vlévá Ochozský potok (Balák et al. 2004).

2.3.1. Geologie

Podstatnou část krasového povodí Říčky budují světle šedé vilémovické vápence macošského souvrství. Budují celou vrcholovou plošinu v oblasti Hádů a značnou část Mokerské plošiny. Významné výskyty jsou na v obou svazích Údolí Říčky mezi Svobodovým mlýnem a Muchovou boudou, např. na Horneku. Devonské vápence i spodnokarbonské horniny byly v této oblasti velmi složitě zvrásněny a rozlámány do dílčích ker (Musil et al. 1993)

2.3.2. Geografie a hydrologie

Říčka pramení blízko hájovny Říčky západně od Račic. Moravským krasem protéká od severovýchodu k jihozápadu Údolím Říčky. Délka toku Říčky od pramenů po vstup do krasového území činí 11,5 km a odvodňuje 26 km² Dražanské vysočiny, v této části povodí z 90% zalesněné. Celková plocha povodí Říčky je 76 km². Průměrný průtok Říčky v místě, kde opouští krasovou oblast, je 0.189 m³.s⁻¹. V oblasti Pod Hádkem protéká rekreační nádrž rybníčního typu o rozloze cca 2,1 ha a vstupuje do krasového území. V korytu Říčky leží Hádecká propadání, v nichž se potok ztrácí do podzemí (Balák et al. 2004).

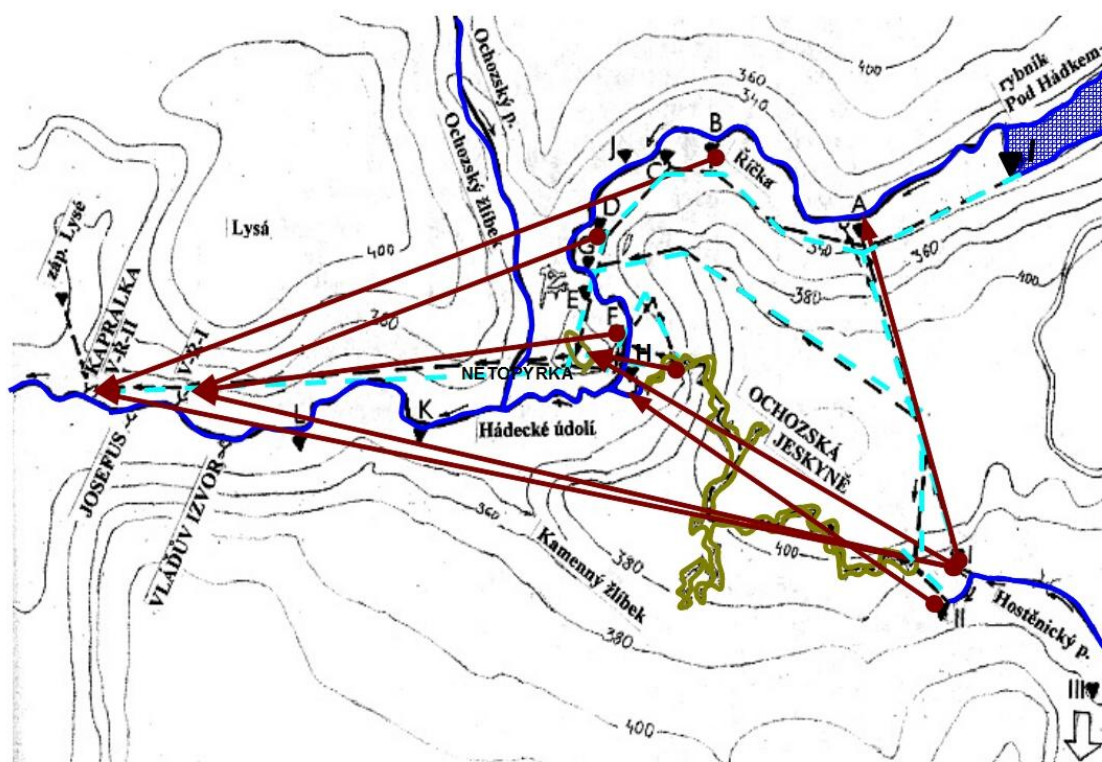
Ponory a vývěry na toku Říčky

Prvním propadáním Říčky je ponor na břehu rybníka pod Hádkem (I. „V Hádeckém rybníku“), který se aktivoval na počátku 90. let 20. století (obr. 2.4). V současné době je technickými zásahy vyřazen z provozu. Dalším občasným ponorem je Hádecká estavela (A.), v níž se voda ztrácí pouze za specifických vodních stavů (Himmel 1990, Balák et al. 2004). Asi 30 m pod estavelou se nachází v levém břehu malý povodňový vývěr (Himmel 1990). Prvním aktivním propadáním je **Hádecké propadání I** (B. „Velký ponor“), které leží o 200 metrů níže pod estavelou v levém břehu potoka. Jícen ponoru je ucpán hlinitými a štěrkovými sedimenty a hltnost ponoru dosahuje 15-18 l.s⁻¹ (Himmel 2010). Za velmi nízkých vodních stavů se celá kapacita Hádecké Říčky ztrácí do podzemí hned v prvních dvou ponorech (Balák et al. 2004).

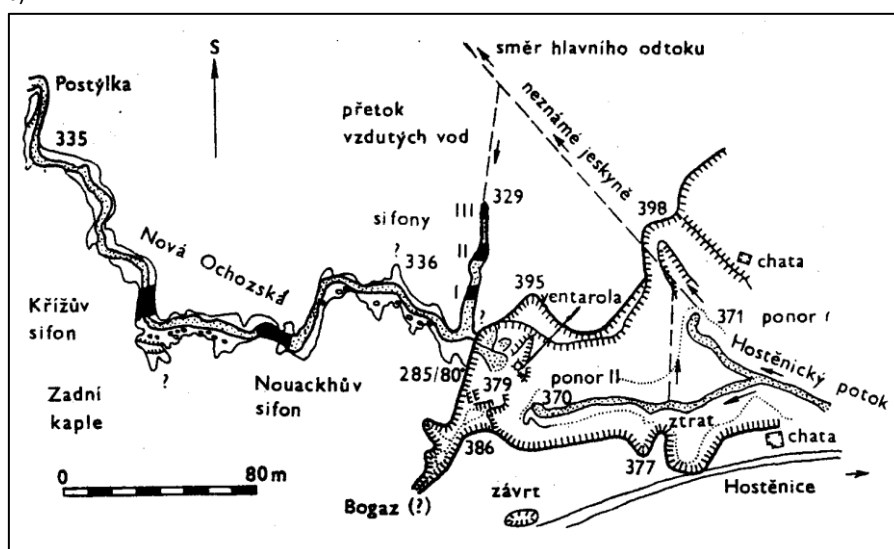
Povrchový tok Říčky dále pokračuje na západ v délce cca 120 m, kde se za běžných vodních stavů definitivně ztrácí v **Hádeckém propadání II** (C.) s hltností 18-20 l.s⁻¹. Za ponorem pokračuje povrchové povodňové koryto Hádeckého potoka k periodicky zaplavovanému **propadání III** (D. „Zaskružovaný“). Hádecké propadání III je zahloubeno v meandru Říčky ve vzdálenosti cca 200 metrů před jeskyní Ochozskou a 100 metrů před jeskyní Malčinou. Propadání bylo zbaveno přítoku zkrácením meandru prokopanou rýhou. Později zde byl učiněn pokus o prolongaci speleologickou skupinou vedenou R. Burkhardtem. Jícen ponoru byl zajištěn studnovou skruží. Práce byly ukončeny v hloubce 7 metrů, protože výzkum přerušila povodeň, která sondu zanesla. Dnes vtékají povodňové vody do ponoru korytem bývalého meandru a propadají se v blízkosti skruže (15-20 l.s⁻¹). Povodňové koryto

Hádeckého potoka pokračuje kolem vchodů jeskyně Ochozské a Netopýrky, kde je v pravém břehu vyvinuto **Hádecké propadání IV** (H. „Závrt“, 1-2 l.s⁻¹). Za soutokem s pravostranným přítokem Ochozského potoka, přibližně v prostoru mezi jeskyněmi Pekárna a Kůlnička, leží **Hádecké propadání V** (K., L.). Není zřetelně zahloubené a říčka se zde na několika místech postupně ztrácí. Od Hádeckého propadání V je povrchový tok Říčky za normálních vodních stavů až k Vývěřům Říčky suchý (Balák et al. 2004, Himmel 2010). Himmel (2010) uvádí další ponory: G. „Vládův“ (5-8 l.s⁻¹) a F. (ztrat v aluvii v době vysokého stavu vody).

a)



b)



Obrázek 2.4 a) Schéma podzemního odtoku od ponorů Říčky a Hostěnického potoka a lokalizace srovnávaných stopovacích zkoušek v oblasti Ochozské jeskyně (Himmel 2010), b) detail oblasti ponorů (Himmel 1990)

Ve vývěrech Říčky I a II se ponorné vody opět objevují na povrchu. V této oblasti opouští Říčka krasové území. Celé povodí Říčky vztaheno k vývěřům obnáší 42 km² z 80 % zalesněného území (Balák et al. 2004). Vlastní krasové povodí Říčky má rozlohu 4,8 km². Výškový rozdíl mezi Hádeckou estavelou a Výtokem Říčky II činí pouze 22 m při délce povrchového toku 1950 m (Balák et al. 2004). Vývěry říčky se nacházejí v blízkosti kontaktu vápenců a bazálních klastik, případně brněnské vyvěřeliny. Asi 50 m pod vývěrem II po proudu se nachází malý pramen Kaprálova studánka, který se systémem ochozské jeskyně nemá žádnou spojitost, jak se prokázalo pomocí stopovacích zkoušek (Himmel 2010).

Ponory Hostěnického potoka a Ochozská jeskyně

Hostěnický potok pramení východně od obce v blízkosti vrchu Kalečnick (354 m.n.m.). Délka Hostěnického potoka od pramene k propadání je 5 km, plocha povodí je 7,5 km² z 80 % zalesněná. Potok protéká obcí Hostěnice a vtéká do poloslepého údolí, kde leží jeden aktivní (Hostěnické propadání I) a jeden povodňový ponor (Hostěnické propadání II). Hydrologie podzemí je značně složitá, kdy dochází k mimoúrovňovému křížení s vodami Říčky (obr 2.4; Balák et al. 2004, Himmel 1990). Za velmi nízkých vodních stavů voda z propadání protéká neznámými systémy k vývěřům Říčky I a II. Při průtoku větším než 5,4-6 l. s⁻¹ začíná voda vytékat Hádeckou estavelou (průtok 5.5 l.s⁻¹) a malým vývěrem, který se nachází cca 5 m pod ním a jehož kapacita je maximálně 1,5 l.s⁻¹. Pokud je průtok vyšší než 19, 4 – 19,9 l.s⁻¹, nadbytečná voda přetéká Sifonovou chodbou se třemi objemnými sifony pod propadání II a dále do Ochozské jeskyně (obr. 2.4) Při velkých průtocích se části jeskyně často zanášejí, proto občas mohou být některé trativodné větve zcela ucpané sedimenty (Himmel 1990).

Ochozská jeskyně s délkou 1750 metrů je nejdelší v povodí Říčky a řadí se k největším v Moravském krasu (Balák et al. 2004). Celková délka nepřístupných podzemních toků Říčky a Hostěnického potoka přesahuje 3 km a jejich průměrná plocha průtočného profilu je 0,26 m² (Himmel 2010).

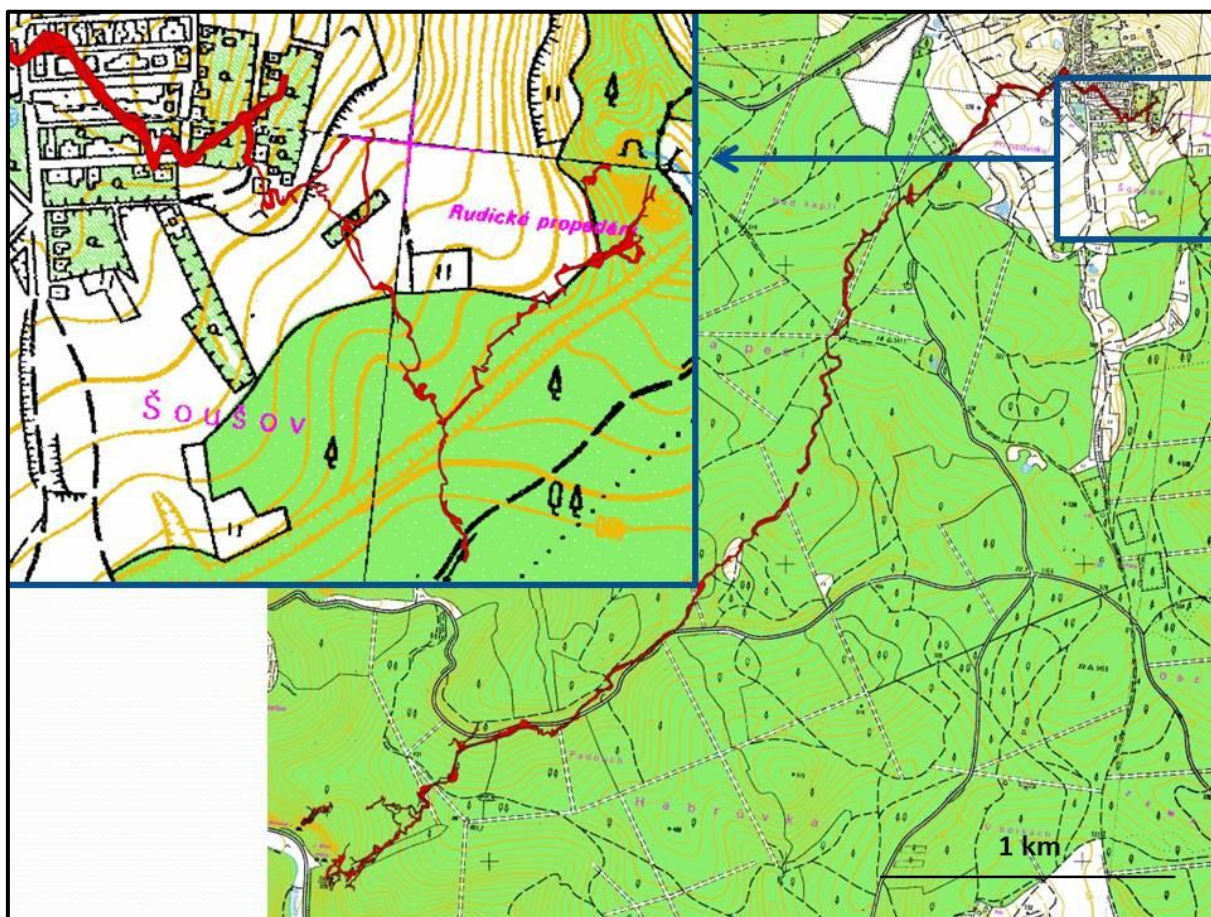
Hltnost Hostěnického propadání I kolísá mezi 20 a 50 l.s⁻¹ podle stavu zanesení ponoru. Při vyšších průtocích Hostěnický potok pokračuje do propadání II a odtud přímo do Nové Ochozské jeskyně dlouhé 550 m. Dále tok pokračuje přes dva polosifony do prostor Hlavních dómů ve staré Ochozské jeskyni a Hadicích ke spodnímu vchodu a vlévá se do povrchového koryta Říčky. Hlavní dómy jsou tvořeny mohutnou chodbou 250 metrů dlouhou, místy až 30 metrů širokou a 15 – 20 metrů vysokou (Himmel 1990). Chodba je téměř ke stropu vyplněna štěrky, písky a jíly, které byly uloženy v klidném prostředí vodou proudící jihovýchodním směrem. Při oživení eroze se řečiště zařezávalo do vlastních sedimentů. Vstupní meandrující chodba dlouhá 183 m se nazývá Hadice. Vystupující skalní podklad je téměř bez sedimentů, bohaté erozní tvary ve stěnách jeskyně svědčí o jejím malém geologickém stáří (Kadlec 2003, Himmel 1990). Rozměry chodby umožňují volný průchod člověka; díky tomu byla jeskyně v minulosti několikrát zpřístupněna veřejnosti. Hadice má místy stropní sníženiny, v nichž je průchodný profil vysoký asi 1,5 metru. Povodňové vody zaplavují tato místa až ke stropu a vytvářejí sifony (Balák et al. 2004).

V Ochozské jeskyni se v občasném toku nachází několik trativodů s minimální hltností (<0,3 l.s⁻¹). Významná je pouze dvojice trativodů 7 m před vchodem s hltností 17 l.s⁻¹ a 3-4 l.s⁻¹. Od trativodu tok bifurkuje do dvou nestejně dlouhých větví a před jeskyní Netopýrka se tyto větve opět spojují. Za Netopýrkou se tento tok spojuje s kanálem vedoucím od propadání I k vývěřům Říčky (Himmel 1990 a 2010).

Vchod do jeskyně Netopýrky se nachází v protějším svahu od Ochozské jeskyně. Její známá délka činí 120 m, klesá do hloubky 10 metrů k podzemnímu toku a jedná se o nejnižší místo, kde je možné zastihnout řečiště podzemních vod. Tok je zde aktivní celoročně, jedná se o větev spojující Hádecká propadání a vývěry Říčky, při povodňových stavech přitéká voda z trativodu vlevo za vchodem do Ochozské jeskyně. Další průzkum jeskyně je omezen hlubokými sifony a rozměry chodeb na hranici průleznosti (Kos a Kučera 2006).

2.4. RUDICKÉ PROPADÁNÍ A BÝČÍ SKÁLA

Jeskynní systém Rudického propadání a Býčí skály je druhým nejdelším systémem Moravského krasu. Nachází se na Jedovnickém potoce a vede od ponoru Rudického propadání po vývěr pod Býčí skálou (obr. 2.3a 2.5). Jeskyně zde vedou 200 m pod zemským povrchem ve vápencích macošského souvrství. Vzdušnou čarou jsou tyto dva body vzdáleny cca 4 km, prozkoumané podzemní prostory včetně odboček mají celkovou délku přes 13 km (Musil et al. 1993). Vlastní řečiště má délku 6 km.



Obrázek 2.5 Mapa systému Rudického propadání a Býčí skály s detailem oblasti propadání.

2.4.1. Geografie a hydrologie

Jedovnický potok pramení mezi Kotvrdovicemi, Senetářem a Krásenskem a protéká Jedovnickou kotlinou, kde na něm leží několik rybníků. Pod rybníky vtéká na krasové území do slepého údolí, na jehož konci se ztrácí v Rudickém propadání. Kaskádou vodopádů se potok dostává 110 metrů pod povrch do Wankl-Mládkova dómu. Dóm je spojený krátkou štolou s dalším pokračováním potoka, který zde 600 metrů teče úzkou meandrující chodbou vytvořenou na tektonické poruše. V tomto úseku se do Jedovnického potoka napojuje levostranný přítok Tipeček a je ukončen sifonem. Sifon je možné obejít 45 m dlouhou Chodbou vzdechů. Po 150m pravostranně přitéká Stará řeka a charakter chodby se mění na široký tunelovitý, protože je pravděpodobně mnohem starší než předchozí úsek (Musil et al. 1993). Voda sem přitéká z jeskyně Svážná studna vzdálené cca 1500 m severně (Otava a Kahle 2003). Jedovnický potok pokračuje dalších přibližně 2600 m přes jeden sifon a dva polosifony k Srbskému sifonu, který odděluje Rudické propadání od Býčí skály.

Za Srbským sifonem potok pokračuje přes 2 km jeskyní Býčí skála přes dva sifony, okolo kterých byla jeskyně zpřístupněna vyraženými štolami. Vchod do jeskyně je paleovývěř Jedovnického potoka, v současnosti potok cca 500 m před vchodem uhýbá do úzké chodby Kaňonů, sifonem protéká do Májových jeskyní a dalšími zatopenými jeskyněmi teče do Barové jeskyně a dalším sifonem do vývěřů. Celý jeskynní systém podél toku je známý a i zaplavené části byly proplavány speleopotápěči. Při povodních přetéká voda z Kaňonů do Šenkova sifonu a při extrémní povodni i ven vchodem do jeskyně (Musil et al. 1993).

3. METODIKA

3.1. MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

3.1.1. Chemická metoda

K měření průtoku se používá stopovač, v mém případě NaCl rozpuštěný ve vodě, který se injektuje po celé šířce toku úměrně k množství protékající vody. Průnikovou křivku jsem získala měřením konduktivity přístrojem Cond 340i v intervalu 5 sekund. Jde v podstatě o stopovací zkoušku, kde se návratnost stopovače považuje za stoprocentní. Po odečtení pozadí od naměřené konduktivity je možné spočítat koncentraci NaCl a podle míry zředění spočítat průtok. Kalibrace sondy se provádí smísením vody měřeného toku s malým množstvím roztoku o známé koncentraci NaCl (10 g l^{-1}). Z několika kalibračních bodů lze určit směrnici mezi množstvím přidaného NaCl a nárůstem konduktivity.

Důležitý je výběr vhodného profilu pro měření. Je třeba rovnoměrné rozmíchání NaCl po celém profilu, tedy tok s překážkami, kde voda proudí různými směry a dobře se mísí. Nejsou vhodné přímé toky, kde voda proudí laminárně a k promíchání nedojde. Nevhodný je také členitý tok s mnoha tůněmi, kde se stopovač zdrží dlouhou dobu. Při příliš krátké vzdálenosti je velká pravděpodobnost nerovnoměrného promíchání a nástup píku rychlý, takže přístroj nestihne zaznamenávat změny konduktivity. Naopak při velké vzdálenosti může být stopovač příliš naředěný, hrozí jeho ztráty a měření může trvat velmi dlouho. Ideální doba na jedno měření je 2 až 5 minut. Na jednom profilu jsem prováděla vždy 3 až 4 měření pro kontrolu správnosti a zvýšení přesnosti měření. Výsledný průtok na profilu je aritmetický průměr všech provedených měření. Chyba měření je obvykle menší než 10 % (Kopáč 2007).

3.1.2. Hydrologické křídlo

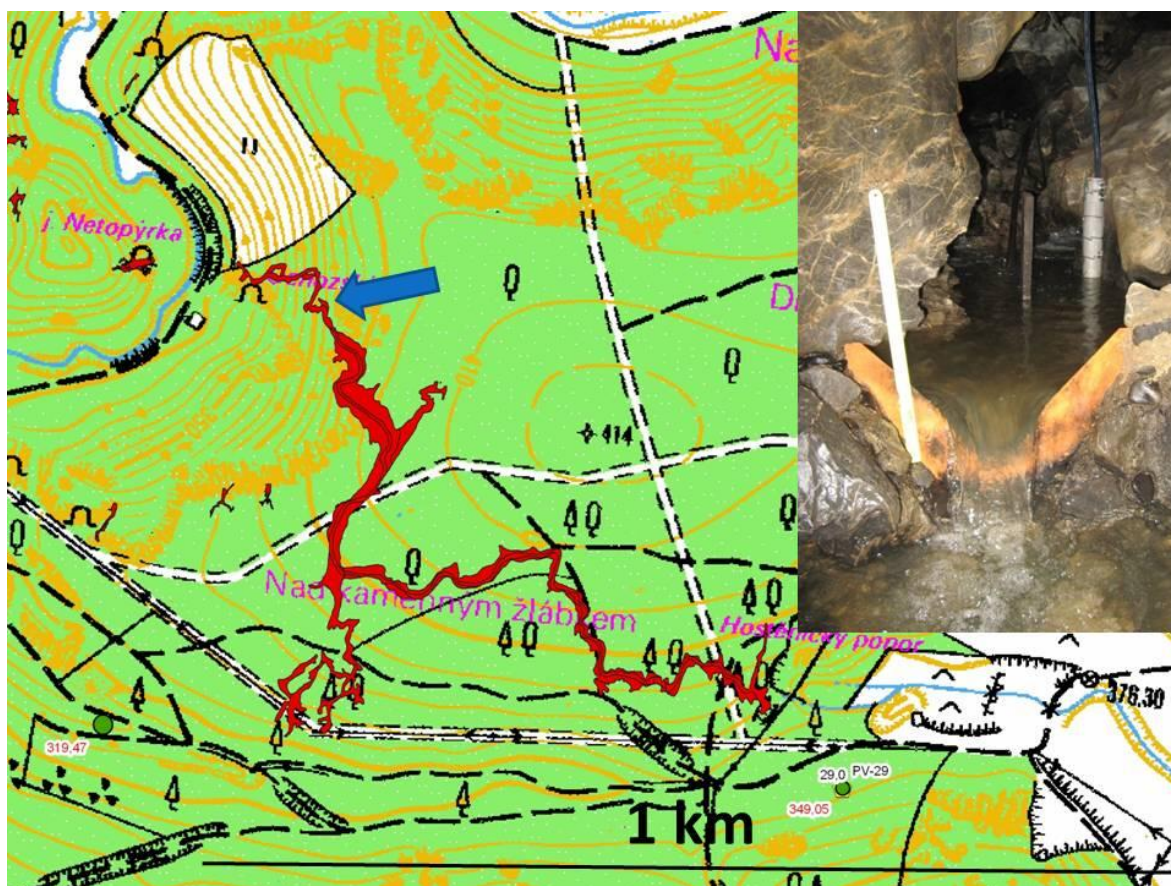
Na měření průtoků na několika místech bylo použito hydrologické křídlo typu Ott C2. Měřený profil podle nataženého pásma rozdělíme na 5 až 10 svislic po 15-20 cm. Na každé svislici zaznamenáme hloubku a počet otáček křídla za daný časový úsek (obvykle 30 s) ve vzdálenosti 0,2 a 0,8 násobku hloubky ode dna. Pokud je hloubka příliš velká, můžeme podle uvážení provést víc měření. Počet otáček vrtule odpovídá určité rychlosti a po vynásobení rychlosti průtočnou plochou získáme průtok.

Tato metoda je také citlivá na výběr správného profilu. Na rozdíl od chemické metody je třeba pravidelné koryto bez překážek a pokud možno paralelní proudnice. Není vhodné ani koryto v hrubém štěrku, protože není možné zachytit vodu proudící mezi valouny štěrku a vede to k podhodnocení naměřeného průtoku oproti realitě.

3.2. MĚŘENÍ KONDUKTIVITY, HLADINY A TEPLOTY VODY

K měření konduktivity jsem ve většině případů použila konduktometr Cond 340i se sondou TetraCon 325 od firmy WTW. Konduktivita je měřena s přesností 0,5 % z měřené hodnoty. Konduktometrická sonda má zabudované i teplotní čidlo. Veškeré uváděné hodnoty konduktivity v této práci byly přepočteny na teplotu 25 °C. Přístroje Cond 340i, Multi 340i a PhCond 340i umožňují automatické měření s krokem 5 sekund až 1 hodina s kapacitou 500 nebo 800 měření (čas, konduktivita, teplota, nastavení přístroje). V několika případech jsem použila přístroj LTC Levelogger od firmy Solinst (popis viz níže).

V Ochozské jeskyni, Rudickém propadání a Býčí skále jsou od roku 2008 umístěna čidla zaznamenávající hladinu podzemního toku a teplotu vody (obr. 3.1 a 3.3). Od roku 2010 provádím stahování dat a údržbu těchto čidel. Od roku 2009 se na těchto profilech podařilo získat téměř kontinuální záznam v kroku 10 minut. Jedná se o čidla LGR2 (senzor tlaku vody Lucas (USA) a teploty podzemní vody s vestavěným záznamníkem naměřených dat; Geomon, s.r.o.). LGR 2 se skládá se z vodotěsného pouzdra z nerezavějící oceli, ve kterém je umístěno tlakové i teplotní čidlo a veškerá elektronika přístroje, ze závěsu, kterým se zařízení zavěšuje nad úroveň maximální hladiny, a z pouzdra pro baterii. Závěs je s vlastním pouzdem přístroje propojen speciálním kabelem s polyuretanovým pláštěm odolným i v mírně agresivním prostředí. Kabel obsahuje ocelová lanka, která zajišťují minimální průtah kabelu i ve značných délkách a dutou žílu pro vyrovnání změn atmosférického tlaku.



Obrázek 3.1 Umístění tlakového čidla LGR2 v Ochozské jeskyni (foto J.Bruthans)

Čidlo pracuje na principu měření hydrostatického tlaku vody s automatickou kompenzací změn atmosférického tlaku. Měření je prováděno v nastavitelných časových intervalech a ukládáno do vnitřní paměti přístroje s kapacitou 32000 hodnot. Závěs přístroje obsahuje konektor pro připojení ovládacího počítače. Ovládacím programem je možné nastavovat parametry měření (časové intervaly a počet kanálů), zjišťovat nastavení a stav baterie, přenášet naměřené údaje do počítače a vymazat paměť čidla. Jako ovládací počítač lze použít notebook nebo PDA s operačním systémem Windows mobile (<http://www.geomon.cz/lgr2ht.htm>).

Další čidla použitá na měření hladiny, teploty a případně i konduktivity jsou přístroje typu Levelogger od firmy Solinst. 3001 Levelogger Gold je čidlo pro měření vodní hladiny a teploty s pamětí pro 40000 párů měření. Skládá se z dataloggeru, baterie o životnosti až 10 let, tlakového snímače a teplotního senzoru v pouzdře z nerezové oceli. Výšky hladin jsou automaticky kompenzovány nadmořskou výškou a teplotou. Atmosférický tlak je kompenzován pomocí přístroje Barologger, který je přizpůsoben měření tlaku vzduchu a umísťuje se poblíž místa měření. 3001 Levelogger Junior je jednodušší varianta přístroje Levelogger Gold, má baterii s životností 5 let a 32000 dvojic míst v paměti. LTC Levelogger Junior (Level, Temperature, Conductivity) je datalogger s tlakovým, teplotním a konduktometrickým čidlem. Paměť má kapacitu 16000 souborů měření.

Všechna čidla Solinst mají možnost nastavení intervalu měření od 0,5 sekundy po 99 hodin. Pro komunikaci s počítačem je možné přístroj propojit datovým kabelem nebo pomocí optické čtecí hlavy. Pomocí příslušného programu se stahují data s paměti zařízení a ukládají se nastavení. Přesnost měření všech veličin je 0,05 až 0,1% v závislosti na typu čidla (<http://www.solinst.com/index.html>).

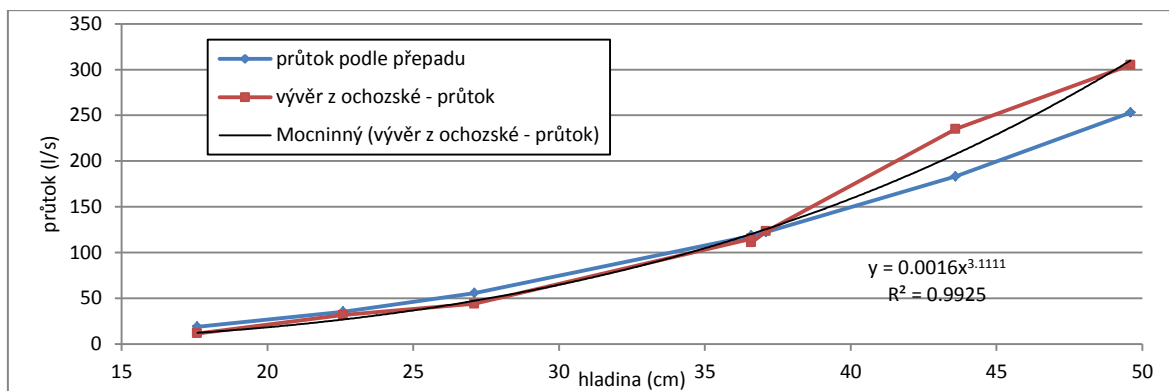
Čidla zaznamenávají stav hladiny, což není ideální parametr na popisování vlastností kanálu, podstatnějším parametrem je průtok. Ke zjištění závislosti mezi výškou hladiny a průtokem byl v Ochozské jeskyni využit Thomsonův přepad zbudovaný zde v minulosti J. Himmlem a kolegy. Průtok pak lze zhruba vypočítat podle vzorce pro Thomsonův přepad

$$Q = h^{2,5} \times 0,0146, \quad (3.1)$$

kde h je hladina v centimetrech a Q průtok v $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$. Kromě výpočtů podle vzorce byly pod vývěrem z Ochozské jeskyně naměřeny průtoky za různých vodních stavů a srovnány se stavy hladiny naměřenými čidlem ve stejném čase. Bylo tak možné určit vztah mezi úrovní hladiny a průtokem přesněji. Obě závislosti jsou znázorněny na grafu na obr. 3.2. Tato závislost ukazuje, že lépe lze průtok spočítat podle rovnice

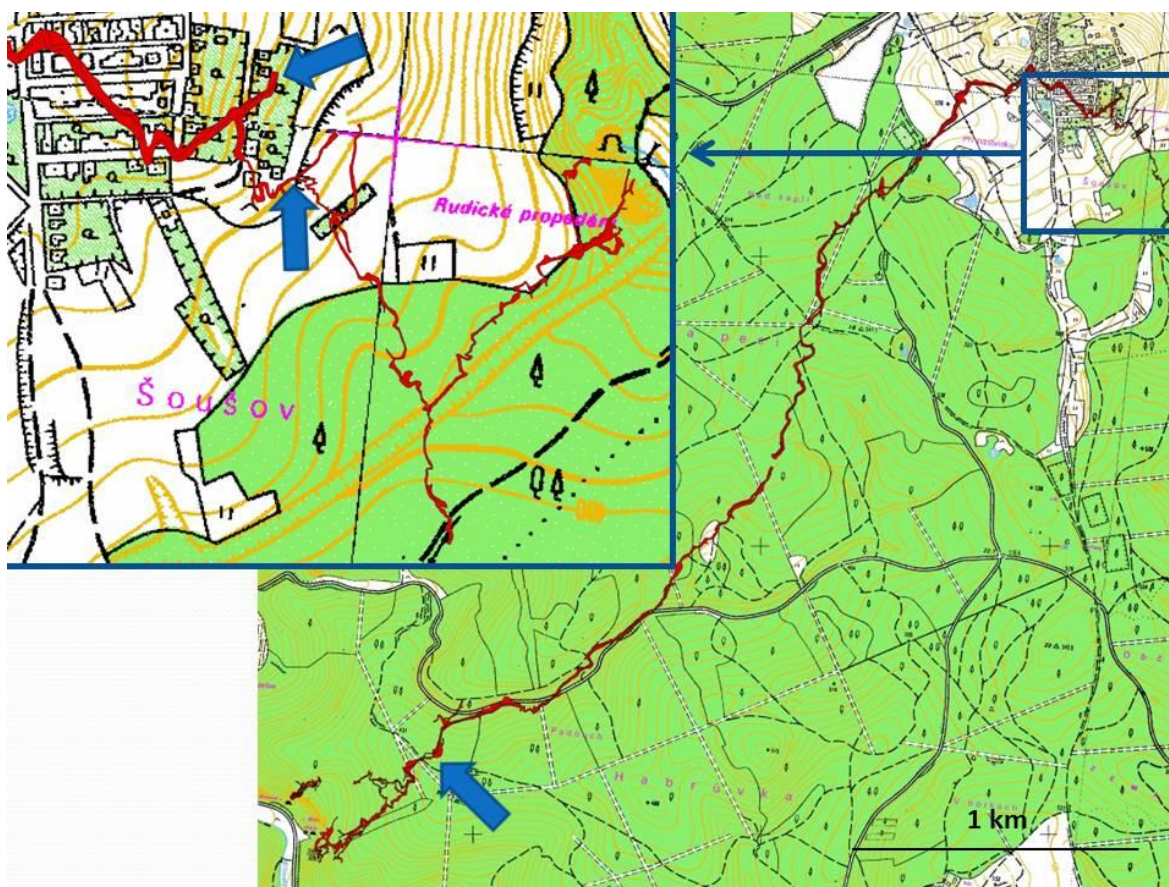
$$Q = h^{3,11} \times 0,00016. \quad (3.2)$$

Maximální naměřený průtok zde byl $300 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá hladině na přepadu 50 cm. Maximální hladina zachycená čidlem je 80 cm. V rozmezí hladin mezi 50 a 80 cm není tedy závislost průtoků na hladině ověřena a vypočtené hodnoty průtoků je nutné považovat za přibližné. K tak vysokému zdvihu hladiny ale dochází velmi zřídka.



Obrázek 3.2 Závislost průtoku na vodním stavu v Ochozské jeskyni podle Thompsonova přepadu a podle změřených průtoků.

V jeskynním systému Rudické propadání - Býčí skála jsou umístěna tři tlaková čidla LGR 2 (obr. 3.3). První na Jedovnickém potoce v Rudickém propadání za prvním sifonem (za Chodbou Vzdechů), druhé na přítoku nazvaném „Stará řeka“ asi 50 m nad soutokem s Jedovnickým potokem a třetí cca 150 m nad Kaňony v Býčí skále. K dispozici jsou tedy měření jak na začátku, tak i na konci podzemního toku Jedovnického potoka i na jeho největším podzemním přítoku. Pomocí těchto měření můžeme zjistit rychlost šíření tlakové vlny (podle změn hladiny) a vlastní povodňové vody (podle změn teploty) mezi sledovanými profily a srovnat průběh průtoku a teploty vody Jedovnického potoka se Starou řekou. Kvůli přepočtu hladin na průtoky byla z ČHMÚ získána data z vodočtu na Jedovnickém potoce nad Rudickým propadáním, který zaznamenává průtoky v hodinových intervalech.



Obrázek 3.3 Mapa Rudického propadání a Býčí skály s umístěním čidel měřících hladinu a teplotu vody.

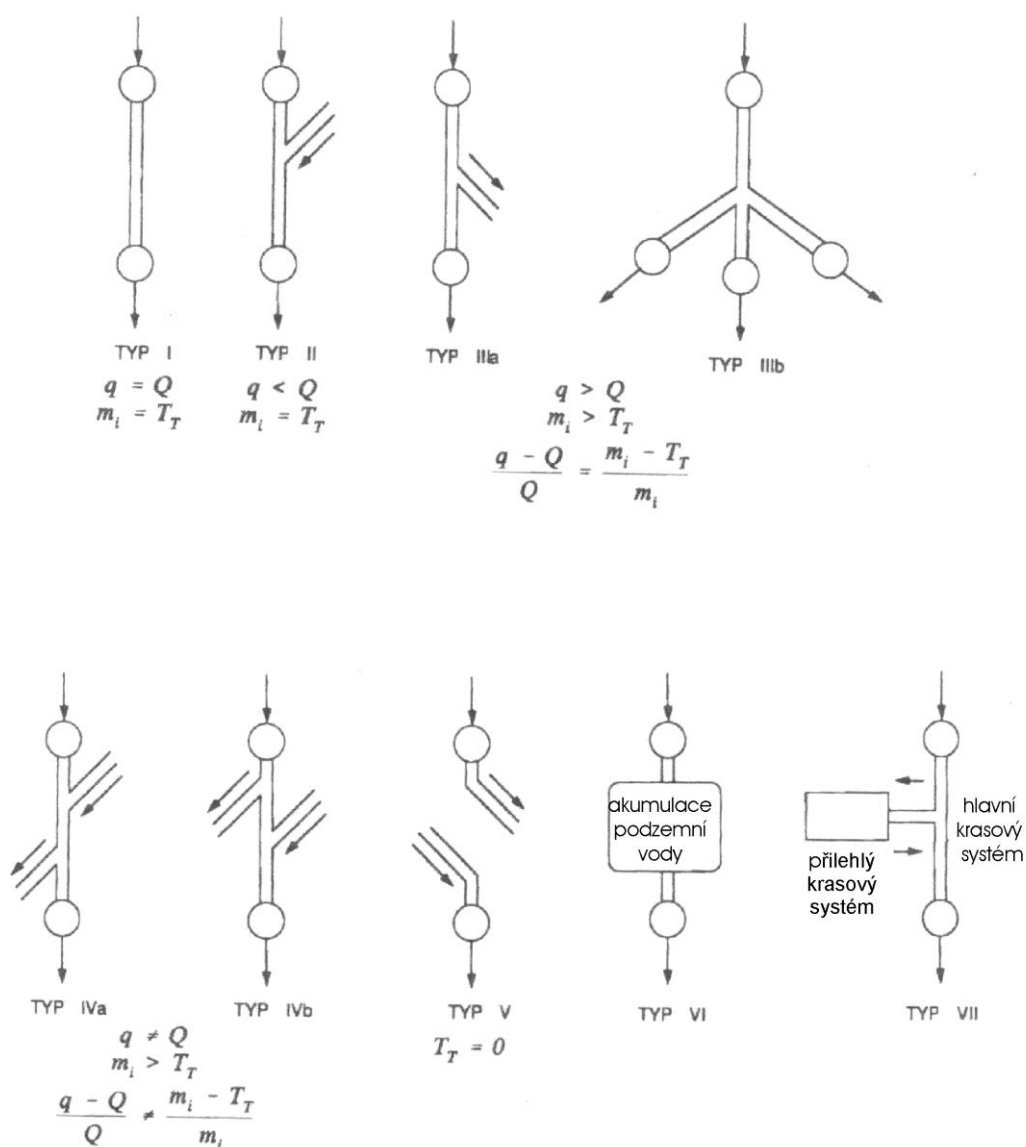
3.3. STOPOVACÍ ZKOUŠKY

Základními charakteristikami proudění vody jsou postupová rychlost a mísení. Rozpustné stopovače mohou být použity k simulaci transportu a disperze roztoků jak v povrchových, tak i v podzemních vodách. Základním předpokladem stopovače je úplná rozpustnost ve vodě a stejné fyzikální vlastnosti jako voda (Jobson 1996). Stopovací zkoušky lze rozdělit do dvou skupin (Field 2002):

- 1) Kvalitativní stopovací zkouška je zkouška, kdy není k dispozici průniková křivka stopovače, jedinými výsledky je přítomnost/nepřítomnost stopovače, případně čas prvního objevení a někdy i maximální koncentrace. Většina archivních zkoušek je vyhodnocena tímto způsobem, a pokud je uveden průtok, je možné je použít ke srovnání alespoň z hlediska maximálního průtoku. Pokud ale průtok není zaznamenán, jsou stopovací zkoušky pro účely této práce nepoužitelné a v diplomové práci je vůbec nezmiňuji.
- 2) Kvantitativní stopovací zkouška musí splnit dvě základní hlediska:
 - Četnost odběrů vzorků musí být dostatečná, aby mohla být spolehlivě určena průniková křivka stopovače na sledovaných profilech.
 - Na místě injektáže stopovače i na všech sledovaných profilech musí být měřeny průtoky, aby bylo možné bilancovat množství proteklého stopovače.

Řada údajů může být odvozena z tvaru průnikové křivky stopovače. Výsledky zkoušky umožňují porovnat množství stopovače dodaného do systému s množstvím, které se po čase objevilo na sledovaných profilech, a tím ověřit jestli nedošlo k úniku stopovače do vývěru, který nebyl sledován. Ze zkoušky lze určit i základní charakter topologie krasových kanálů (obr. 3.4). Ze zkoušky lze získat velkou řadu informací o dynamice proudění: časy zdržení vody v krasovém kanálu, rychlosti proudění podzemní vody, objem krasových kanálů v kolektoru, stanovení disperze a Pecletova čísla (detaily výpočtů viz kapitola 3.3.3 vyhodnocení) a dalších parametrů, které se dále dají použít pro vývoj a kalibraci matematických modelů (Jobson 1996, Field 2002).

Stopovací zkoušky jsem prováděla s NaCl pomocí měření změn konduktivity nebo pomocí uraninu (sodná sůl fluoresceinu, $C_{20}H_{10}Na_2O_5$, dále fluorescein). Průnikové křivky jsem vyhodnotila v programu Qtracer2 (Field 2002).



Obrázek 3.4. Typy topologie krasových kanálů (podle Fielda 2002): Q-vydatnost na místě sledování, q-vydatnost na místě injektáže, m-množství injektovaného stopovače, T_T -množství zachyceného stopovače.

3.2.1. NaCl

Stopovací zkoušky s NaCl jsou vhodné na krátké vzdálenosti, konduktometrická čidla nejsou příliš citlivá na změnu koncentrace, proto je nutné větší množství stopovače. Problém bývá i s kolísáním pozadí, protože v přírodních vodách se NaCl a další ionty běžně vyskytují.

Sůl je na místě injektáže rozpuštěna ve vodě a poté injektována nejčastěji po dobu několika minut. Na koncovém profilu je pomocí konduktometru měřeno zvýšení konduktivity. Po odečtení pozadové konduktivity jsou hodnoty přepočteny na koncentraci NaCl. K přepočtu nárůstu konduktivity na nárůst koncentrace NaCl se provádí kalibrace sondy (viz kap. 3.1.). Směrnice kalibrační přímky jsou většinou podobné a blíží se $0,5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \mu\text{S}^{-1}$. Proto můžeme kalibraci použít i na vyhodnocení archivních stopovacích zkoušek, kde tuto hodnotu neznáme.

3.2.2. Fluorescein

K vyhodnocení koncentrace fluoresceinu je třeba odebírat vzorky k vyhodnocení v laboratoři. K tomu jsem používala skleněné vzorkovnice o objemu 50 ml, protože fluorescein se může vázat na povrch plastových vzorkovnic a jeho koncentrace v plastových vzorkovnicích s časem výrazně klesá (Field 2002; Käss 1998). Vzorky jsem uložila v chladu a temnu, protože fluorescein se na denním světle velmi rychle rozpadá. V případě stopovací zkoušky na Křtinském potoce (K3) byl k odběru vzorků použit automatický odběrač ZKZ 1 (vyvinuli O. Zeman, J. Kukačka a I. Záruba ve spolupráci s firmou Narexstat). Vyhodnocení vzorků vody jsem s pomocí J. Kamase provedla v laboratoři Ústavu geochemie a mineralogie UK Praha na fluorimetru Perkin-Elmer 203. Voda ze vzorků byla odpipetována do kyvety v množství 3-5 ml a ta vložena do přístroje. Vzorky byly vybudeny světlem o vlnové délce 492 nm a měřena intenzita emise o vlnové délce 513 nm (Field 2002). Po technických problémech s tímto přístrojem další vzorky měřila Anita Gregorová v Ústavu analytické chemie Akademie věd ČR v Brně.

Při několika stopovacích zkouškách jsem na všech místech, kde bylo možné očekávat průnik fluoresceinu, umístila patrony s aktivním uhlím po dobu celého trvání zkoušky (týdny až měsíce), na některých místech jsem patrony během zkoušky vyměnila. Patrony byly uchovávány v chladu a temnu. Aktivní uhlí z patron bylo přelito několika mililitry směsi čistého lihu a 15% hydroxidu draselného (1:1) tak, aby se zachycený fluorescein uvolnil do roztoku. Všechny výluhy z patron byly vždy analyzovány na fluorimetru na obsah fluoresceinu (stejně jako vzorky). Je známo, že z výluhů je možné získat koncentrace fluoresceinu až o 2 řády vyšší, než v roztoku, takže může dojít k tomu, že stopovač je zachycen pouze na patronách, zatímco ve vzorcích je jeho koncentrace pod úrovní citlivosti přístroje (Jahn et al. 1989).

3.2.3. Vyhodnocení

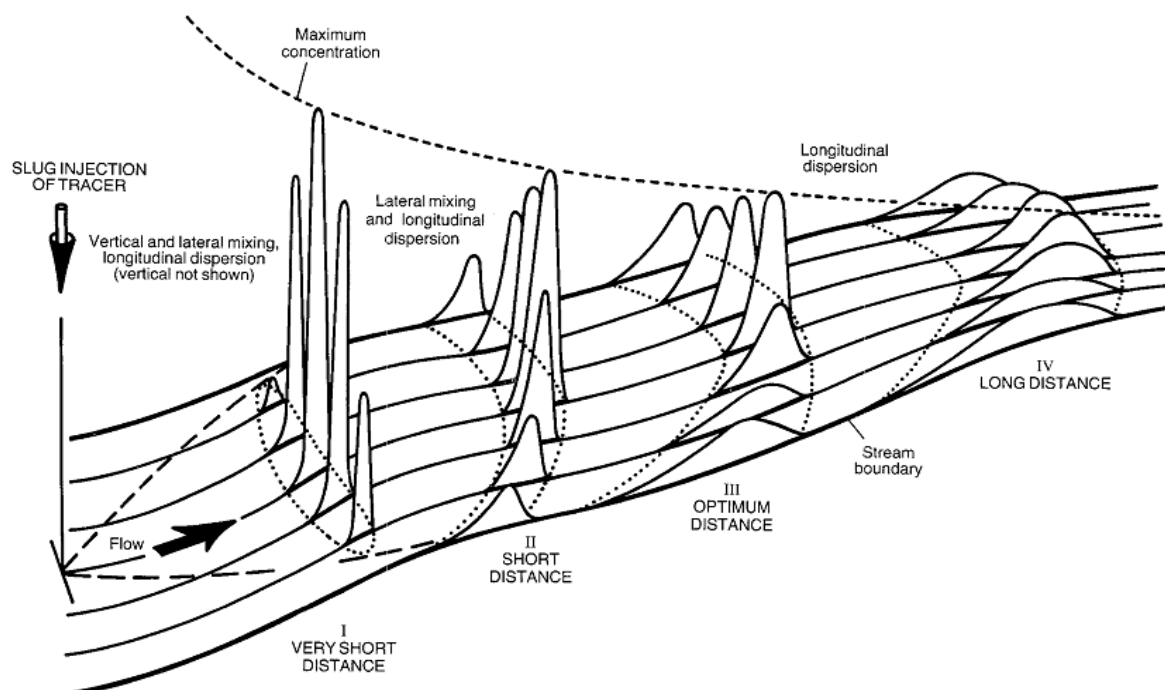
Provedené stopovací zkoušky byly vyhodnoceny v programu Qtracer2 (Field 2002), který po zadání průnikové křivky a potřebných údajů spočítá parametry kanálu, kterým voda mezi místem injektáže a sledování proudí.

Injektáž stopovače je možné provést třemi různými způsoby:

- 1) impuls (jednorázová injektáž, která trvá tak krátce, že nemá vliv na tvar průnikové křivky)
- 2) puls (injektáž trvající obvykle několik minut až desítek minut; doba injektáže již ovlivňuje tvar průnikové křivky)
- 3) práh (kontinuální injektáž a udržování konstantní koncentrace stopovače po celou dobu stopovací zkoušky)

Stopovače se obecně pohybují stejným způsobem jako částice vody. Proudění stopovače proto odpovídá pohybu vody v kanále, disperzivitě a dalším charakteristikám. Míchání a disperze stopovače se v průběhu pohybu odehrává ve všech třech rozměrech. Vertikální disperze je téměř od počátku dokonalá, k úplné laterální disperzi dochází až po určité vzdálenosti, která závisí na rychlosti vody a tvaru kanálu. Podélná disperze, tedy disperze ve směru proudění, nemá žádné omezení a je významnou charakteristikou prostředí. Obrázek 3.5 znázorňuje průběh míchání stopovače po jednorázové injektáži v závislosti na vzdálenosti. Zpočátku jsou velké rozdíly v koncentraci stopovače, většina je unášena středem toku, kde je proudění rychlejší. Na dlouhé vzdálenosti převládá podélná

disperzivita a koncentrace se v příčném řezu díky laterálnímu míšení vyrovnají, proto můžeme průnikové křivky vyhodnocovat pouze v 1D. To platí pro všechny stopovací zkoušky v této práci.



Obrázek 3.5 Podélná disperze a laterální míchání v závislosti na vzdálenosti od injektáže. Model změn koncentrace v toku při jednorázové injektáži stopovače. (Kilpatrick a Wilson 1989)

Průnikové křivky jsou křivky závislosti koncentrace na čase v místě sledování a základní charakteristiky jsou znázorněny na obr. 3.6. Z průnikových křivek stopovače lze odečíst následující časy (Field 2002):

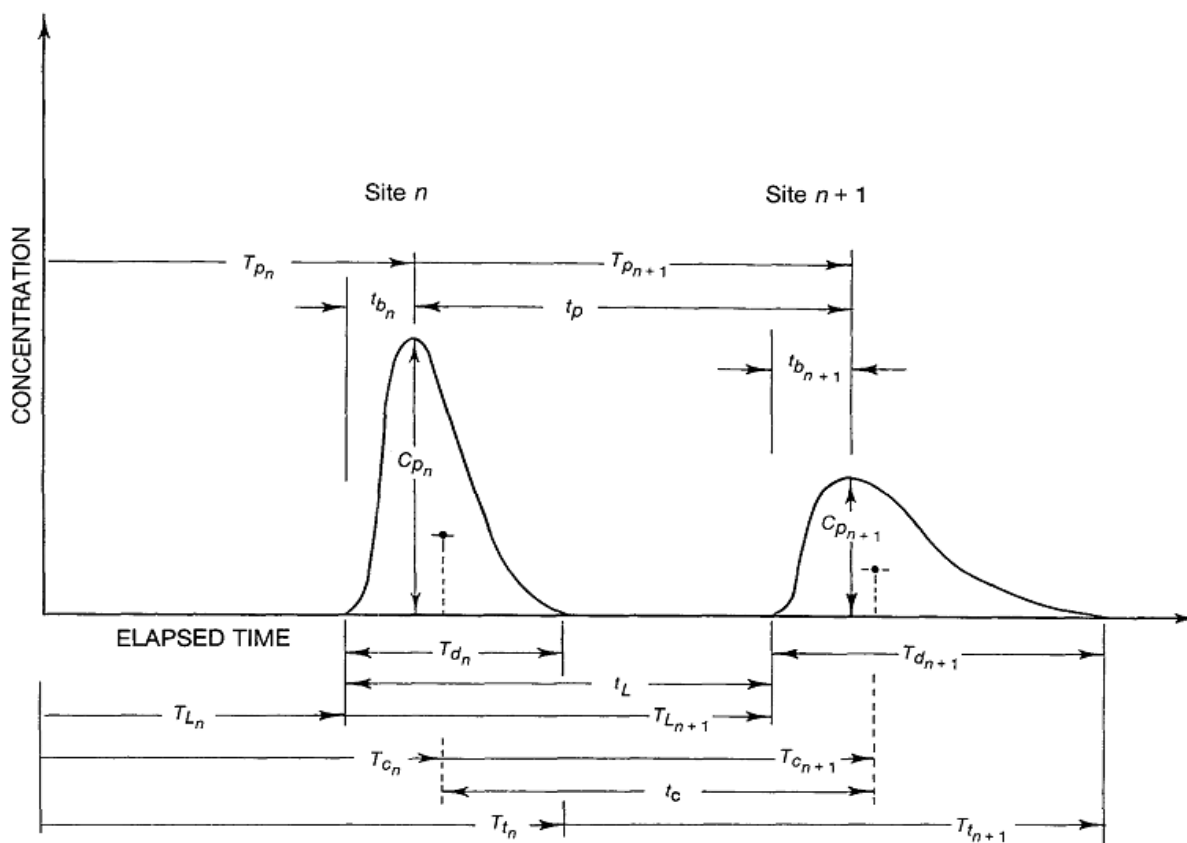
T_L , čas prvního objevení, je čas od injektáže po první zvýšení koncentrace stopovače nad úroveň pozadí.

T_p , čas maximální koncentrace, je čas od počátku injektáže do okamžiku maximální koncentrace stopovače.

T_c , střední doba zdržení, je čas od injektáže po čas těžiště křivky nebo po čas kdy prošlo 50% stopovače celkem zachyceného na daném profilu. (3.1)

$$T_c = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt} \quad (3.3)$$

T_t , čas vyznění koncentrace, je čas od injektáže po vyznění stopovače zpět na úroveň pozadí. V praxi je velmi obtížné tento okamžik určit, protože koncentrace se k pozadí přibližuje asymptoticky a tento čas tak závisí velmi silně na citlivosti metody. V této práci proto nebyl odečítán.



Obrázek 3.6 Průniková křivka se znázorněním jejích charakteristik (popsané v textu) (Kilpatrick a Wilson 1989)

Pokud není skutečná délka toku známa, tak se jako vzdálenost x používá přímá vzdálenost od místa injektáže k místu sledování. K odhadu skutečné vzdálenosti x_s se v krasu používá koeficient 1,5 (Field 2002):

$$x_s = 1,5 \times x \tag{3.4}$$

Maximální rychlost v_L je rovna podílu skutečné vzdálenosti a T_L .

Rychlost píku v_p je podíl skutečné vzdálenosti a času T_p .

Střední rychlost v_c je podíl skutečné vzdálenosti a času T_c .

Návratnost stopovače M_0 je objem látky spočtený z průnikové křivky (Field 2002):

$$M_0 = \int_0^\infty C(t)Q(t)dt \tag{3.5}$$

Většinou se návratnost vyjadřuje v procentech injektovaného množství. Celková návratnost stopovače, pokud bylo sledováno na více místech, se rovná součtu jednotlivých návratností:

$$M_t = \sum_{i=1}^n M_{0i} \tag{3.6}$$

Koeficient podélné disperze D_L je mírou, jakou se křivka koncentrace protahuje ve směru proudění a je definován v případě impulsu nebo souvislé injektáže (práh; Field 2002):

$$D_L = \frac{\sigma_t^2 v^3}{2x_s} \tag{3.7}$$

Pro puls ($t_2 < T_c$):

$$D_L = \left(\sigma_t^2 - \frac{t_2}{12}\right) \frac{v^3}{2x_s}, \quad (3.8)$$

kde σ_t je směrodatná odchylka pro střední dobu zdržení (T_c):

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^\infty (t-T_c)^2 c(t)Q(t)dt}{\int_0^\infty c(t)Q(t)dt} \quad (3.9)$$

Koeficient disperze je v jednotkách m^2s^{-1} , podélná disperzivita odpovídá podílu D_L a střední rychlosti stopovače T_c a její hodnota se udává v metrech.

Z průtoku je možné odhadnout objem zatopených částí kanálu:

$$V = \int_0^{T_c} Q dt \quad (3.10)$$

Pokud je průtok konstantní, rovnici můžeme zjednodušit:

$$V = QT_c \quad (3.11)$$

Z objemu je pak lehké určit průměrnou plochu průtočného profilu kanálu **A**:

$$A = \frac{V}{x_s} \quad (3.12)$$

Pecletovo číslo **Pe** vyjadřuje podíl advekce a difuze nebo mechanické disperze na transportu. Pokud je $Pe < 4,0$; převažuje difuze a disperze, při $4,0 < Pe < 6,0$ jsou oba procesy rovnocenné a při $Pe > 6,0$ převažuje advekce. V krasových kanálech je Pe zpravidla mnohonásobně vyšší, ale i tak je možné porovnávat míru advekce z různých stopovacích zkoušek. Pe získáme z vypočtené podélné disperzivity a průměrné rychlosti stopovače (Field 2002):

$$Pe = \frac{\bar{v} x_s}{D_L} \quad (3.13)$$

Vyhodnocení archivních stopovacích zkoušek

Některé průnikové křivky stopovacích zkoušek (Himmel 1990, Balák et al. 2004), které dosud nebyly plně vyhodnoceny, jsem digitalizovala a znovu vyhodnotila v programu Qtracer abych získala parametry potřebné k porovnání s nově provedenými stopovacími zkouškami. Zkoušky provedené Himmelem (1990) byly zhruba převedeny podle grafů a popisu v článku. Konduktivitu naměřenou při cca 10°C bylo třeba přepočítat na konduktivitu při 25°, tedy vynásobit koeficientem 1,443. Tento koeficient byl získán z polynomu třetího stupně závislosti konduktivity na teplotě podle ČSN 830520:

$$KOND(20^\circ C) = (-0,00002T^3 + 0,0018T^2 - 0,00697T + 1,8341) \times KOND, \quad (3.14)$$

kde T je teplota vody ($^\circ C$) a $KOND$ ($\mu S \cdot cm^{-1}$) je konduktivita při dané teplotě.

Dále jsem odečetla pozadí a výslednou konduktivitu jsem převedla na koncentraci NaCl v mg/l pomocí koeficientu $0,483 \text{ mg} \cdot l^{-1} \cdot \mu S^{-1}$. Vztah mezi konduktivitou a obsahem soli byl změřen při

stopovací zkoušce v Ochozské jeskyni 4. 6. 2010. Množství použitého NaCl bylo v obou případech stejné, ale není v článku uvedeno. Pro vyhodnocení zkoušky to ale není potřebný údaj, pouze není možné zjistit návratnost stopovače.

Balák et al. (2004) prováděl stopovací zkoušky pomocí fluoresceinu v letech 2002 a 2004. V článku jsou uvedeny hodnoty koncentrací v průběhu zkoušky, proto bylo snadné znovu je vyhodnotit. Průběh zkoušek a vyhodnocení jsou popsány v následující kapitole.

4. STOPOVACÍ ZKOUŠKY

Následující přehled uvádí tyto zkoušky, které je možné srovnávat vzájemně nebo s nově provedenými zkouškami. Přehled parametrů ze všech stopovacích zkoušek, vypočtených i přejetých z literatury je uveden níže v tabulce 4.4 a kompletní data vyhodnocených stopovacích zkoušek jsou k dispozici v příloze A. Zkoušky jsou seřazeny podle místa injektáže. Dále jsou označeny podle lokalit (O-Ochozská jeskyně, K-Křtinský potok, P-Punkva, B-Býčí skála a X-jiné oblasti) a chronologicky (čísla - od nejstarších po nejnovější) a zahrnují archivní zkoušky a zkoušky provedené na mapovacích kurzech v letech 2010 a 2011.

4.2. ARCHIVNÍ STOPOVACÍ ZKOUŠKY

V Ochozské jeskyni a několika dalších lokalitách bylo v minulosti provedeno mnoho stopovacích zkoušek jinými autory (Himmel 1966, 1989, 1990, 2009, Hort 1967, Burkhardt 1971, Knížek 2006, Bruthans 2009, Vojtěchovská a Bruthans 2010, Pavelová et. al 2011).

4.2.1. Povodí Říčky (Ochozská jeskyně)

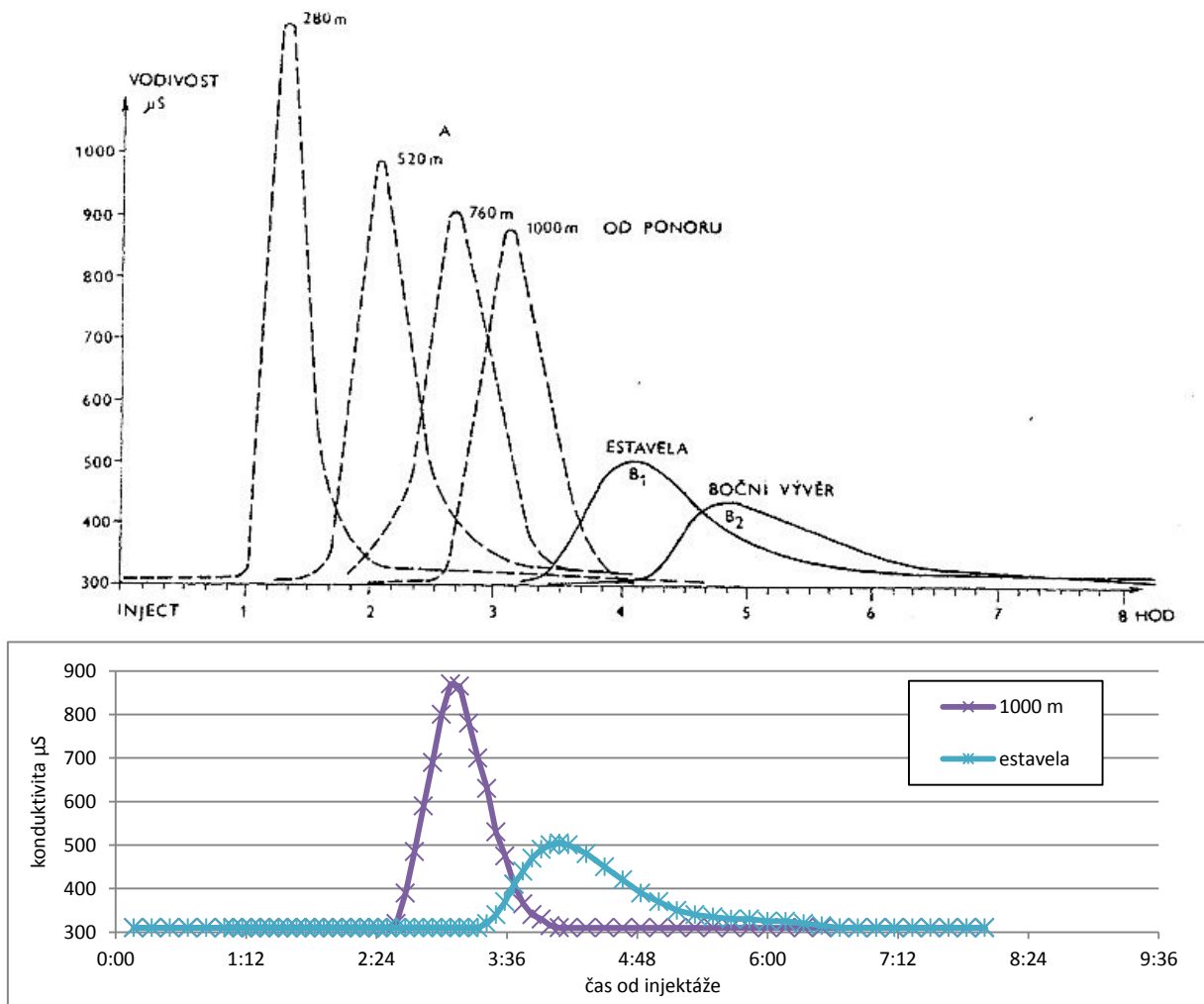
Hostěnické propadání I – Hádecká estavela, Netopýrka a Vývěry Říčky I a II

O1: Nejstarší stopovací zkoušku J. Himmela uvádí Burkhardt (1971 – 1972): Himmel dne 21. 12. 1957 obarvil pomocí 1890 g eosinu Hostěnické propadání I při průtoku 2 l.s^{-1} a ve vývěru Říčky I se objevilo za 42 hodin při průtoku ve vývěru 60 l.s^{-1} a trvalo 21 hodin.

O2: Dne 28. 3. 1959 bylo do Hostěnického propadání I injektováno 245 g fluoresceinu ve 12:45 při průtoku 7 l.s^{-1} na propadání a $2 - 3 \text{ l.s}^{-1}$ v estavele (Himmel 1966). Vzorky byly odebírány v estavele v intervalu 15 – 30 min. První barvivo se objevilo v 19:05 a maxima dosáhlo ve 22:15. Odpovídající průměrná plocha průtočného profilu je $0,138 - 0,93 \text{ m}^2$ a objem kanálů $90 - 252 \text{ m}^3$. Postupová rychlost (rychlost podle píku) $1,7 \text{ cm.s}^{-1}$ ukazuje na proudění v otevřených prostorách.

O3: Hort (1967) provedl z Hostěnického propadání I stopovací zkoušku pomocí 250 g fluoresceinu. Průtok činil 15 l.s^{-1} . Vzorky byly odebírány v Netopýrce, Vývěrech Říčky I, II a III v hodinových intervalech. V Netopýrce se stopovač poprvé objevil po 29 hodinách, ve vývěru I také po 29 hodinách s maximem v čase 31 hodin od injektáže. Souvislost s vývěry II a III nebyla prokázána.

O4: Himmel (1990) provedl stopovací zkoušku z Hostěnického propadání I pomocí NaCl do estavely za průtoku 20 l.s^{-1} . Množství použité soli není uvedeno. V Estavele byla průniková křivka měřena pomocí konduktometru. Výsledky zkoušky jsem znovu vyhodnotila (viz kapitola metodika, grafy na obr. 4.1).



Obrázek 4.1 Graf průběhu vodivosti při stopovací zkoušce od Hostěnického propadání II k trativodu v Ochozské jeskyni (O11) (1000 m od místa injecktáže) a od Hostěnického propadání I k Hádecké estavela (O4) za průtoku 17 a 20 l/s. (Himmel 1990)

O5: 28. 8. – 5. 9. 2002 ve 14:00 bylo Hostěnické propadání I obarveno 500 g fluoresceinu (Balák et al. 2004). Vzorky byly odebrány v intervalu 6 hodin v Hádecké estavela, ve vývěrech Říčky I a II, v Netopýrce a v Hádeckých propadáních I a II. V několika pozorovacích vrtech v DP Mokrý byly vzorky odebrány po dobu šesti dalších týdnů. Průtok Hostěnického propadání byl naměřen Pitotovou trubicí $2,7 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a v Říčce nad a pod estavelou chemickou metodou, rozdíl mezi průtoky, tedy odtok estavelou činil $1,3 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, ve vývěru I bylo naměřeno $8,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, a ve vývěru II $28,8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Zkouška byla provedena za stabilního počasí bez výraznějších srážek. Pouze 1. 9. byl déšť, který způsobil mírně zvýšené stavy na přítocích. Funkce estavely se změnila na vývěrovou s průtokem $2,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, vývěr I na $43,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a vývěr II na $35 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Měřené průtoky jsou uvedeny v tab. 4.1. Pro vyhodnocení jsem pro všechny profily kromě estavely použila hodnoty průtoků na začátku zkoušky, protože barvivo proteklo před srážkami dne 1.9. Pro estavelu jsem použila hodnotu $2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ve vývěrech I a II se barvivo objevilo ve stejnou dobu – 23 hodin od injecktáže. V estavela se fluorescein objevil ve velmi nízké koncentraci po 101 hodině. Barvivo bylo vyplaveno pouze díky srážkám, kdy z ní začala voda vyvěrat, čas objevení je díky této situaci velmi nadhodnocený. Pod estavelou v Hádeckém propadání I se stopovač objevil už po 5 hodinách a v Hádeckém propadání II

po 17 hodinách. Je to nejspíš způsobeno tím, že podzemní Hostěnický potok je drénován tektonickou poruchou, která byla zmapována geofyzikálním průzkumem. Ve vrtech DP Mokrá se stopovač neobjevil (Balák et al. 2004).

Tabulka 4.1 Průtoky v l.s^{-1} na srovnávaných profilech měřený na začátku a na konci stopovací zkoušky z Hostěnického propadání I (O6). Upraveno podle Baláka et al. (2004).

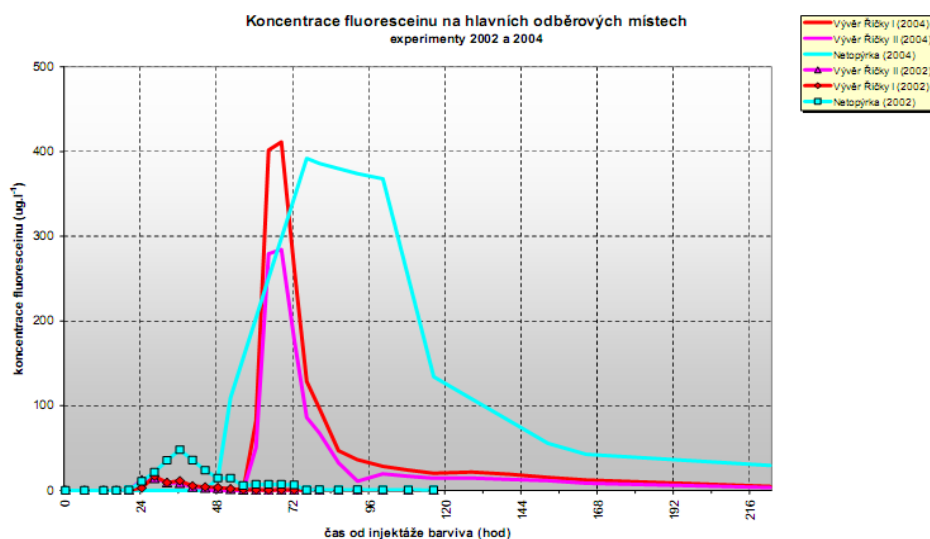
Profil	Průtok (l.s^{-1}) 28.8.02	Průtok (l.s^{-1}) 5.9.02
Hostěnické propadání	2,7	1,8
Estavela	-1,3	2,1
Netopýrka	0,9	1,0
Vývěr Říčky I	8,5	43,4
Vývěr Říčky II	27,8	35,0

O6: 30. 8. – 8. 9. 2004 ve 12:00 Balák a Tůma zopakovali experiment a injektovali 500 g fluoresceinu do propadání I. Vzorky byly odebírány v intervalu 4 hodin v Netopýrce, vývěrech Říčky a na dalších místech po proudu Říčky, ty ale nejsou pro srovnání významné. Počasí po celou dobu bylo stabilní, bez srážek, a při minimálním vodním stavu. V estavele se po celou dobu zkoušky voda ztrácela, proto zde nebyly odebírány vzorky. Průtok Hostěnického potoka byl před propadáním naměřen $0,7 \text{ l.s}^{-1}$, ve vývěru I 1 l.s^{-1} a vývěru II 26 l.s^{-1} . Měření průtoků je uvedeno v tab 4.2 (Balák et al. 2004).

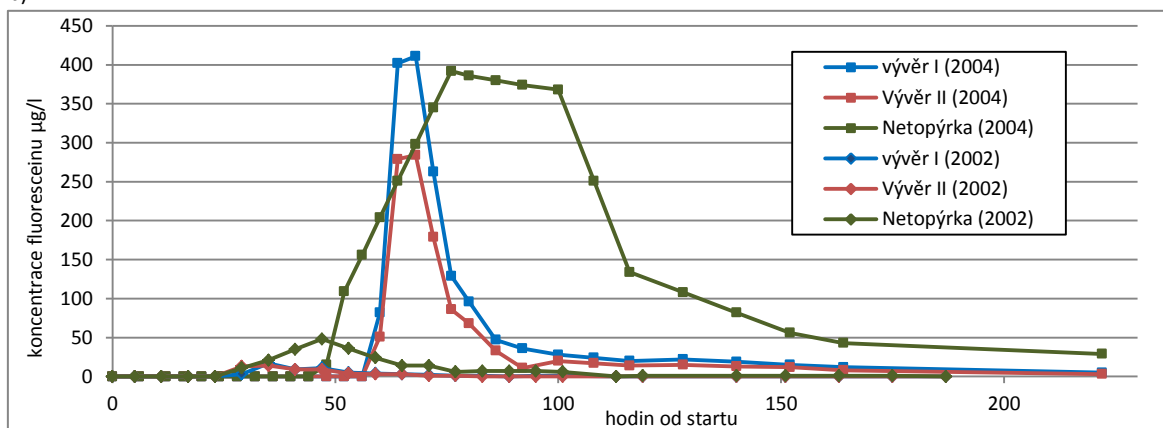
Tabulka 4.2 Průtoky v l.s^{-1} na srovnávaných profilech při stopovací zkoušce z Hostěnického propadání I (O7). Upraveno podle Baláka et al. (2004).

Profil	Datum měření	Průtok (l.s^{-1})
Hostěnické propadání	28.8.04	0,7
Nad estavelou	10.8.04	3,0
Pod estavelou	14.8.04	1,9
Netopýrka	3.9.04	0,9
Vývěr Říčky I	4.9.04	1,0
Vývěr Říčky II	4.9.04	26,0

a)



b)



Obrázek 4.2 Průběh koncentrací fluoresceinu na hlavních odběrových místech při stopovacích zkouškách z Hostěnického propadání I v letech 2002 a 2004 a) podle Baláka et al. (2004), b) znovu vyhodnocené.

U stopovacích zkoušek z Hostěnického propadání I do Netopýrky a vývěru Řičky I se rychlost výrazně nemění a pohybuje se do $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V obou případech se zvyšujícím se průtokem klesá hodnota disperzivity a stoupá hodnota Pe . Přitom disperzivita je přibližně dvakrát větší v Netopýrce než ve vývěru I a Pe ve vývěru přibližně čtyřikrát vyšší.

Z Hostěnického propadání I do vývěru Řičky II jsou k dispozici pouze dvě stopovací zkoušky za podobných průtoků. Rychlost se oproti jiným lokalitám celkem výrazně liší ($0,6$ a $1,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Rozdíly jsou patrné i z převzatých dat, kdy na všech sledovaných profilech koncentrace fluoresceinu dosáhla v roce 2002 mnohem nižších hodnot než v roce 2004. Odpovídá tomu i návratnost stopovače (7% v roce 2002 a 100% v roce 2004). Velké rozdíly jsou i v hodnotách Pe a podélné disperzivity. Při zkouškách byly mírně odlišné podmínky, při první zkoušce byly o něco vyšší stavy a při zkoušce přešlo. Vyšší stavy v roce 2002 by ale měly znamenat vyšší návratnost, při srážkách dochází zpravidla k vyplavení stopovače.

O7: Himmel (2009) provedl stopovací zkoušku od Hostěnického propadání I do Hádecké estavele. Průtok Hostěnického potoka činil 7 l.s^{-1} a tok byl převeden od Propadání II, kam byl kvůli předchozí stopovací zkoušce (O12) odkloněn. V estavele začala vývěrová činnost za 2 hodiny a 5 minut po převedení toku do propadání I a průtok estavele se ustálil na $2,5 \text{ l.s}^{-1}$ po 6 hodinách a 40 minutách. Stopovačem bylo 4850 g rozpuštěného KBr. První stopy bromidů se ve vývěru objevily za 5 hodin a 5 minut od injektáže, koncentrační vrchol křivky proběhl po 6 hodinách a 15 minutách. Autor nezmiňuje, zda byl stopovač injektován ihned po převedení toku do Propadání I nebo až po ustálení průtoku v estavele.

Hostěnické propadání II – Ochozská jeskyně

O9: Hort et al. (1967) obarvil Hostěnické propadání II 500 g fluoresceinu při průtoku 45 l.s^{-1} . Po 10 hodinách se barvivo objevilo ve vchodu do Ochozské jeskyně, maximální koncentrace byla dosažena po 13 hodinách. V Netopýrce se objevilo po 13 hodinách, ve vývěru Říčky I po 27 hodinách a ve vývěru II po 47 hodinách.

O10: 7.6.1972 byl Hostěnický potok o průtoku cca 4 l.s^{-1} převeden od propadání I k propadání II, kam bylo injektováno 100 g fluoresceinu do čela povodňové vlny po dobu 3 hodin. K ústí Nové Ochozské jeskyně do dómů ve Staré ochozské jeskyni dorazilo čelo vlny za 2 hodiny a 30 minut, zbarvení dorazilo až za 4 hodiny a 10 minut (Burkhardt 1971-1972).

O11: Himmel (1990) opět odvedl Hostěnický potok při průtoku 17 l.s^{-1} od Hostěnického propadání I k propadání II a v několika profilech v Ochozské jeskyni sledoval průchod stopovače (NaCl) pomocí konduktomerů. Množství injektovaného stopovače není uvedeno. Průnikovou křivku měřenou na konci Ochozské jeskyně u trativodu jsem převedla do elektronické podoby a znovu vyhodnotila. Stopovač se poprvé objevil po 155 minutách, maximální koncentrace dosáhl po 390 minutách. Graf průnikové křivky viz obr. 4.1.

O12: Himmel v době 1. – 7. 10. 2008 zkoumal postupové rychlosti proudění v Ochozské jeskyni. Pokus byl proveden při vypouštění rybníka a průtok byl udržován na konstantní hodnotě $10,5 – 10,6 \text{ l.s}^{-1}$. Hostěnický potok byl odkloněn od Hostěnického propadání I k propadání II a byla měřena postupová rychlost suchým řečištěm. Následující den byl tok znovu převeden do propadání II a měřena postupová rychlost v již zvodnělém řečišti. Zároveň bylo do propadání II injektováno 4850 g KBr. Tlaková vlna ve zvodnělém řečišti se šířila 4,4x rychleji než v suchém řečišti a 2x rychleji než voda s rozpuštěným stopovačem. Maximální koncentrace KBr byla tedy u vchodu Ochozské jeskyně naměřena po 280 minutách (Himmel 2009).

Ochozská jeskyně – Netopýrka

Himmel (1990) provedl dvě stopovací zkoušky za různých stavů:

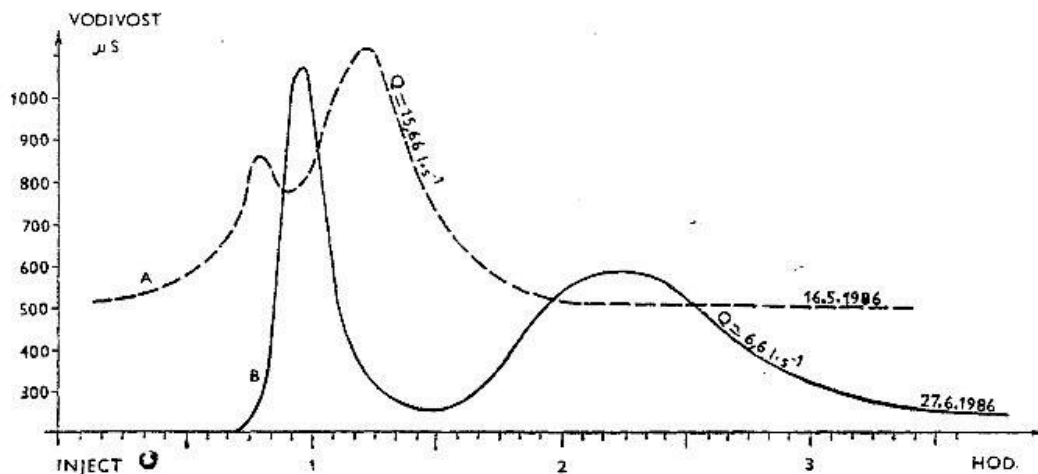
O15: 16. 6. 1986 za použití 24 kg NaCl při průtoku $15,6 \text{ l.s}^{-1}$

O16: 27. 6. 1986 se 34 kg NaCl při průtoku $6,6 \text{ l.s}^{-1}$.

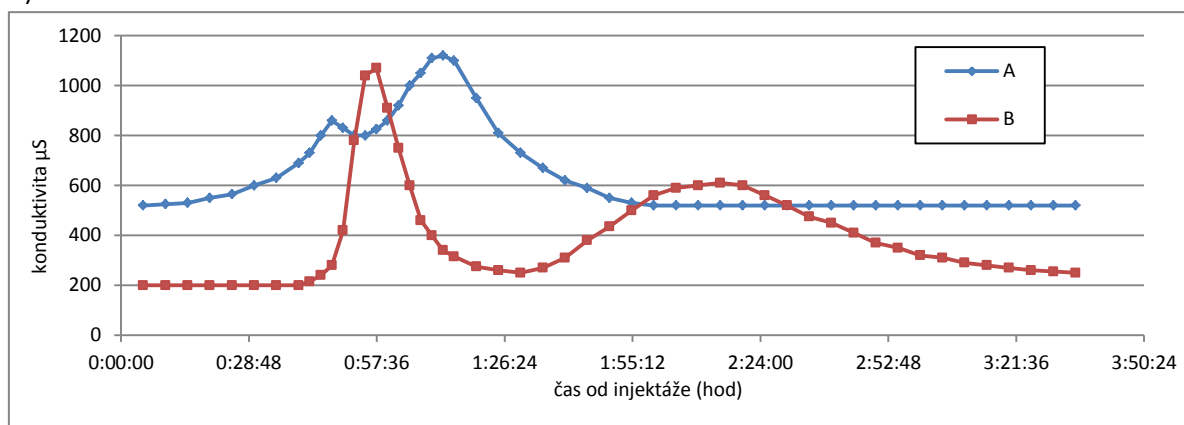
Průchod stopovače byl měřen v prvním případě kombiboxem a v druhém případě konduktometrem. Obě zkoušky jsem převedla do elektronické podoby a znovu vyhodnotila v programu Qtracer. Průnikové křivky jsou znázorněny na obr. 4.3. Autor uvádí tyto závěry ze stopovací zkoušky: Trativod

od Ochozské jeskyně bifurkuje do dvou větví. První větev je kratší a odvádí pouze malé množství vody. Druhá větvička je větší a dvojnásobně dlouhá. První voda z Ochozské jeskyně se při povodni objevuje v Netopýrce za 45-55 minut (Himmel 1990).

a)



b)



Obrázek 4.3: Graf průběhu vodivosti na profilu Netopýrka při stopovací zkoušce mezi Ochozskou jeskyní a jeskyní Netopýrka při dvou různých průtocích (O15 a O16). A) 16. 5. 1986, $Q=15,66 \text{ l.s}^{-1}$, B) 27. 6. 1986, $Q=6,6 \text{ l.s}^{-1}$. a) převzato z Himmel (1990), b) znovu vyhodnocené průnikové křivky

Stopovací zkoušky z Ochozské jeskyně do Netopýrky jsou k dispozici pouze tyto dvě. Z nich vyplývá klesající závislost v_p na Q . Na tomto úseku se kanál rozděluje do dvou větví. Při vysokém průtoku většina vody teče delší větví, protože má větší kapacitu, dorazí sem pík s vyšší koncentrací později. Při nízkém průtoku nejvyšší koncentrace dorazí brzo kratší větví, dlouhým kanálem teče příliš pomalu, dojde tedy k většímu zředění (obr. 4.3; Himmel 1990).

Hádecké propadání I – vývěr Říčky I

O17: Pro zjištění této souvislosti bylo 30. 5. – 3. 6. 1966 injektováno 30 kg NaCl. Nejvyšší koncentrace ve vývěru I byla po 17 hodinách. Sledovány byly i vývěry Říčky II a III a Netopýrka, stopovač se zde ale neobjevil. Průtok u Propadání při zkoušce byl 13 l.s^{-1} (Hort et al. 1967).

O18: Himmel (1989) provedl ve dnech 15. 5. – 16. 5. 1987 stopovací zkoušku pomocí fluoresceinu. Průtok vývěru Říčky I v té době činil $10,5 \text{ l.s}^{-1}$. Stopovač se ve vývěru objevil za 8 hodin a 20 minut.

Hádecké propadání III – vývěř Říčky I

O20: Burkhardt (1971-1972) provedl 4. 7. 1969 stopovací zkoušku při průtoku ponorem 15 l.s⁻¹. Ve vývěru se stopovač objevil po 8 hodinách, maxima dosáhl po 9 hodinách.

O21: Další stopovací zkouška uskutečněná ve dnech 15. 5. – 16. 5. 1987 (Himmel 1989) byla za pomoci NaCl, průtok vývěru, jak již bylo zmíněno, činil 10,5 l.s⁻¹. První objevení stopovače nastalo po 8 hodinách a 40 minutách.

Mezi Hádeckým propadáním III a vývěrem, Říčky I se rychlost příliš nemění a hodnoty Pe a podélné disperzivity nejsou k dispozici.

Hádecké propadání IV – vývěry Říčky

Stopovací zkoušku z Hádeckého propadání IV provedl v roce 2005 M. Knížek (Knížek 2006). Zkouška byla provedena za velmi vysokého stavu v době jarního tání. Stopovací zkouška tedy byla ovlivněna stoupajícím průtokem (cca na sedminásobek) v jejím průběhu. Rychlost proudění v krasových kanálech se ale pravděpodobně výrazně neměnila, protože ponory byly po celý průběh zkoušky zaplaveny a přebytečné množství teklo povrchovým korytem Říčky. K vyhodnocení byly použity maximální průtoky na vývěrech podle Himmela (1990) a to 231 l.s⁻¹ na vývěru I a 42 l.s⁻¹ na vývěru II, protože vývěry byly zaplavené povodňovými vodami a nebyla možnost průtok přímo měřit.

Ze srovnání průnikových křivek obou vývěrů je zřejmé, že do vývěru Říčky II. dochází k intenzivnímu přítoku vod. Kromě autochtonních vod se může jednat i o prosakující vody ze zaplaveného náhonu před vývěrem Říčky II. Ze srovnání obou vývěrů je zřejmé, že po oddělení kanálu směrem k vývěru II. se snižuje objem kanálu. Střední rychlosti proudění při vysokých vodních stavech se pohybují v rozmezí 6-7 cm.s⁻¹ s maximální, odpovídající prvnímu příchodu stopovače, okolo 10 cm.s⁻¹.

4.2.2. Povodí Křtinského potoka

Křtinské údolí je situováno mezi Křtinami a Josefovem, od Josefova k Adamovu se potom údolí nazývá Josefovské (celková délka je cca 10 km). Údolí je odvodňováno Křtinským potokem, který překračuje krasovou hranici za obcí Křtiny, kde se postupně ztrácí v síti ponorů (označovaných abecedně A-F). Poslední dva aktivní ponory (E a F) za běžného vodního stavu se nachází před jeskyní Výpustek. Ponor E je drénován přímo do propasti č. 9 ve Výpustku a dále protéká přibližně 3 km neznámými podzemními chodbami k Otevřené skále a vývěru Křtinského potoka, který se nachází 700 m před Josefovem (obr. 4.4).



Obrázek 4.4 Mapa Křtinského údolí s lokalizací stopovacích zkoušek na Křtinském potoce.

Otevřená skála – vývěr Křtinského potoka

K1: Do toku v Otevřené skále byl jednorázově injektován NaCl. Konduktivitu zaznamenávaly v intervalu 30 s dva konduktometry umístěné na levém břehu toku pod mostkem silnice ve vzdálenosti 61 m přímoú čarou. Podle měření chemickou metodou průtok ve vývěru dosahoval 50 až 53 l.s⁻¹. Po 32 minutách bylo zaznamenáno první objevení stopovače, v 53. minutě koncentrace dosáhla maxima. Objem kanálu mezi oběma místy činí 220 m³ a průměrný průřez 2,5 m². (Bruthans a Vojtěchovská 2009)

4.2.3. Jedovnický potok (Býčí skála)

Barová jeskyňe – vývěry Jedovnického potoka

B1: 9.9.1951 v 8:15 bylo na dně Barové jeskyňe injektováno 400 g skvostné žluti FLS (Burkhardt 1953). Ve vývěru I se barvivo objevilo po třech hodinách, ve vývěru II o 10 minut později a vývěr III (hlavní vývěr, mapa vývěrů viz obr.4.16) byl po celou dobu suchý. Zbarvení odeznělo až v 17:45, tedy po 9,5 hodinách. Průtok v Býčí skále v té době činil 50 l.s⁻¹.

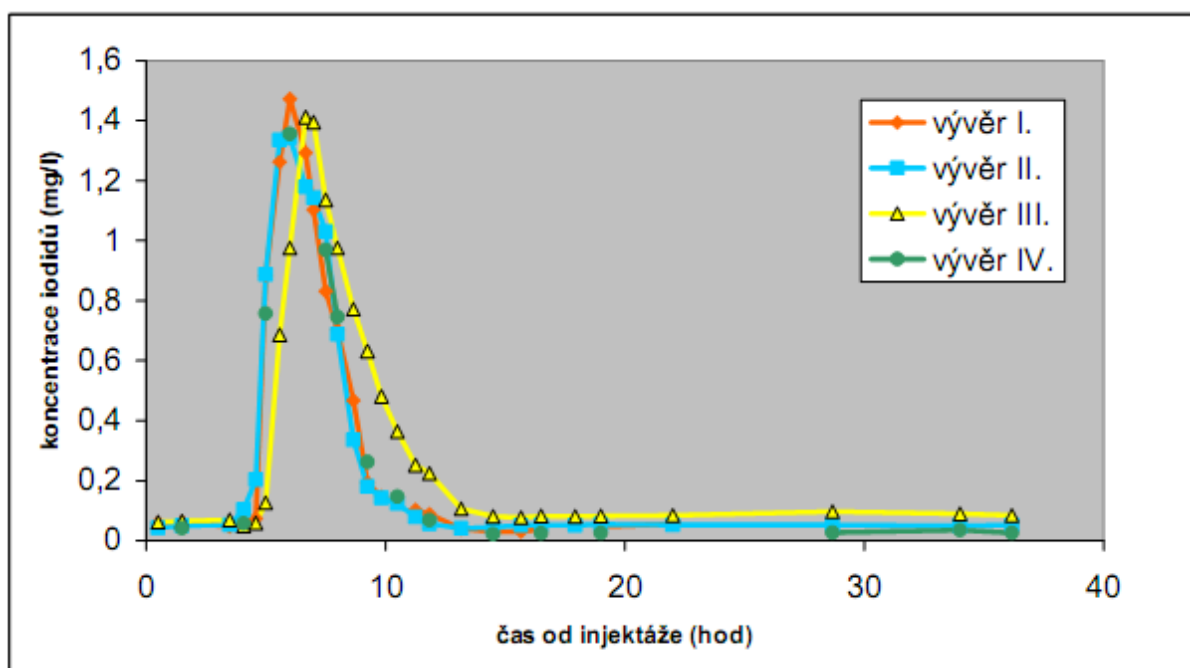
Kaňony v Nové Býčí skále – vývěry Jedovnického potoka

B2: Injektáž stopovače (2 kg KI) proběhla 10.6.2005 ve 4:00. Vzorky byly odebírány ze všech čtyř vývěrů v intervalu 30 minut a po 10 hodinách od injektáže byl interval vzorkování prodlužován. Odběry byly ukončeny 11.6. v 16:10. Zkouška byla provedena za stálého chladnějšího počasí bez srážek s výjimkou slabého mrholení 8.6. dopoledne, které na vodní stavy nemělo žádný vliv. Vodní stav byl tedy během celé zkoušky vyrovnaný. Hodnoty průtoků jsou uvedeny v tab. 4.3. Z jejich srovnání vyplývá, že mezi Kaňony a vývěry pravděpodobně přitéká 10 až 15 l.s⁻¹ autochtonních vod.

Tabulka 4.3 Průtoky Jedovnického potoka na místech injektáže a sledování v průběhu stopovací zkoušky z Kaňonů v Býčí skále do vývěřů Jedovnického potoka (B2; Knížek 2006)

Profil	Datum	Průtok ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$)
Nad Kaňony	9.6.05 17:30	70,8
Soutok vývěřů Jedovnického potoka	11.6.05 13:40	82,6
Vývěř I	11.6.05 13:55	7
Vývěř II	11.6.05 14:15	36,7
Vývěř III	11.6.05 14:30	38,7
Vývěř IV	11.6.05 14:10	2 až 5

Ve všech vývěřech se jodidy objevily ve stejné koncentraci. První objevení ve všech vývěřech nastalo po 5 hodinách, ve vývěřech I, II a IV s maximem po 6 hodinách a ve vývěřu III po 7 hodinách. Průnikové křivky znázorňuje obr. 4.5. Proudění ve vývěřech I, II a IV je tedy přibližně vyrovnané, dosahuje maximálních rychlostí 168 až 173 $\text{m}\cdot\text{hod}^{-1}$, střední doby zdržení 6,8 hodiny. Do hlavního vývěřu (III) voda proudí nižší maximální rychlostí 150 $\text{m}\cdot\text{hod}^{-1}$, střední doba zdržení je ale vyšší než v ostatních vývěřech, a to 10,5 hodiny. Je zde také největší objem kanálu a průměrný profil. Odlišné hodnoty podélné disperzivity a Pecletova čísla od ostatních vývěřů má vývěř I (disperzivita je 4,9 m, Pe 170), v ostatních vývěřech se Pe pohybuje mezi 77 a 116, podélná disperzivita mezi 7,2 a 9,8 metry. Všechny parametry ze stopovací zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4.4.



Obrázek 4.5 Průnikové křivky koncentrace KI na jednotlivých vývěřech Jedovnického potoka (Knížek 2006)

4.2.4. Povodí Punkvy

Vilémovice, Lopač – Malý výtok

P1: Detailní stopovací zkoušku provedli Zeman a Bruthans (2002). Stopovač byl injektován 1. prosince 2001 od 10:45 do 12:30. Do vodopádu těsně před koncovým sifonem v jeskyni Nový Lopač bylo vypuštěno 5 kg fluoresceinu. Práškový fluorescein byl rozpouštěn vodou z Lopače v 25 litrovém barelu po malých dávkách. Pravidelné odběry vzorků vody pro stanovení koncentrace fluoresceinu započaly souběžně s nálevem stopovače na pěti vybraných profilech: Malé propadání Punkvy, Malý výtok Punkvy, studna před Kateřinskou jeskyní, pramen Hanačka ve Skalním Mlýně a tok Punkvy v místě ostré zatáčky silnice cca 200 m pod hotelem Skalní Mlýn. Celkem 24 míst (včetně odebíraných profilů) bylo osazeno patronami s aktivním uhlím. Zpočátku byly vzorky odebírány každé 4 hodiny po dobu 3 dní. Potom každých 6 hodin po dobu 21 dní a nakonec každých 24 hodin až do ukončení pokusu naplánované na 1.3.2002. Po objevení stopovače byla frekvence odběrů přechodně zvýšena.

Fluorescein se objevil po 26 dnech v Malém výtoku Punkvy v Pustém Žlebu a zároveň též v 10× nižší koncentraci na sledovaném profilu Punkva pod Skalním Mlýnem. Stopovací pokus prokázal, že za nízkých vodních stavů směřují vody Lopače do jeskyně Stovka. Poté přes 90% vody ze Stovky vyvěrá v Malém výtoku a 3 až 10% přetéká do odvodňovacího tunelu Punkevních jeskyní v oblasti jeskyně Čtyřicítka (0,5 až 2 l/s) a mísí se s vodou Punkvy. Na žádném jiném sledovaném místě včetně Skalního mlýna se během dvou měsíců od zahájení zkoušky stopovač neobjevil. Za povodní vstupuje Punkva do prostor Stovky z odvodňovacího tunelu Punkevních jeskyní a tvoří i přes 80% vydatnosti Malého výtoku. Stopovací zkoušky provedené v oblasti ostrovsko-vilémovických vod prokázaly anomálně pomalý pohyb vody v krasových kanálech a enormní objem krasového kanálu a velký střední průměr kanálu (Zeman a Bruthans 2002).

P2: Dne 5. 3. 2009 ve 23:30 bylo injektováno 1400 g Na-fluoresceinu do koncového sifonu ve Vilémovickém propadání pod tzv. Koupelnou (Pavelová et al. 2011). První tři vzorky byly odebírány po dvou hodinách, dalších 30 vzorků po hodině, 7 vzorků po čtyřech hodinách a poté až do 13.3.2009 po dvanácti hodinách. Jako hodnota průtoku v místě sledování bylo použito jednorázových měření 2500 l.s^{-1} a v místě injektáže 700 l.s^{-1} a také vypočtená hodnota $0,11 \cdot \text{hodnota průtoku Punkvy}$, který byl zaznamenán na limnigrafu Skalní mlýn, protože se průtok během zkoušky výrazně měnil a není možné změřit průtok Vilémovického potoka přímo na vývěru.

Bylo potvrzeno, že Vilémovické vody vyvěrají v Malém výtoku. Oproti nízkým stavům byla dosti vysoká rychlost proudění, stopovač se ve vývěru objevil za 7 hodin. Některé hodnoty (např. objem zatopených prostor a průměrná plocha kanálu) mohou být nadhodnoceny díky neznámému množství přitékající vody z Punkvy.

Malé propadání Punkvy – tunel

P3: 8. 6. 2009 byla na terénním kurzu University Karlovy v Praze provedena stopovací zkouška z Malého propadání Punkvy do umělého odvodňovacího tunelu Punkevních jeskyní, do kterého tento krátký jeskynní systém ústí. Jako stopovač bylo použito 5 kg NaCl. Před ústím kanálu do tunelu a 15 m pod spodním ústím tunelu byly umístěny konduktometry, které oba měřily v kroku 30 s. Průtok byl měřen chemickou metodou (161 l.s^{-1}) a hydrologickým křídlem (234 l.s^{-1}). Rozdíly měření jsou pravděpodobně způsobeny špatnými podmínkami pro obě metody. Porovnáním výsledků z obou

profilů můžeme zjistit rozdíly mezi prouděním v krasovém kanálu a v tunelu (Bruthans a Zeman 2010).



Obrázek 4.6 Situace stopovacích zkoušek z Malého propadání Punkvy do tunelu z punkevních jeskyní.

Po porovnání se stopovací zkouškou na stejném místě o dva roky později jsem k vyhodnocení použila průtok $234 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, protože průtok změřený chemickou metodou se zpětně jeví jako nepravděpodobný. Vzhledem k tomu, že návratnost stopovače přesahuje 100%, budou pravděpodobně průtoky změřené křídlem nadhodnocené. V tabulce jsou a uvedeny i hodnoty vypočtené z nižšího naměřeného průtoku.

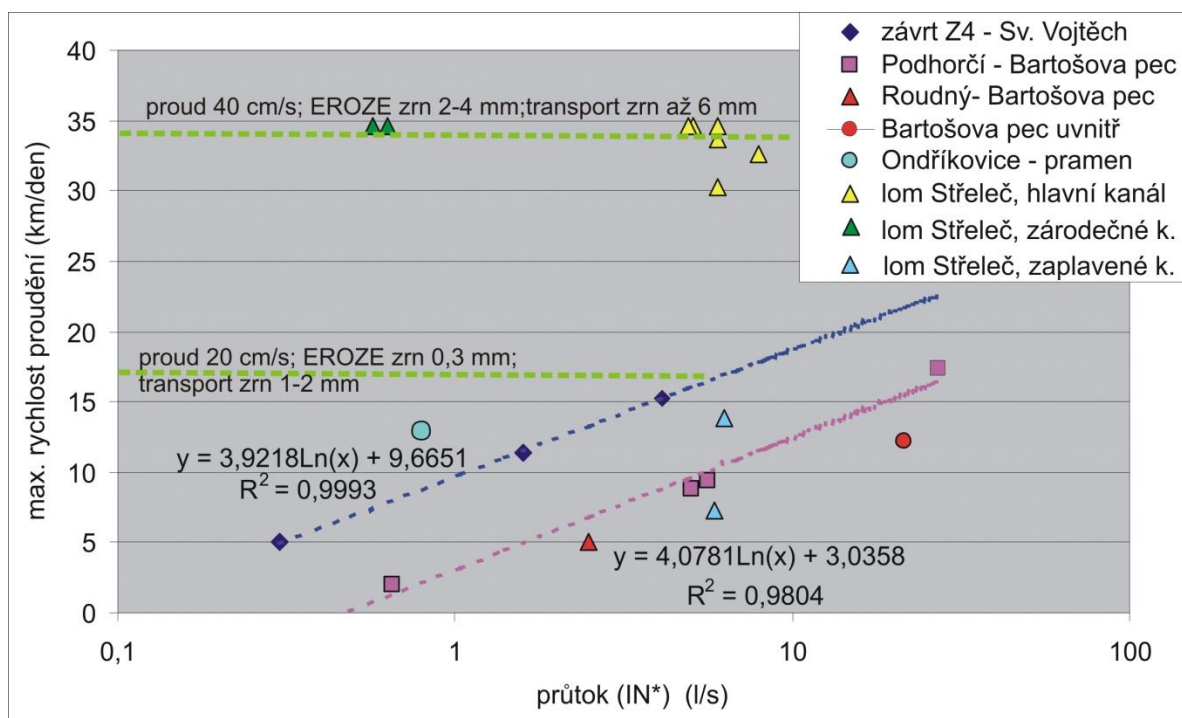
4.2.5. Česká křídlová pánev

Pro srovnání jsem přidala i data z krasových kanálů z české křídlové pánve:

X1 – X3: Miskovický kras, kde se nachází 4 závrtů s celkovou hltností přes 23 l/s a pramen Sv. Vojtěch s vydatností až 54 l/s se nachází 2 km západně od Kutné Hory. Jedná se o jediné krasové území budované křídlovými vápenci v ČR. Malá mocnost vápenců a jejich mírný náklon souhlasný s povrchem terénu neumožňuje na velké části území vznik mocnější saturované zóny. Voda zde zřejmě stéká ve formě volných toků při hranici vápenců a nekrasového podloží tvořeného rulami. Oblast a charakter proudění detailně popisuje Bruthans a Churáčková (2011). V jednom ze závrtů (Z1) byl speleologickým průzkumem obnažen krasový kanál, kterým voda ze závrtu odtéká. Na lokalitě bylo provedeno 6 úspěšných stopovacích zkoušek na přímé vzdálenosti 2 km. Maximální rychlosti proudění se pohybují mezi 5-15 km/den.

X4 – X7: V oblasti ohraničené obcemi: Hrubý Rohozec, Jenišovice, Frýdštejn, Malá Skála, Dolánky se nachází závrtů, ponory, poloslepá údolí a dvě jeskyně protékané podzemními toky s prozkoumanou délkou až 225 m a průtokem za maxima přesahujícím 100 l/s (Bruthans et al., 2006). Ponory a závrtů se nachází v místech, kde se voda z teplického souvrství (výrazně nenasycená vzhledem k CaCO_3), nebo povrchová voda akumulovaná na mocnějších spraších dostává do kontaktu s horninami jizerského souvrství obsahujícího až 80% karbonátu. Stopovací zkoušky z této oblasti shrnuje

Bruthans et al. 2006 a Mikuš et al. (v tisku). Maximální rychlosti proudění z celkem 11 úspěšných stopovacích zkoušek se pohybují mezi 0,3 a 17 km/den.



Obrázek 4.7 Výsledky kvantitativních stopovacích zkoušek provedených v kanálech vzniklých díky sebeorganizaci v české křídové pánvi. IN* - v prvních třech systémech je udáván průtok na ponoru (průtok na vývěru kolísá méně a není tak těsně svázán s rychlostí proudu), v ostatních se jedná o průtok platný v celé dráze stopovací zkoušky. Velikosti erodovaných a transportovaných klastů byly odečteny z Hjulström-Sundborgova diagramu (Bruthans et al. 2011).

Ve dvou kanálech (kanál mezi závrtem Z4 a pramenem Sv. Vojtěch a kanál mezi ponorem Podhorčí a Bartošovou pecí) byly stopovací zkoušky opakovány za různých průtoků na ponorech. V obou případech existuje velmi těsná závislost mezi průtokem na ponoru a maximální rychlostí proudění. S exponenciálním růstem průtoků roste rychlost proudění lineárně (Bruthans et al. 2011).

Porovnáme-li výsledky z Moravského krasu s Českou křídovou pánví, je zde mnohem těsnější závislost v_p , D_L i Pe na průtoku. Může to být, protože kanály v pískovcových horninách se tvoří na puklinách a mají rovný a pravidelný tvar, zatímco ve vápencích vznikají kanály složitějších tvarů a jednotlivé jeskyně se mohou svými vlastnostmi výrazně lišit. Rychlosti proudění jsou srovnatelné s krasovými kanály, s průtokem rychlost ale roste rychleji, což také může být důsledek rozdílné geometrie kanálů.

Tabulka 4.4: Přehled výsledků všech použitých stopovacích zkoušek (kompletní data vyhodnocených zkoušek jsou uvedena v příloze A)

označení zkoušky	miesto injektáže	miesto sledování	datum	oblast	průtok na místě injektáže (l/s)	průtok na místě sledování (l/s) (průměr)	skutečná vzdálenost (m)	přímá vzdálenost (m)	čas prvního objevení (min)	čas maximální koncentrace (min)	střední doba zdržení (hod)	přední rychlost (m/den), rychlost plá (m/den)	maximální rychlost (m/den)	koeficient disperzivty (m ² /S)	rozdělná disperzita (m)	pečetovo číslo	návnatnost stopovace (%)	objem kanálu (m ³)	průměrná plocha omezeného profilu (m ²)		
O2	hosténické propadání I	estavela	28.3.59	(Knižek 2006)	7.00	2.50	938	625	380	570		1468.8*	3553						0,138 - 0,93		
O4				Himmel 1990	20.00	19 až 19.5	900	600	205	245	4.41	4899	6322	0.31	5.44	165.57	11.8 kg	317.50	0.35		
O5				Balák et al. 2004	28.8.-5.9.02		2.00	900	600	6780	6780	117.90	183	191	0.79	0.37	2416.50	0.20	848.82	0.94	
O7				Himmel 2009	1.-7.10.08		7.00	2.50	900	600	305	365	3551*	4249							
O8			4.6.10		236.20	25.90	938	625	319	468	12.65	1790	4232	0.17	8.40	111.55	41.15	1179.80	1.26		
O3	host.prop. I	netopyřka	30.5.-3.6.66	Hort 1967 (Balák 2004)	15		1325		1740				1096.6								
O5				Balák et al. 2004	28.8.-5.9.02	3.6	0.9	1325		1380	2820	59.5	534.8	1096.6	0.3	44.5	29.8	30.0	5951.2	4.49	
O6				Balák et al. 2004	30.8.-8.9.04	1.1	0.9	1325		2880	4560	101.0	314.4	662.5	0.3	71.3	18.6	16.4	327.7	0.27	
O1	Hosténické propadání I	Vývěr Řičky I	21.12.57	1971 (Knižek 2006)	2	60	2160	1440	2520				1234								
O3				Balák et al. 2004	30.5.-3.6.66	15		2160	1440	1740				1788							
O5				Balák et al. 2004	28.8.-5.9.02		8.5	2160	1440	1740	2100	45.8	1131.3	1787.6	0.25	19.08	113.2	2.06	1402.1	0.6491	
O6				Balák et al. 2004	30.8.-8.9.04		1	2160	1440	3600	4080	86.8	597.06	864	0.193	27.91	77.4	5.7	312.57	0.145	
O5	Hosténické propadání I	Vývěr Řičky II	28.8.-5.9.02	Balák et al. 2004		27.8	2370	1580	1740	2100	41.9	1356	1961.4	1.33	84.6	28	6.8	4198.1	1.7713		
O6				Balák et al. 2004	30.8.-8.9.04		26	2370	1580	3600	4080	86.3	659.1	948	0.214	28.06	84.4	100.4	8077.7	3.4	
O9	Hosténické propadání II	Ochozská	10.-14.10.66	Hort 1967 (Balák 2004)	45		1000		600				2400								
O10				Himmel 1990	7.6.72		4	750		250				5760							
O11				Himmel 1990	1.-7.10.08		17	17	1000		155	180	3.169	7572.3	9290.3	0.28887	3.296	303.4	15.3 kg	193.97	0.194
O12				Himmel 2009	3.6.10				1040		36	46	0.79	34269	41600	0.93735	2.3633	440.07	97.503	899.77	0.86516
O14				Himmel 2009	5.6.10				1040		65	78	1.3749	18613	22597	0.55261	2.5652	405.42	95.99	609.28	0.58585
O15	Ochozská trhatov	Netopyřka	16.5.86	Himmel 1990	15.66		135	90	10	72.5	1.12	2895	19440	0.1688	5.037	26.799	62.7	63.089	0.47		
O16				Himmel 1990	27.6.86		6.6	135	90	42.5	57.5	1.9	1694.2	4574	0.25	1.28	105.15	32.2	45.4	0.337	
O17	Hádecké propadání I	Vývěr Řičky I	30.5.-3.6.66	Hort 1967 (Balák 2004)	13		1683	1122	1020				2376								
O18				Balák et al. 2004	15.5.-16.5.87	10		1683	1122	500				4847							
O19				Himmel 1990	7.6.10		108	1683	1122	313	413		5868.087	7742.875							
O20	Hádecké propadání III	Vývěr Řičky I	4.7.69	1971 (Balák)	15		1455	970	480				4365								
O21				Himmel 1989 (Balák 2004)	15.5.-16.5.87	11		1455	970	520				4029							
O22	Hádecké propadání IV	Vývěr Řičky I		Knižek 2006		231.00	1290.00		225.00	315.00	6.00	5486.70	8256.00	0.44	6.90	186.30	87.80	5027.50	3.90		
O23				Knižek 2006		42.00	1485.00		225.00	345.00	6.50	5801.00	9504.00	2.80	41.40	35.90	12.00	990.20	0.70		
K1	Otevřená skála potoka	Vývěr Křínského potoka	2007	Bruthans a Vojtěchovská 2009		50 až 53	90	60	32	53	1.18	1830	4075	0.08	4	24	93-100	220	2.5		
K2				Himmel 1990	4.6.10		267	90	60	9	15	0.30	8325	14400	0.16	1.7	54	90	293	3.3	
K3	Vývěr Křínského potoka	Vývěr Křínského potoka	2009	Kůrková et al. 2010	10	58-88	3870		8040	11160	183	509	693	0.07	11	350		6600 - 41400	0.86 - 10.7		
K4				Himmel 1990	1.6.10		200		2500	2775	2775	93.426	963.33	1945.9	8.1372	729.81	5.14	96.3	67267	17.94	
P1	Vilé Lopáč	Malý výtok	2002	Pavelová et al. 2009	7	17	6300	4200				90	160						6 až 16		
P2				Pavelová et al. 2011	5.3.09		700	2500	4050	2700	414	576	11.1 až 11.5	5640	9360		15	170 až 190	72 až 77	30 až 100 tis	11 až 38
P3	Malé propadání Punkvy	pod tunelem v tunele m	8.6.09	Jäger 2010	120	120	75	50	30.5	46	0.86	2097	3541	0.26	1.06	70.8	67	381			
P4				Jäger 2010	6.6.11		227	75	50	34	54	1.00	1856	3153	0.21	0.97	77.4	105	814		
P3				Jäger 2010	8.6.09		120	234 (161)	190	45	62	1.10	4124	6080	0.61	1.29	147.8	72	(640.9)		
P4				Jäger 2010	6.6.11		227		190	50	70	1.30	3672	5472	0.80	1.90	100.8	109	1035		
X1	závrt Z4	SV. Vojtěch				54							15.30		4.9	629					
X2						49								11.35		8.1	380				
X3						34.0								5.04		14.3	215				
X4						102								17.33		0.9	1087				
X5	Podhorčí	Bartošova Pec				44							9.36		2.2	435					
X6						40								8.78		1.9	524				
X7						24								1.94		1.3	76				
X8						102								17.33		0.9	1087				
B2	Kaňony	vývěr I	11.6.2005	Knižek 2006	71	7	855		300	360	6.8	126	4104	0.17	4.9	170	7	170	0.2		
B2				Knižek 2006	11.6.2005	71	37	795		276	334.8	6.7	119	4152	0.26	8.0	99	36	890	1.1	
B2				Knižek 2006	11.6.2005	71	39	750		300	400.2	10.5	71	3600	0.19	9.8	77	53	1470	2.0	
B3				Knižek 2006	4.6.2010		1500	750		9	28	0.5	35631	120000	3	7.4	102		2713	3.6	
B1	Barová leskyně	vývěr IV	11.6.2005	Knižek 2006	71	3	840		300	360	6.8	124	4032	0.25	7.2	116	3	73	0.9		
B2				Burkhardt 1953	9.9.1951	50		300	200	180				2400							
B5				Burkhardt 1953	6.6.2011	70	3.5	300	200	131	181	3	2359	3298	0.06	2.2	136	4.9	39	0.13	
B1				Burkhardt 1953	6.6.2011	70	3	247.5	165	190.00				1875.789							
B5	Barová leskyně	vývěr II	9.9.1951	Burkhardt 1953	50		247.5	165	190.00				1875.789								
B1				Burkhardt 1953	6.6.2011	70	3	247.5	165	129	194	3.1	1910	2763	0.05	2.04	147	3.5	34	0.14	
B4				Burkhardt 1953	5.6.2010		1633	225	150	3.00	10	0.17	37652	108000	0.50	1.20	186		1041	4.60	
B5				Burkhardt 1953	6.6.2011	70	63	225	150	90.75	161.3	2.8	1971	3568	0.13	4.13	73	79	628	2.8	
B5		Burkhardt 1953	6.6.2011	70	3	247.5	165	125	176	3	1981	2851	0.07	2.53	119	4.2	33	0.13			

4.3. POPIS PROVEDENÝCH STOPOVACÍCH ZKOUŠEK

Celkem jsem s kolegy provedla 11 stopovacích zkoušek v letech 2009, 2010 a 2011. V červnu a červenci 2009 jsem provedla ve spolupráci se S. Kejíkovou a studenty terénního kurzu stopovací zkoušku z ponoru E Křtinského potoka do vývěru a do Josefova.

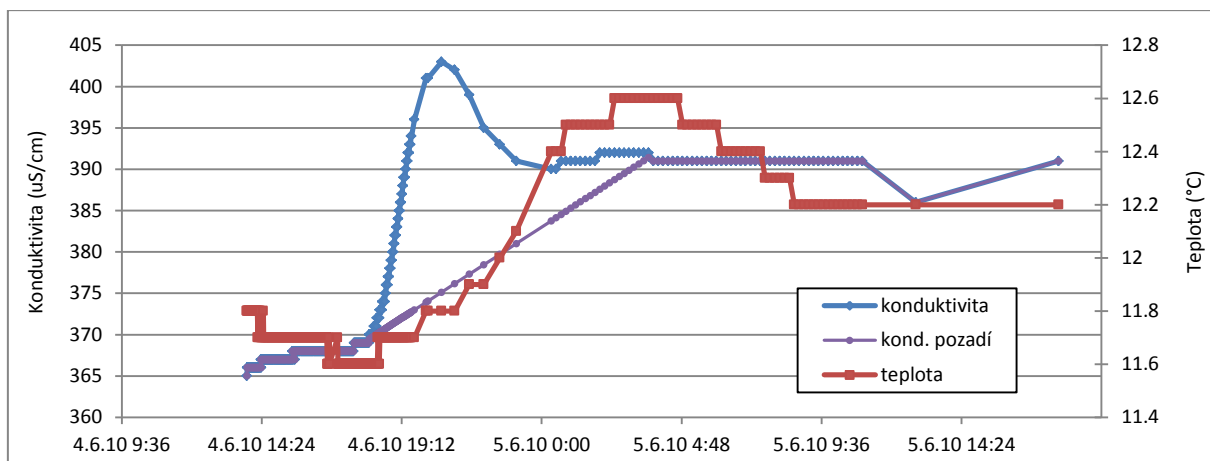
V červnu 2010 jsem ve spolupráci s ostatními studenty provedla na terénním kurzu tři stopovací zkoušky v Ochozské jeskyni (z Hostěnického propadání I do Ochozské jeskyně a Hádecké estavele a dvakrát z Hostěnického propadání II do Ochozské jeskyně za různých vodních stavů) a jedna stopovací zkouška na Křtinském potoce z Otevřené skály do vývěru Křtinského potoka. Zkoušky byly provedeny za velmi vysokých průtoků po povodních způsobených přívalovými dešti v posledních květnových dnech. Počasí během stopovacích zkoušek bylo stabilní, ale v Ochozské jeskyni průtok rychle klesal. Záznam z čidla měřícího hladinu v Ochozské jeskyni z první poloviny června 2010, kdy se všechny zmíněné stopovací zkoušky (O8, O13 a O14) uskutečnily, je znázorněn spolu s grafy průnikových křivek na obrázcích 4.10 a 4.11. Za vysokého stavu byly provedeny i stopovací zkoušky z Kaňonů v Býčí skále a z Barové jeskyně do vývěrů Jedovnického potoka (B3 a B4).

Další stopovací zkoušku (P4) jsem se studenty uskutečnila na terénním kurzu UK v červnu 2011, a to zkoušku z Malého propadání Punkvy do tunelu odvádějícího vodu z Punkevních jeskyní a k ústí tohoto tunelu. Na Jedovnickém potoce jsme provedli stopovací zkoušku z Barové jeskyně k vývěrům Jedovnického potoka (B5).

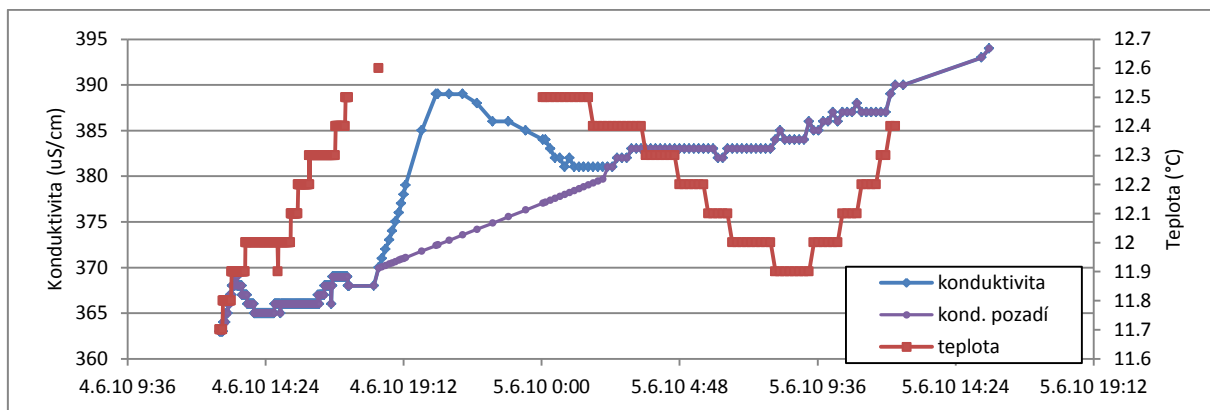
4.3.1. Povodí Říčky (Ochozská jeskyně)

Hostěnické propadání I – Hádecká estavela

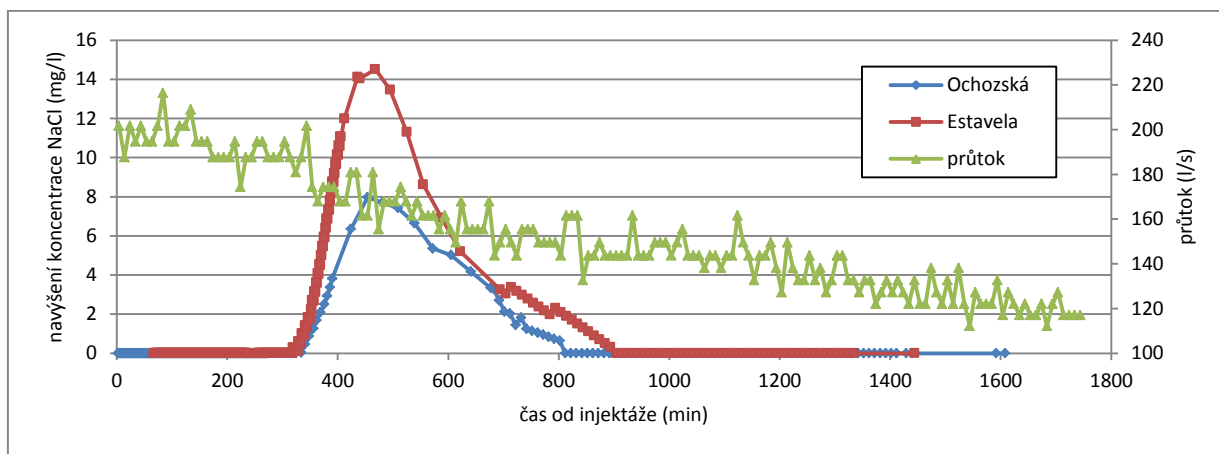
O8: 4. 6. 2010 ve 12:46 bylo injektováno 30 kg soli s po dobu 8,5 min. Konduktivita byla měřena na můstku 20 m pod vývěrem z Ochozské jeskyně automaticky přístrojem Multi 340i a v estavele automaticky přístroji pH/Cond 340i a Cond 340i v intervalu zpočátku 1 minuta, ke konci 10 minut. Mezi 18 a 24 hodinou byla konduktivita pod vývěrem z jeskyně měřena přístrojem pH/Cond 340i a zaznamenávána manuálně z důvodu nedostatečné kapacity konduktometru. Konduktometry měřily konduktivitu i teplotu s malými odchylkami (cca 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$), proto bylo třeba přístroje srovnat a přepočíst naměřené hodnoty na jednotné hodnoty. Také se výrazně měnila konduktivita pozadí, proto ji bylo třeba odečíst (graf na obr. 4.8 a 4.9.). Přesto celková návratnost stopovače vychází 135%. Pozadová konduktivita tedy pravděpodobně rostla rychleji, disperzivita i P_e z této zkoušky jsou jen velmi přibližné a možná přeceněné. Průtok byl měřen chemickou metodou pod vývěrem z jeskyně před zahájením zkoušky 236 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ a průběžně se snižoval, druhý den po ukončení zkoušky byl cca 150 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ (4.10). Průtok v estavele byl 26 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ a výrazně se neměnil.



Obrázek 4.8 Průběh konduktivity a teploty v estavela (O8), odhadnutý průběh pozadové konduktivity..



Obrázek 4.9 Průběh konduktivity 20m pod vývěrem z Ochozské jeskyně (O8) s odhadnutou hodnotou pozadí.



Obrázek 4.10 Průnikové křivky koncentrace NaCl (mg/l) při stopovací zkoušce 4.6.2010 z Hostěnického propadání I měřené v estavela a pod vývěrem z Ochozské jeskyně (O8) a průtok na přepadu v Ochozské jeskyni během stopovací zkoušky.

Rychlosti jsou v obou případech podobné, v estavela se stopovač objevil po 319 minutách, maximální koncentrace dosáhl po 454 minutách, pod Ochozskou jeskyni dorazil po 334 minutách s maximem po 568 minutách. Tomu odpovídá maximální rychlost 213 m hod⁻¹ v estavela a 176 m.hod⁻¹ v Ochozské.

Větší rozdíly už jsou ve střední době zdržení a střední rychlosti: 9 hod a 134 m.hod^{-1} pro Ochozskou jeskyni, 12,6 hod a 75 m.hod^{-1} pro estavelu. Objem kanálu do estavely je 1180 m^3 a profil $1,26 \text{ m}^2$, v případě Ochozské jeskyně zdánlivý objem vychází přes 7000 m^3 a průměrný průtočný profil 6 m^2 . Objem je ve skutečnosti mnohem menší, protože velká část vody od propadání I odtéká do estavely a vývěrů Říčky. Voda směřující směrem k Ochozské jeskyni protéká rozlehlými sifony sifonové chodby a pod ní se spojuje s velkým objemem vody přitékajícím od propadání II. Průtok použitý k vyhodnocení zkoušky zahrnoval i tento přítok.

Po srovnání rychlosti píku všech pěti stopovacích zkoušek z Hostěnického propadání I do Estavely zjistíme, že můžeme najít stoupající závislost, jediný bod, který vybočuje je stopovací zkouška se 4.6.2010, kde je rychlost přibližně poloviční, než by odpovídalo křivce. Tato zkouška byla jako jediná provedena za velmi vysokého stavu, kdy do Ochozské jeskyně z propadání I a II dohromady přetévalo více než 200 l.s^{-1} , estavelou protékalo 25 l.s^{-1} . Vysvětlením může být zaplavení rozsáhlých prostor přímo pod propadáním, což by zvýšilo dobu průchodu stopovače oproti nižším průtokům. Tuto hypotézu je však nutné ověřit dalšími stopovacími zkouškami. V ostatních případech voda odtékala z propadání I jediným trativodem ve směru k estavelu a k vývěrům Říčky. Disperzivitou známe pro tři stopovací zkoušky. Stoupá s rostoucím průtokem, což je poměrně neobvyklé. Stejně tak má opačný průběh Pecletovo číslo, které pro nejnižší průtok dosahuje hodnoty 2400, tedy hodnoty výrazně přesahující výsledky všech stopovacích zkoušek.

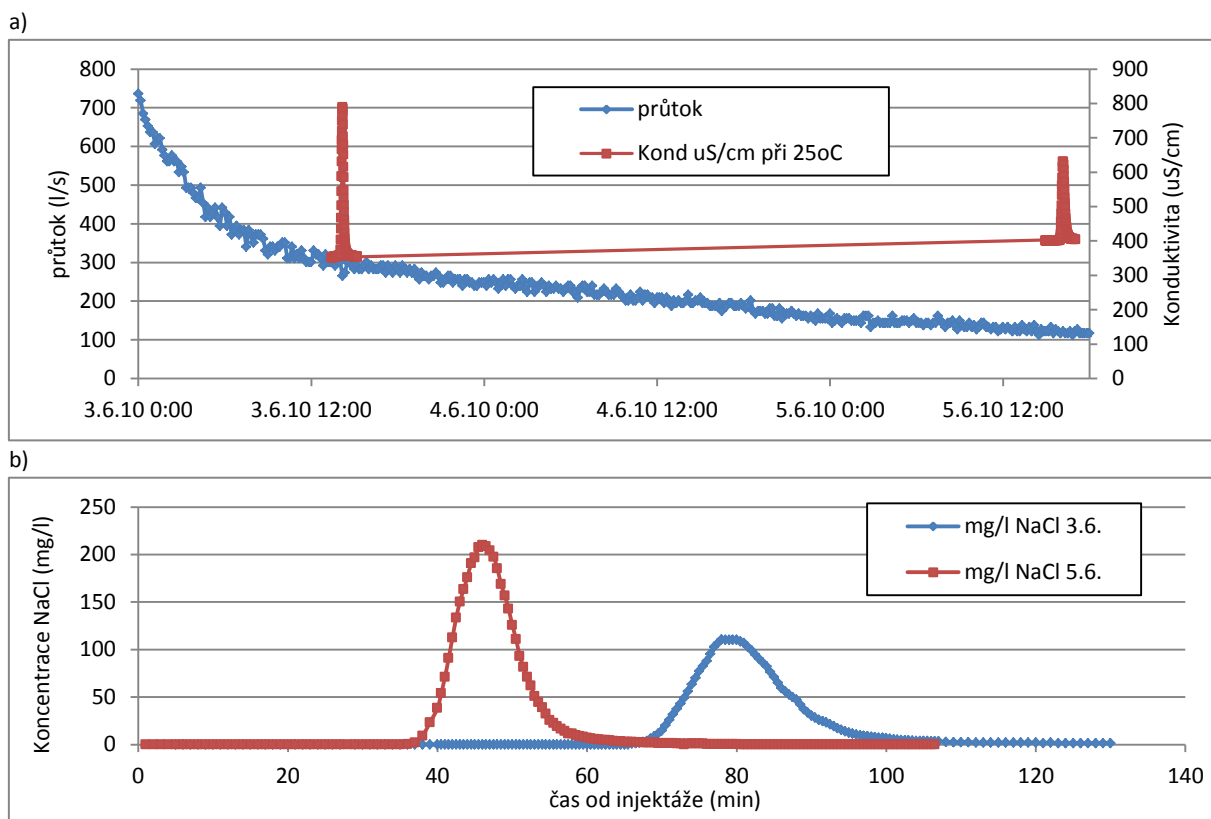
Stopovací zkouška z Hostěnického propadání I do vývěru z Ochozské jeskyně nebyla opakována ani nikdy v minulosti provedena za známého průtoku, proto není uvedena v souhrnné tabulce 4.4 a není možné srovnávat zde parametry za různých stavů. Můžeme ji ale srovnat např. se stopovací zkouškou z Propadání II do Ochozské jeskyně, kde maximální objem kanálů je 900 m^3 při průtoku 317 l.s^{-1} ze dne 3.6.10 (O14). Velké objemy kanálů (4000 až 8000 m^3) se nacházejí mezi Hostěnickým propadáním I a Netopýrkou a vývěrem Říčky II (viz O6 a O7).

Hostěnické propadání II – Ochozská jeskyně

Po povodni na konci května 2010 během snižujícího se vodního stavu (obr. 4.11a) byly provedeny dvě stopovací zkoušky, 3.6. a 5.6. Na obr. 4.11b) je graf průnikových křivek obou zkoušek.

O13: První injektáž byla 3.6. 13:25, po dobu 7 minut bylo injektováno 40 kg soli. Průtok Ochozskou jeskyní v té době činil 311 l.s^{-1} . Na mostku 20m pod vývěrem z Ochozské jeskyně byla automaticky zaznamenávána konduktivita přístrojem Multi 340i v intervalu 30 s.

O14: 5.6. bylo injektováno 13 kg NaCl v době 14:52-14:56 cca 20 m nad Propadáním II s průtokem přibližně 50 l.s^{-1} . Ve vývěru Ochozské jeskyně byl naměřen průtok 117 l.s^{-1} . Opět byla měřena konduktivita, tentokrát přístrojem Cond 340i v kroku 1 min.



Obrázek 4.11 a) Záznam průtoku naměřeného na přepadu v Ochozské jeskyni v době konání stopovacích zkoušek 3.a 5. 6 (O13 a O14), b) průnikové křivky stopovacích zkoušek O13 a O14 z Hostěnického propadání II do vývěru Ochozské jeskyně při průtocích 311 a 117 l.s⁻¹ na přepadu v Ochozské jeskyni.

Proudění z Hostěnického propadání II k vývěru z Ochozské jeskyně dosahuje velmi vysokých rychlostí, ale to až při povodňovém stavu, při nízkém průtoku se skoro nemění. Většina toku má dno tvořené hrubými sedimenty, teče tedy pod povrchem. Pe a D_L je k dispozici pouze ze zkoušek za vysokého stavu. Disperzivita je tedy velmi nízká a Pe vysoké a roste s průtokem.

Hádecké propadání I – vývěr Říčky I

O19: 7.6.2010 bylo v 10:50 do Hádeckého propadání injektováno 300g fluoresceinu do Hádeckého propadání I po dobu 10 min (obr. 3.12). V 11:48 bylo injektováno 200 g eosinu do Netopýrky. Vzorky byly odebírány z vývěrů Říčky I a II a nad vývěry Říčky. Zkouška byla kvůli technickým problémům s fluorimetrem možná vyhodnotit pouze kvalitativně, koncentrace fluoresceinu nebylo možné spolehlivě změřit. Průtoky byly měřeny chemickou metodou, ve vývěru I 108 l.s⁻¹ a vývěru II 88 l.s⁻¹. První objevení fluoresceinu ve vývěru I nastalo po 313 minutách a eosinu 255 minutách od injektáže. Maximální koncentrace fluoresceinu po 413 minutách, maximální koncentrace eosinu nebyla zachycena, protože pík fluoresceinu byl příliš vysoký a překryl pík eosinu, který do vývěru dotekl přibližně ve stejné době. Ve vývěru II se fluorescein objevil 330 min od injektáže a eosin 272 minut. Maxima fluorescein dosáhl po 430 minutách, eosin po 312 minutách. Těmto časům odpovídají maximální rychlosti stopovače z Hádeckého propadání I do Vývěru II 7685 m.den⁻¹ a z Netopýrky do téhož vývěru 8497 m.den⁻¹, rychlosti píku 5877 a 7407 m.den⁻¹. Hodnoty pro stopovací zkoušku z Hádeckého propadání I do vývěru Říčky I jsou uvedeny v tabulce 4.4.



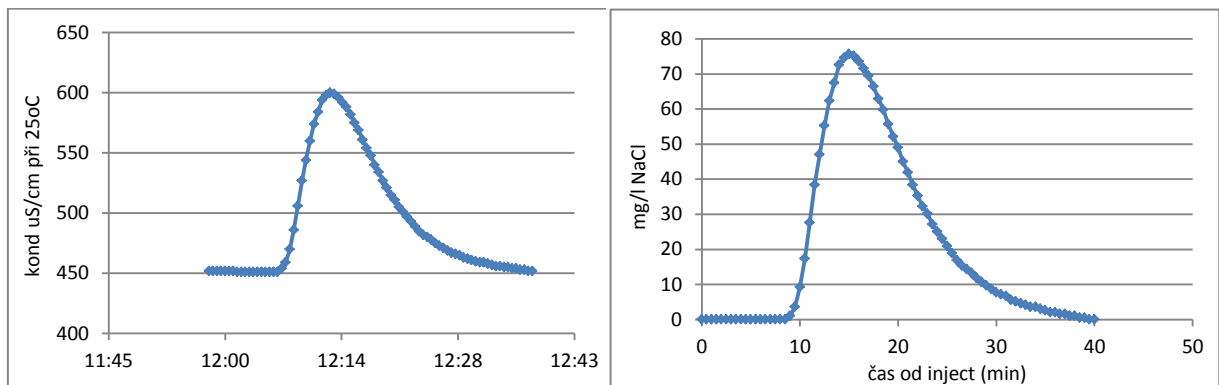
Obrázek 4.12 Injektáž fluoresceinu do Hádeckého propadání dne 7.6.2010 (foto I. Kůrková)

Ze stopovacích zkoušek z Hádeckého propadání I do vývěru I je dobře vidět, že dvě stopovací zkoušky nejsou dostatečným podkladem ke zjištění správné závislosti v_p a Q . Z prvních dvou údajů vyplývá výrazně klesající křivka, po přidání třetí zkoušky při vysokém průtoku je vidět, že rychlost mírně stoupá. Hodnoty D_L a Pe nejsou k dispozici.

4.3.2. Povodí Křtinského potoka

Otevřená skála – vývěr Křtinského potoka

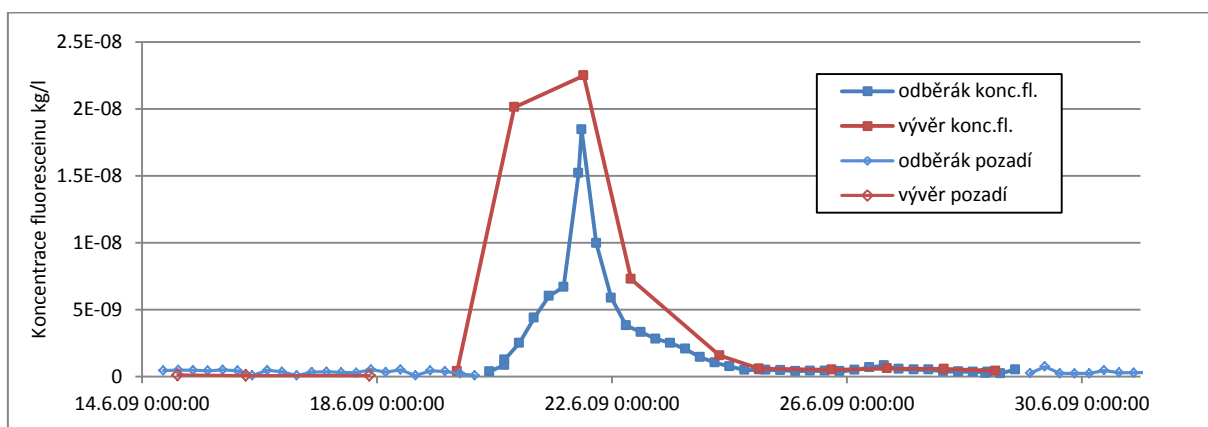
K2: 4.6.2010 v 11:58 hodin bylo do Otevřené skály po dobu 5 minut injektováno 15 kg NaCl rozpuštěného ve vodě. Ve vývěru byla měřena automaticky konduktivita přístrojem Cond 340i v intervalu 30 s. Průtok ve vývěru byl změněn chemickou metodou $267 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. První objevení stopovače bylo po 9 minutách a maximální koncentrace po 15 minutách.



Obrázek 4.13 Průběh konduktivity a koncentrace NaCl Při stopovací zkoušce z Otevřené skály do vývěru Křtinského potoka (K2)

Ponor E – Výpustek – Vývěr Křtinského potoka

K3: 13.6.2009 v 18:30 bylo do ponoru E injektováno 200 g fluoresceinu. Celý potok o průtoku 10 l.s^{-1} se ztrácel v ponoru. V Josefově u Staré huti byl instalován automatický odběrák ZKZ 1, který pomocí čerpadla odebíral vzorky v intervalu 6 hodin. Odběrové místo se nachází 1,9 km pod vývěrem a až za soutokem s Jedovnickým potokem. Průtok na ve vývěru Křtinského potoka se pohyboval mezi 58 a 88 l.s^{-1} . Na několika místech, kde bylo možné očekávat objevení fluoresceinu, byly umístěny patrony s aktivním uhlím. Vzorky byly také odebírány manuálně přímo z vývěru Křtinského potoka jednou za den. Průnikové křivky fluoresceinu jsou uvedeny na obr. 3.14. Dne 19. 6. 09 se průtok Křtinského potoka v důsledku srážek zvýšil natolik, že potok přetékal ponory a tek l celým povrchovým korytem, do té doby suchým. Průniková křivka z vývěru je na rozdíl křivky z Huti minimálně ovlivněná srážkami, proto byla zkouška vyhodnocena podle ní. Objem zatopené části jeskyně je možné stanovit na 10 až 30 tisíc m^3 . To odpovídá ploše průtočného profilu 2,5 až 8 m^2 . Maximální rychlost je 693 m den^{-1} . Přítomnost fluoresceinu byla zjištěna v patronách v jeskyni Jestřábce, kde se ale díky povodni zvýšila hladina o cca 10m a voda sem mohla proniknout zpětným zaplavením. Dále byl fluorescein indikován v prameni štola na levém břehu v nivě Křtinského potoka, 300 m pod Hutí. To je pravděpodobně způsobeno vodou pronikající z potoka přes náplavy. Patrony byly negativní v případě Nové Drátenické jeskyně a Býčí skály.

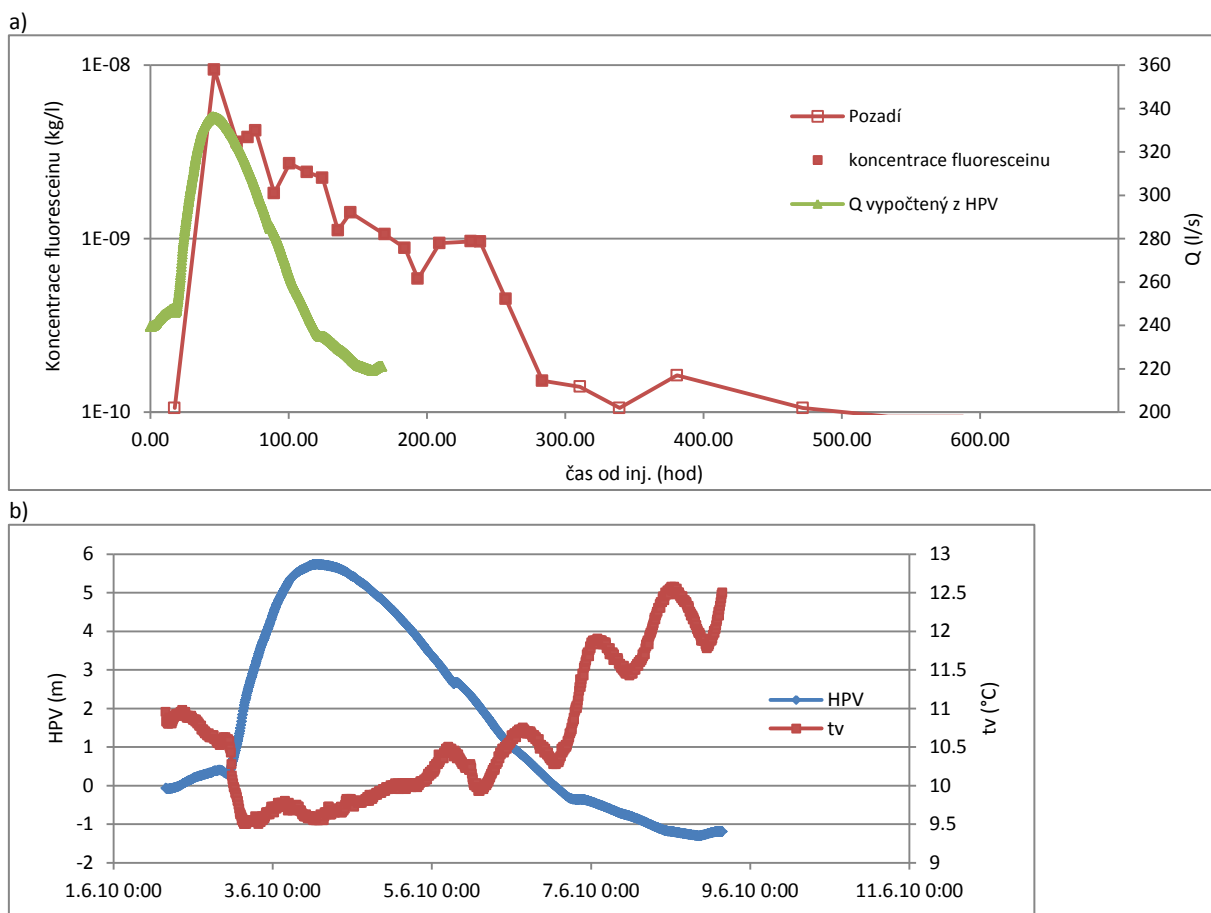


Obrázek 4.14 Průběh koncentrace fluoresceinu ve vývěru Křtinského potoka a u Staré huti (K3).

Zároveň byla 10.6.2009 provedena stopovací zkouška mezi ponorem E a tokem v propasti č. 9 ve Výpustku. Průtok na místě injektáže kolísal mezi 3 a 14 l s^{-1} a na místě sledování spočítaný ze stopovacích zkoušek $4,5$ a $2,7 \text{ l s}^{-1}$. Do ponoru bylo v 17:30 injektováno 5 kg rozpuštěného NaCl. Kolísání pozadí bylo tak výrazné, že průběh vodivosti nebyl možný považovat za prokázanou přítomnost stopovače, proto byla injektáž 11.6. ve 13:25 opakována s 15 kg soli. Výsledná průniková křivka byla výrazná, ale nebyl jasný přesný nástup a konec křivky a bylo třeba pozadí odečíst. Z výsledků obou pokusů je zřejmé, že voda z ponoru E dorazí do Výpustku za cca 3 hodiny, objem zatopené části je okolo 130 m^3 a průměrný průtočný profil necelý 1 m^2 .

K4: Na terénním kurzu v červnu 2010 byla provedena stopovací zkouška z propasti č. 9 v jeskyni Výpustek. 1.6. v 16:00 bylo injektováno 400 g fluoresceinu. Křtinský potok v době injektáže měl pod ponorem E průtok cca $100\text{-}200 \text{ l}$, přetékal ponory a tek l celým povodňovým korytem. Další noc a celý den výrazně pršelo, průtok potoka proto mnohonásobně narostl. Po ustání srážek se průtok postupně snižoval. Ve vývěru Křtinského potoka se průtok během zkoušky pohyboval cca mezi 300 a 200 l.s^{-1} . Dne 4.6. bylo provedeno několik měření chemickou metodou i hydrologickým křídlem

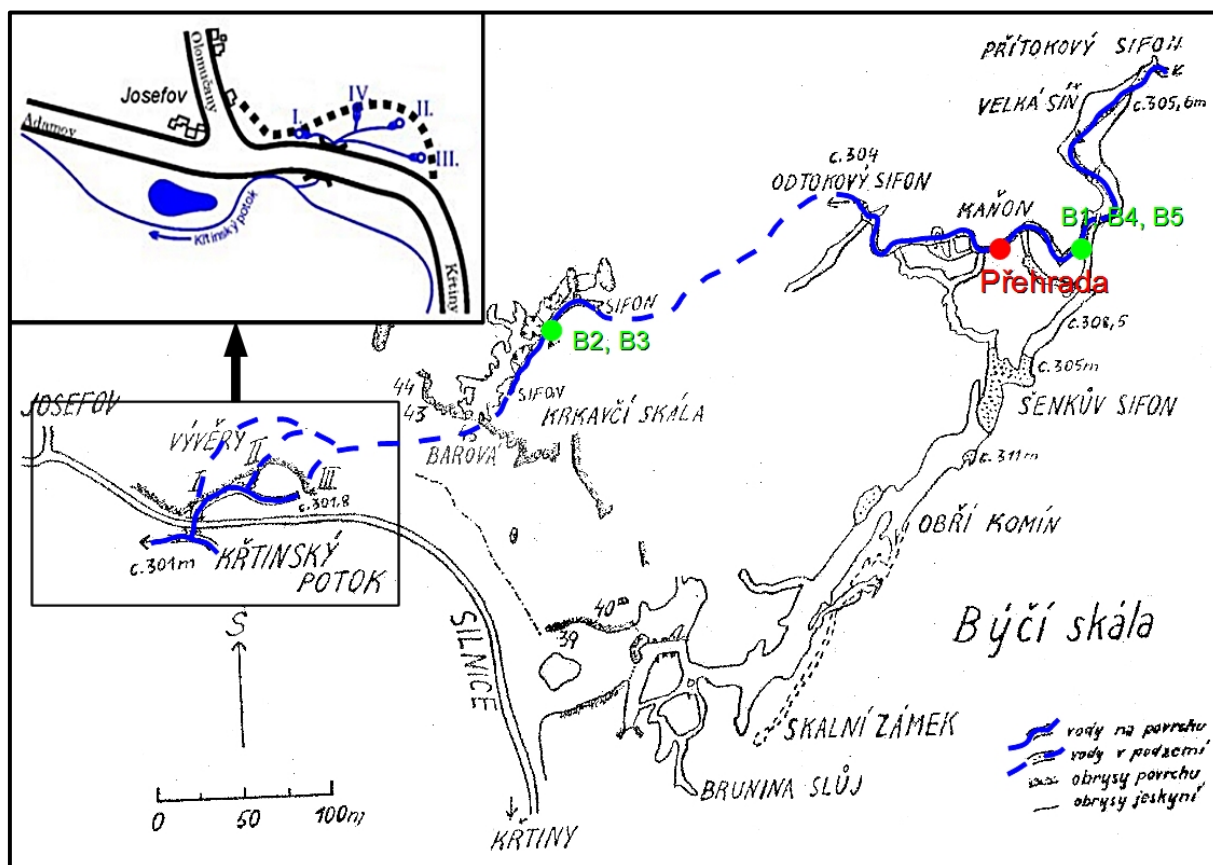
a z výsledků měření vyplývá, že se v době od 11 do 17 hodin průtok snížil přibližně z 300 na 250 l.s⁻¹. Těsně před injektáží bylo do propasti 9 umístěno tlakové čidlo LGR, které v intervalu 10 minut zaznamenávalo hladinu a teplotu vody (obr. 4.15b). Podle měření průtoků ve vývěru byly spočteny hodnoty průtoků během celé povodňové vlny. Vzorky na analýzu fluoresceinu byly odebírány manuálně 1x až 3x denně do 11.6., potom pouze 1x denně do 15.6., poté 1x za 2 až tři dny do 25.6. Průnikovou křivku fluoresceinu a průtok znázorňuje graf na obr.4.15a.



Obrázek 4.15 a) Průniková křivka fluoresceinu při stopovací zkoušce (K4) z propasti č. 9 ve Výpustku do vývěru Křtinského potoka v červnu 2010 a průtok spočtený ze záznamu hladiny čidlem. b) Záznam hladiny a teploty po injektáži fluoresceinu

Podobné vlastnosti mají parametry ze všech stopovacích zkoušek na Křtinském potoce. Rychlosti rostou s průtokem, přičemž v úseku od Otevřené skály k vývěru jsou mnohem vyšší a s rostoucím průtokem se více zvyšují než v celém systému (od ponoru E nebo z Výpustku). Odpovídají tomu objemy kanálů, které jsou v Otevřené skále nižší a při zvýšení průtoků se objem příliš nemění. To znamená, že jsou zatopené a pro zvýšení průtoků se může zvýšit pouze rychlost.

4.3.3. Jedovnický potok (Býčí skála)

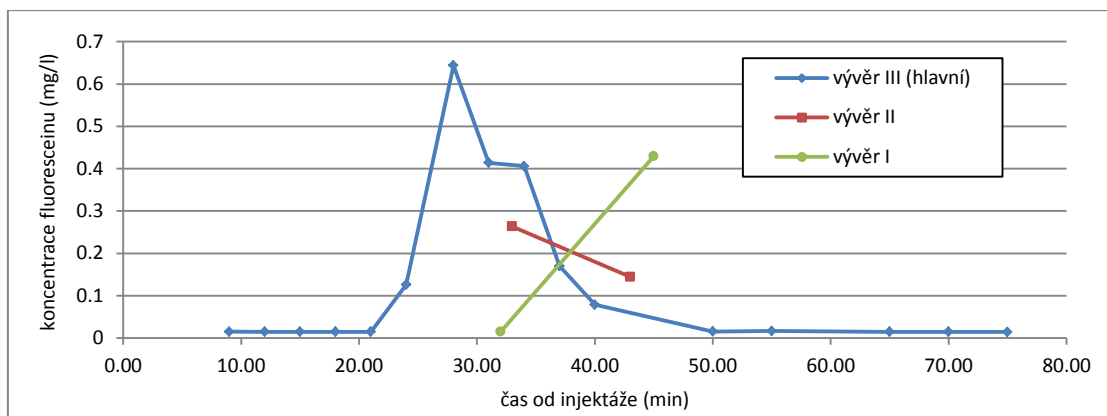


Obrázek 4.16 Mapa koncové oblasti Býčí skály s lokalizací vývěrů, míst injektáží stopovacích zkoušek a přehradu v Kaňonech. (podle Burkhardta 1953 a Knížka 2006)

Kaňony v Nové Býčí skále – Barová jeskyně – vývěry Jedovnického potoka

Na mapovacím kurzu v červnu 2010 byly v době velkých průtoků uskutečněny dvě stopovací zkoušky, první z Kaňonů v Býčí skále do vývěrů a druhá z Barové jeskyně do vývěrů. V obou případech byl použit fluorescein. Vzorky analyzovala Anita Gregorová v Ústavu analytické chemie Akademie věd v Brně.

B3: 4.6.2010 v 16:30 bylo injektováno 600 g fluoresceinu do toku Jedovnického potoka na začátku Kaňonů v Nové Býčí skále za vysokého vodního stavu po přivalových deštích na konci května a začátku června. Průtoky byly měřeny pouze ve vývěrech a pod vývěry. Přehled naměřených průtoků je uveden v tabulce 4.5. Ve vývěru IV nebylo možné měřit průtok ani koncentraci fluoresceinu, protože byl zaplavený vodou z vývěru II. Koncentrace fluoresceinu ve všech třech vývěrech dosáhla úrovně viditelné pouhým okem. Vzorky byly odebírány z hlavního vývěru (vývěr III) zpočátku po 3 minutách, po viditelném snížení koncentrace po 5 minutách. Ve vývěrech I a II byly odebrány pouze dva orientační vzorky.

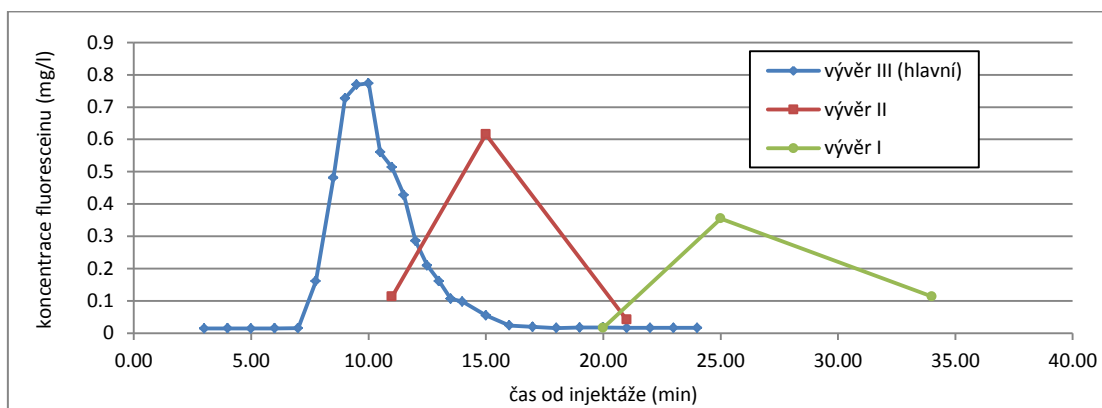


Obrázek 4.17 Koncentrace fluoresceinu při stopovací zkoušce 4.6.2010 z Kaňonů v Býčí skále do vývěřů Jedovnického potoka za vysokého vodního stavu (B3)

Tabulka 4.5 Průtoky naměřené v době stopovacích zkoušek 4. a 5.6.2010 (B3, B4)

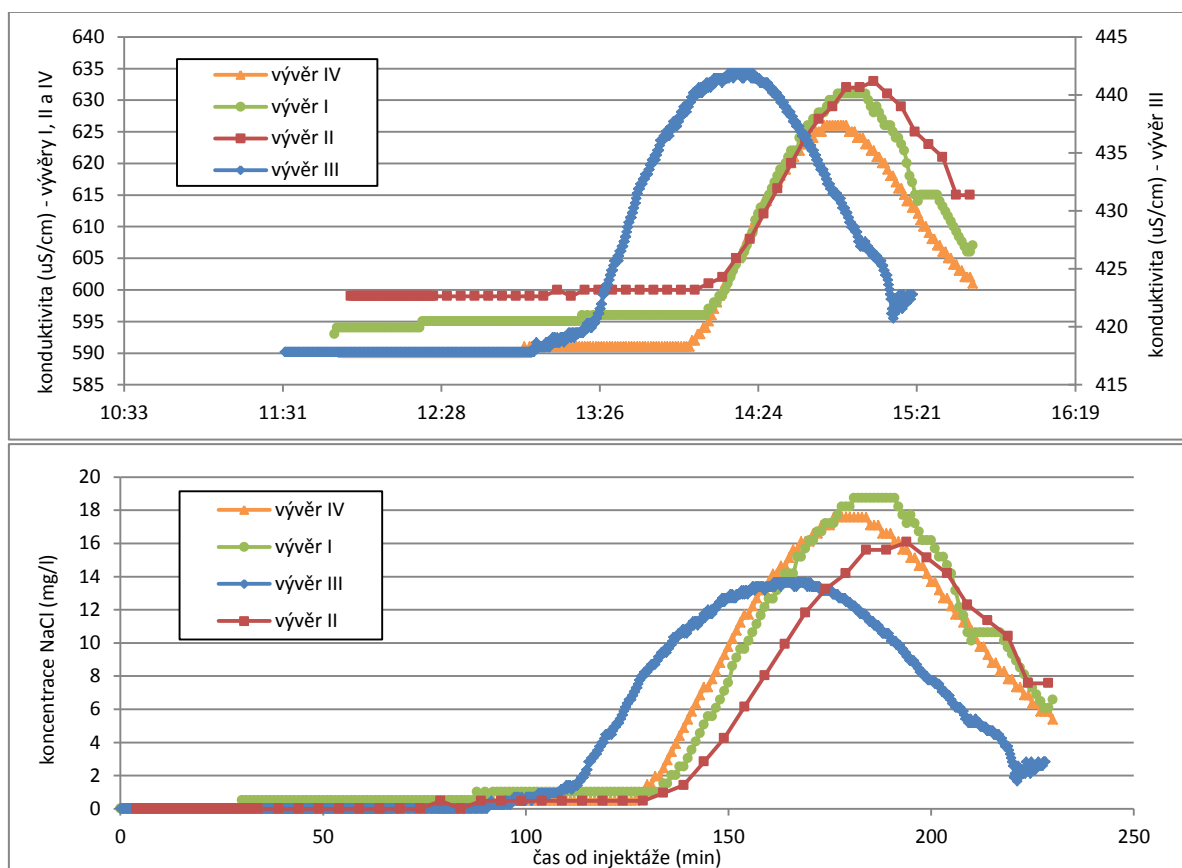
Místo	Datum	Průtok (l.s ⁻¹)
Vývěř I	4.6.2010	5
Vývěř II	4.6.2010	85
Vývěř III	4.6.2010	1481
Pod vývěř	4.6.2010	2536
Vývěř I	5.6.2010	5
Vývěř II	5.6.2010	83
Vývěř III	5.6.2010	1633

B4: 5.6.2010 ve 13:40 bylo za stejných podmínek jako při předchozí zkoušce dne 4.6. (B3) injektováno 400 fluoresceinu do toku v Barové jeskyni (obr. 4.16). Vzorky z vývěřů III byly odebírány po minutě, v době píku i častěji. Z vývěřů I a II byly odebrány z každého tři vzorky: před nástupem píku, přibližně v době maximální koncentrace a po odeznění. Průtoky se oproti předchozí stopovací zkoušce výrazně nezměnily, jsou uvedené v tabulce 4.5. Z obou zkoušek, B3 i B4, je vidět, že při vysokém průtoku stopovač dorazí nejrychleji do vývěř III, poté do vývěř II a nejpomaleji do vývěř I.



Obrázek 4.18 Koncentrace fluoresceinu při stopovací zkoušce dne 5.6.2010 z Barové jeskyně do vývěřů Jedovnického portoka za vysokého vodního stavu (B4)

B5: 6.6.2011 byla provedena další stopovací zkouška z Barové jeskyně do vývěřů. V jeskyni bylo do toku Jedovnického potoka injektováno po dobu 3,5 minuty 5 kg rozpuštěného NaCl. Do všech čtyř vývěřů byly umístěny konduktometry a konduktometrické čidlo Solinst. Na hlavním vývěru byla konduktivita automaticky zaznamenávána po 15 sekundách, na ostatních vývěrech po 1 minutě. Průběh průnikových křivek konduktivity a koncentrace NaCl jsou na obr. 4.19. Průtok ve Velké síni v Býčí skále byl naměřen mezi 65 a 75 l.s⁻¹. V hlavním vývěru byl naměřen průtok 63 l.s⁻¹, ve vývěru I 3,5 l.s⁻¹ a ve vývěrech II a IV 3 l.s⁻¹. V hlavním vývěru se stopovač objevil nejdříve, 90 minut po injektáži. Potom téměř současně ve vývěrech IV, II a I v čase od 125 do 131 minut a dosáhl zde vyšší koncentrace než ve vývěru III. Do vývěru III voda proudí kanály o mnohem větším objemu a průměrném průřezu, je zde vyšší podélná disperzivita a nižší Pecletovo číslo. Malé rozdíly jsou ve střední době zdržení a střední rychlosti proudění.



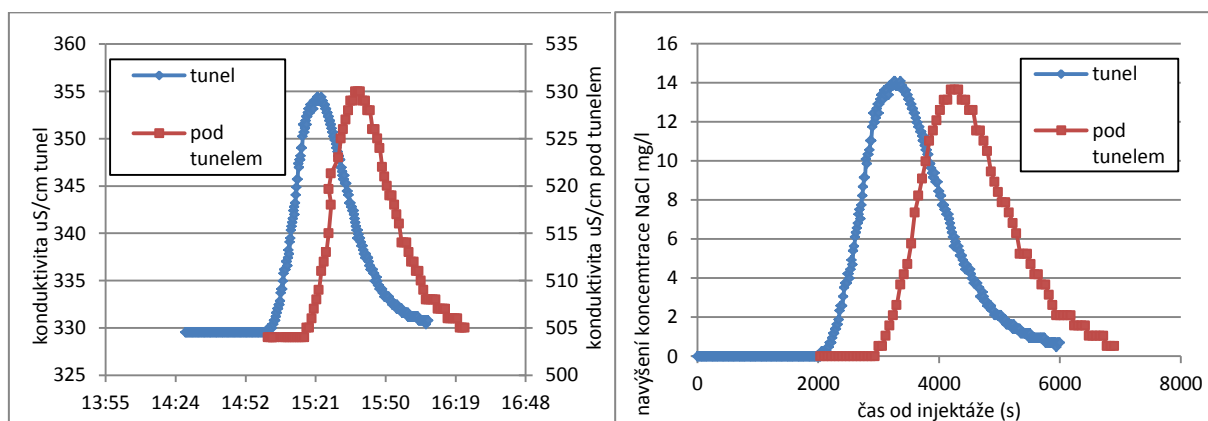
Obrázek 4.19 Průnikové křivky konduktivity a koncentrace NaCl ve vývěrech Jedovnického potoka při stopovací zkoušce z Barové jeskyně dne 6.6.2011 (B4).

Při porovnání nových stopovacích zkoušek se zkouškami z roku 2005 (Knížek 2006) je na první pohled nejvíce patrná změna funkce jednotlivých vývěřů. V roce 2005 byla vydatnost vývěřů II a III téměř stejná, a to 37 a 39 l.s⁻¹. Za podobně nízkého stavu v roce 2011 protékalo hlavním vývěrem III 63 l.s⁻¹ a v ostatních vývěrech se průtok pohyboval okolo 3 l.s⁻¹. Změnu průtokových poměrů potvrzují průnikové křivky (obr. 4.5 a 4.19) – v roce 2005 stopovač z Kaňonů do vývěru III dorazil o hodinu později, při stopovací zkoušce B3 za vysokého stavu v roce 2010 o několik minut dříve a při zkoušce v roce 2011 z Barové jeskyně přibližně od 30 minut dříve. Zkoušky v letech 2005, 2010 a 2011 byly provedeny z různých míst, nelze proto srovnat všechny parametry.

4.3.4. Povodí Punkvy

Malé propadání Punkvy – tunel

P4: Dne 6.6.2011 byla na mapovacím kurzu zopakována stopovací zkouška z Malého propadání Punkvy do ústí krasového kanálu do tunelu Punkevních jeskyní a též 15 m pod spodním ústím odvodňovacího tunelu Punkevních jeskyní. Bylo opět použito 5 kg NaCl. Do ústí krasového kanálu do tunelu bylo umístěno čidlo Solinst měřící konduktivitu v intervalu 25 s. 30 metrů pod ústím tunelu byl umístěn přístroj pH/Cond 340i nastavený na automatické zaznamenávání konduktivity v intervalu 1 minuty. Oproti očekávání byly naměřeny podobné hodnoty průtoku venku pod ústím tunelu jako při zkoušce v roce 2009, tentokrát ale většina vody přitékala od Malého propadání. Tunelem od Punkevních jeskyní proudilo zanedbatelné množství vody. Nad Malým propadáním bylo hydrologickým křídlem naměřeno $227 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a chemickou metodou $213 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Záznam konduktivity a průnikové křivky NaCl jsou na obr. 4.20.



Obrázek 4.20 Průběhy konduktivit naměřených při stopovací zkoušce z Malého propadání Punkvy do ústí krasového kanálu do tunelu odvádějícího vodu z Punkevních jeskyní a 30 metrů pod spodním ústím odvodňovacího tunelu. Na druhém grafu jsou znázorněny průnikové křivky NaCl získané z měření konduktivit (P4).

Stopovací zkoušky z Malého propadání Punkvy na konec krasového kanálu ústícího do tunelu a ven z tunelu byly prováděny za naprosto odlišných vodních stavů, na výsledcích můžeme vidět důkazy. Při obou zkouškách byl na výtoku z tunelu podobný průtok. Při první zkoušce přibližně polovina toku přitékala tunelem od Punkevních jeskyní a polovina Malým propadáním. V druhém případě tunelem přitékalo minimum vody a vše přitékalo z Propadání. Podle výsledků v krasovém kanálu zůstává v_p přibližně stejná, zdvojnásobil se objem kanálu a průměrná plocha průtočného profilu. Rychlost proudění tunelem je oproti krasovému kanálu mnohem vyšší, v obou případech byly podobné průtoky i rychlosti, rostoucí trend se nedá spolehlivě určit. Ve všech případech je disperzivita velmi nízká a když se neměnila rychlost, neměnila se ani disperzivita. Pe má mnohem větší hodnoty u výtoku z tunelu, znamená to, že v tunelu se výrazně zvyšuje zastoupení advekce na transportu stopovače.

4.4. SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ STOPOVACÍCH ZKOUŠEK PROVEDENÝCH ZA RŮZNÝCH VODNÍCH STAVŮ

Celkem jsem pro srovnání vybrala 58 stopovacích zkoušek na 19 lokalitách v Moravském krasu. Z toho jsem 33 zkoušek vyhodnotila v programu Qtracer, takže známe všechny potřebné parametry, u ostatních byla použita dostupná data publikovaná v článkách. Přehled a podrobnosti stopovacích zkoušek jsou uvedeny v tab. 4.4. Potřebné hodnoty ke srovnání byly především průtok během stopovací zkoušky a čas prvního objevení nebo maximální rychlost stopovače. Můžeme tak do grafu vynést závislost rychlosti proudění na průtoku. Další srovnatelné parametry jsou koncentrace, podélná disperzita a Pecletovo číslo. Jejich hodnoty ale nejsou dostupné pro všechny stopovací zkoušky.

4.4.1. Rychlost proudění

Závislost rychlosti na průtoku můžeme srovnat s prací Moralese et al (2007), který zkoumal závislost rychlosti píku (v_p) na průtoku. Pro část zkoušek v_p není k dispozici, ale mezi v_p a maximální rychlostí (v_L) z vyhodnocených zkoušek existuje těsná lineární závislost (obr. 3.21), podle které proto můžeme tyto hodnoty dopočítat a vytvořit stejnou závislost průtoku na v_p a výsledky srovnat. Výjimkou jsou dvě stopovací zkoušky z Býčí skály provedené za extrémně vysokých průtoků, považovala jsem je tedy za odlehle hodnoty. Morales et al. (2007) také v článku uvádí závislost času prvního objevení a času píku:

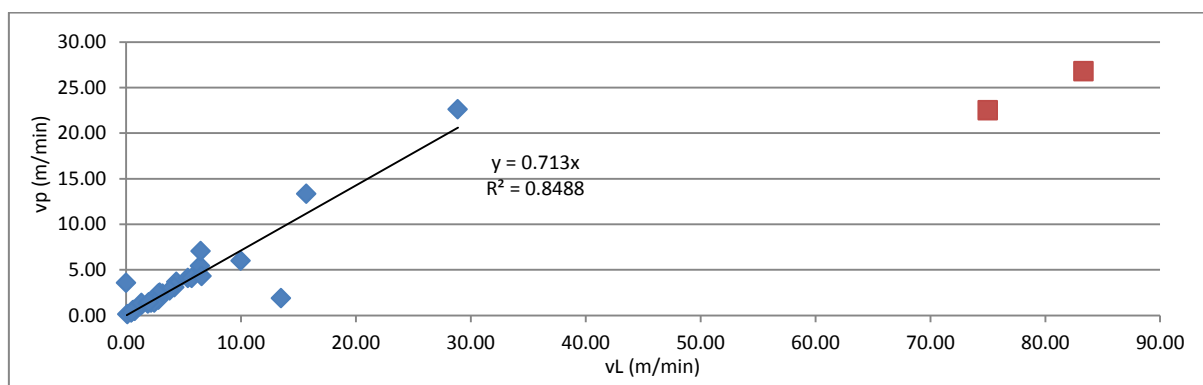
$$T_L = 0,8066 * T_p, \quad (4.1)$$

s koeficientem $R^2=0,990$.

Ze 33 zkoušek v Moravském krasu vyplývá velmi podobná závislost

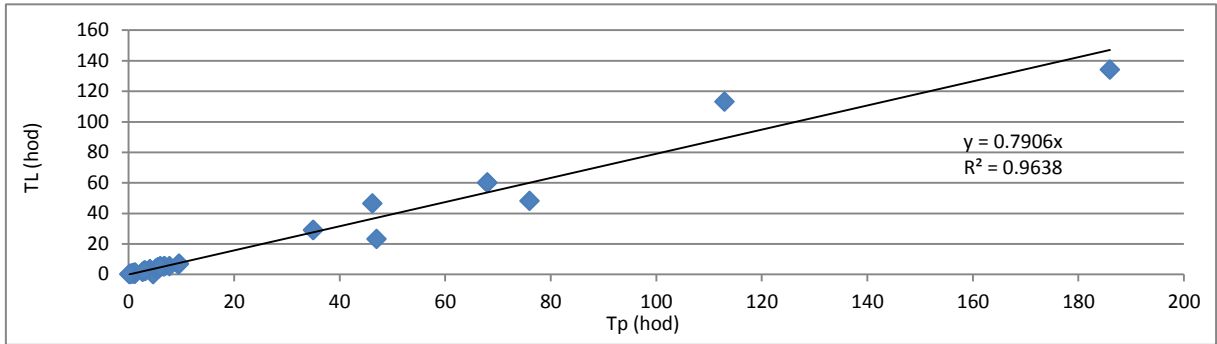
$$T_L = 0,7906 * T_p, \quad (4.2)$$

s koeficientem $R^2=0,9638$ (viz obr. 4.22a). Jobson (1996), který stejnou závislost sledoval v povrchových tocích, uvádí směrnici 0,89 (obr. 4.22c). V krasových kanálech je tedy mezi T_p a T_L větší rozdíl, dochází tedy k větší disperzi.

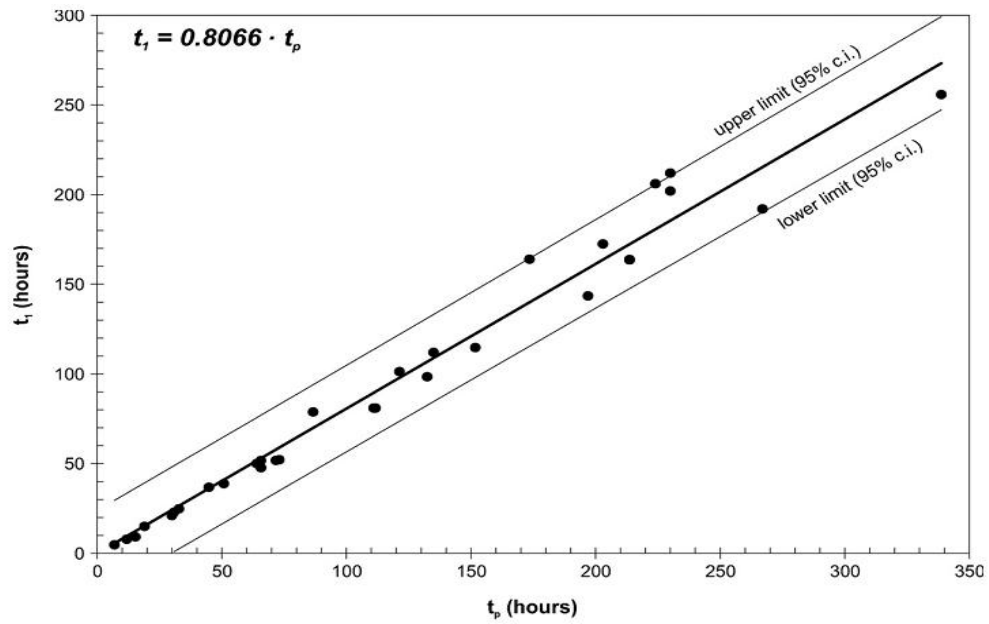


Obrázek 4.21 Závislost maximální rychlosti (v_L) na rychlosti píku (v_p) pro stopovací zkoušky v Moravském krasu. Dvě odlehle hodnoty jsou stopovací zkoušky z Býčí skály za velmi vysokých stavů.

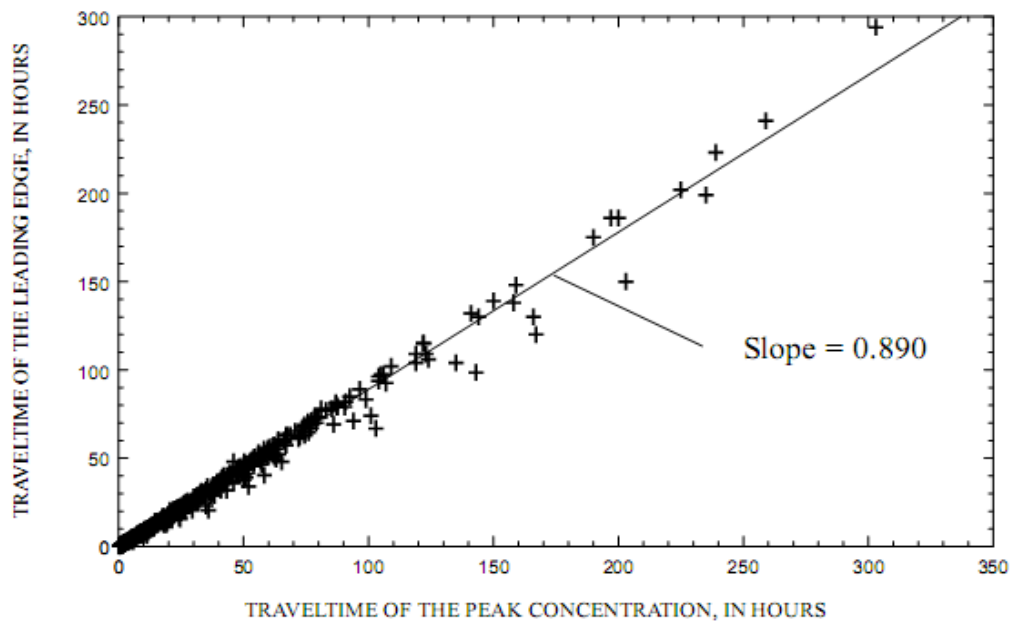
a)



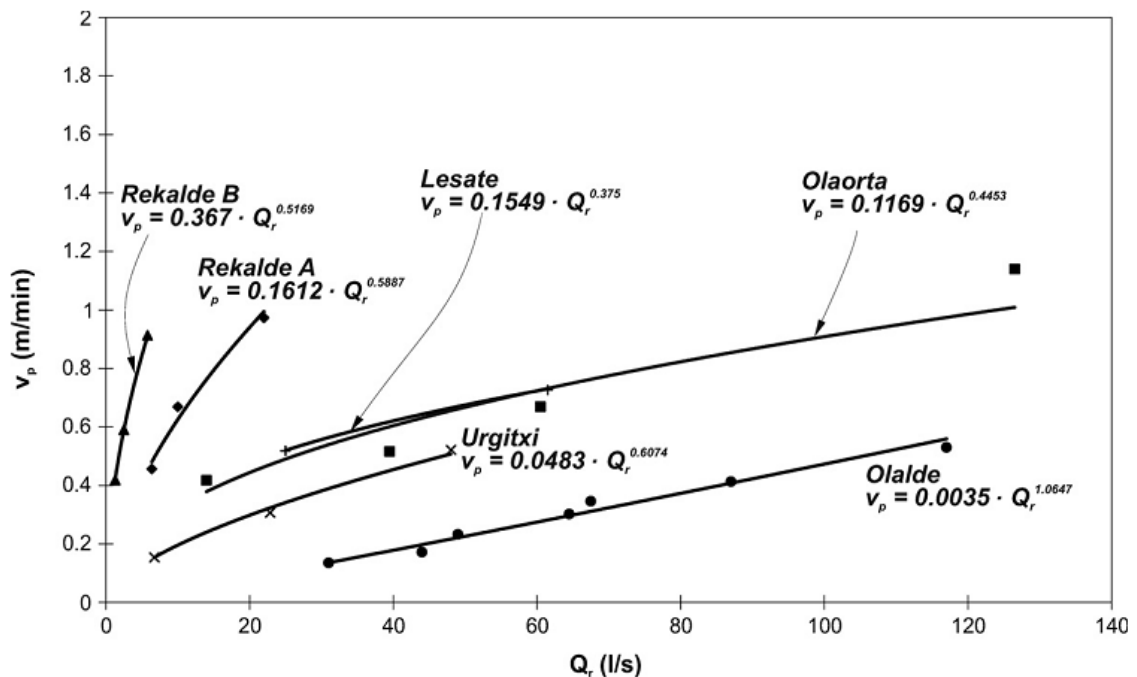
b)



c)



Obrázek 4.22 Závislost času maximální koncentrace na čase prvního objevení a) získaná ze stopovacích zkoušek v Moravském krasu, b) podle Moralese et al. (2007) c) v povrchových tocích (Jobson 1996)



Obrázek 4.23: Závislost rychlosti píku v_p na průtoku odpovídajícímu těžišti píku Q_r (Morales et al. 2007)

Rychlost proudění se s průtokem může výrazně měnit. Při dostatečném množství zkoušek v jednom systému je možné tyto závislosti zjistit. Morales et al. (2007) uvádí stopovací zkoušky, kdy průtok ve většině případů nepřesahuje $100 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a rychlost píku $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Na rozdíl od toho v Moravském krasu i v české křídové pánvi byly provedeny zkoušky i v místech, kde se průtoky pohybují okolo $200 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a v Lopači a na Jedovnickém potoce přesahují $1000 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlosti podle píku (v_p) i při nižších průtocích přesahují $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a to zejména v České křídové pánvi. Na většině profilů byly provedeny pouze dvě nebo tři stopovací zkoušky, není proto možné spolehlivě závislost určit. Nicméně ve většině případů rychlost stopovače roste s rostoucím průtokem. Se změnou průtoku na místě sledování se téměř nemění (příp. mírně klesá) rychlost proudění v případě stopovacích zkoušek z Hostěnického propadání I do jeskyně Netopýrky a do vývěru říčky I a také z Hádeckých ponorů I a II do vývěrů říčky I. Důvodem je, že:

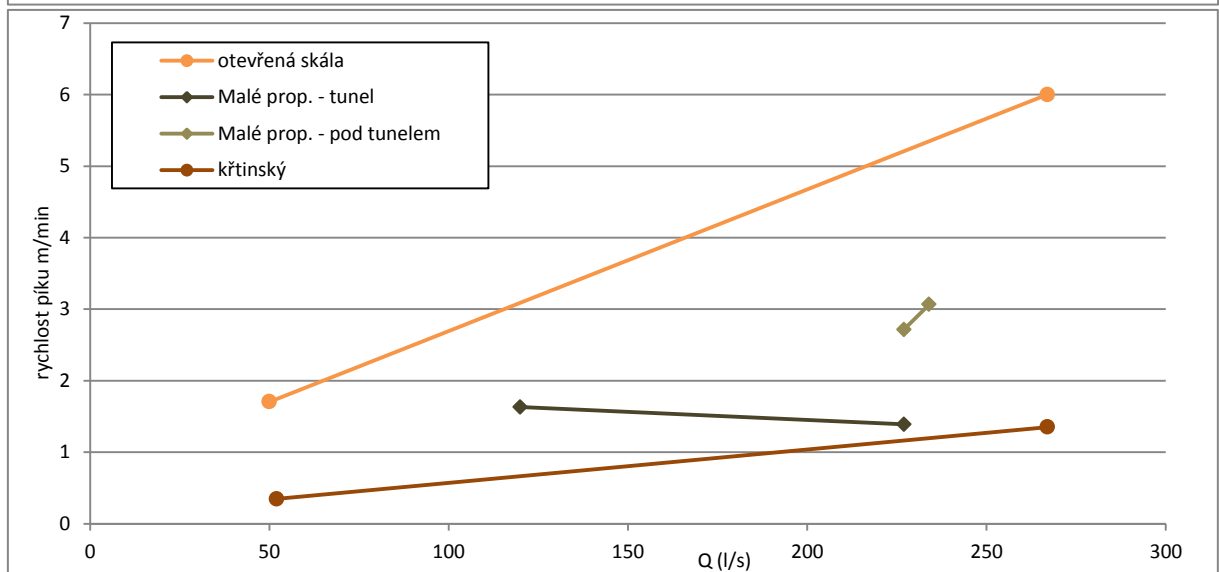
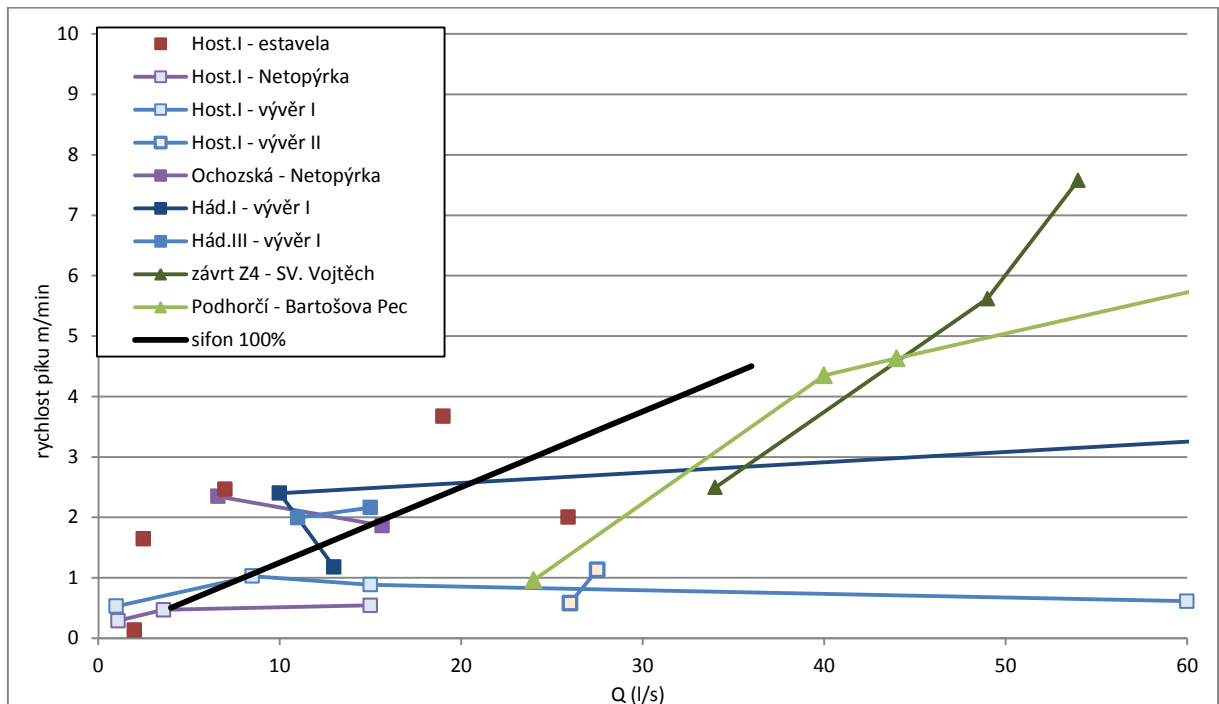
- vývěr Říčky I je přepadový pramen, který za nejnižších vodních stavů úplně vysychá (Himmel 1990), voda z krasového kanálu proudí do stálého pramene Říčka II a v menším množství i do náplavů Říčky. Kolísání průtoku krasového kanálu je tedy daleko nižší, než kolísání průtoku vlastního pramene Říčka I.
- rychlosti proudění mezi Hostěnickými a Hádeckými ponory a Netopýrkou i vývěry Říčky jsou ovlivněny jak stavy na Hostěnickém potoce, tak na Říčce, které se mohou od sebe lišit. Určitý stav průtoku na jednom z objektů tak může odpovídat různým stavům celého systému.
- v čase se výrazně mění hltnost jednotlivých ponorů a tedy i průtoky a rychlosti v jeskynním systému.

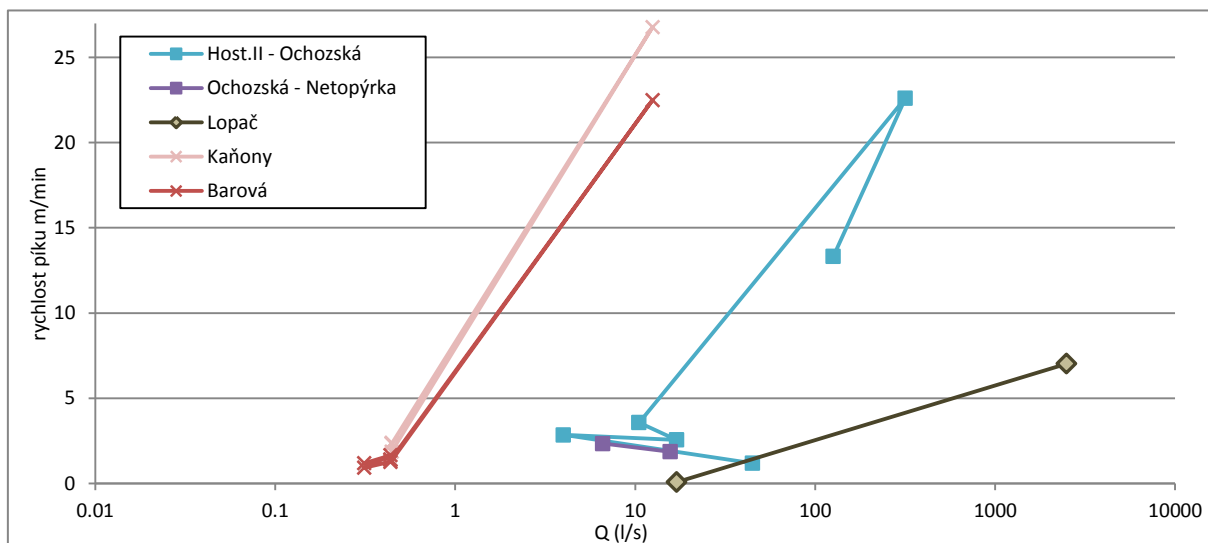
Krasové kanály, kde nedochází během času ke změně objemu kanálu transportem sedimentů, by měly ležet mezi dvěma koncovými členy:

- 1) Freatickým, tj. plně zaplaveným kanálem neboli sifonem. Objem takového kanálu se nemůže měnit s průtokem. Mění se pouze rychlost proudění, která lineárně roste s průtokem (viz obr. 4.24; sklon směrnice může být různý).

- 2) Kanálem, kterým protéká tok s volnou hladinou (bez sifonů ani za nejvyšších vodních stavů). Takový kanál je v podstatě totožný s charakterem povrchového toku. Objem takového kanálu s průtokem roste, proto vztah rychlosti a průtoku není lineární (Goldscheider et al. 2008).

Ze srovnání s reálnými stopovacími zkouškami je zřejmé, že freatickému kanálu mohou odpovídat stopovací zkoušky z Otevřené skály do vývěru Křtinského potoka, stopovací zkoušky mezi Výpustkem a vývěrem Křtinského potoka, stopovací zkoušky na Jedovnickém potoce. Pro potvrzení je ale třeba provést další stopovací zkoušky pro potvrzení lineárního trendu mezi rychlostí proudění a průtokem. Ostatní stopovací zkoušky naznačují přítomnost alespoň části úseků typu 2. Na Jedovnickém potoce a v úseku Otevřené skály a vývěru sifonový charakter potvrzuje i to, že se u jednotlivých zkoušek téměř nemění průměrná plocha průtočného profilu (obr. 4.26). U ostatních se plocha s rostoucím průtokem zvyšuje.

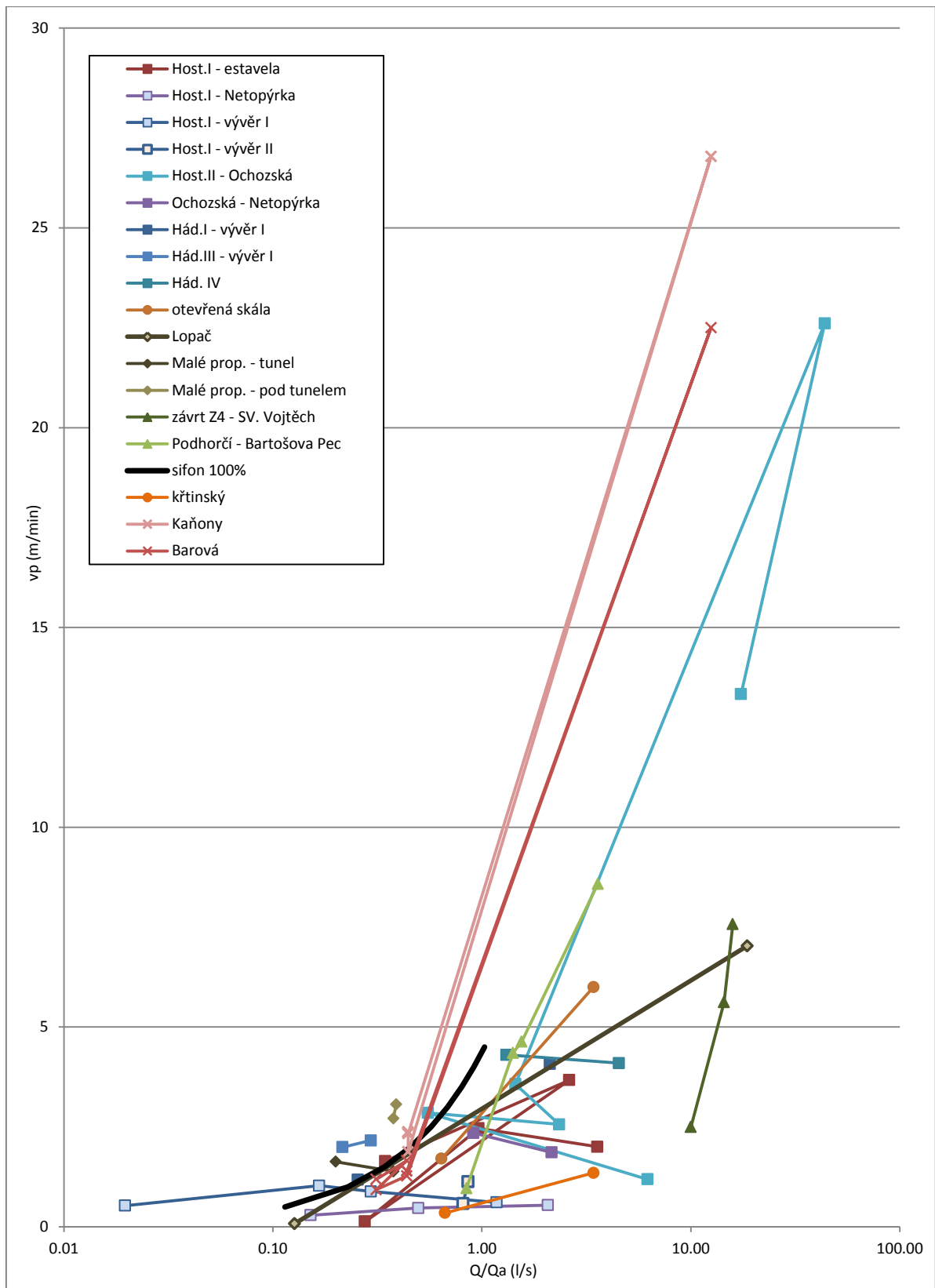




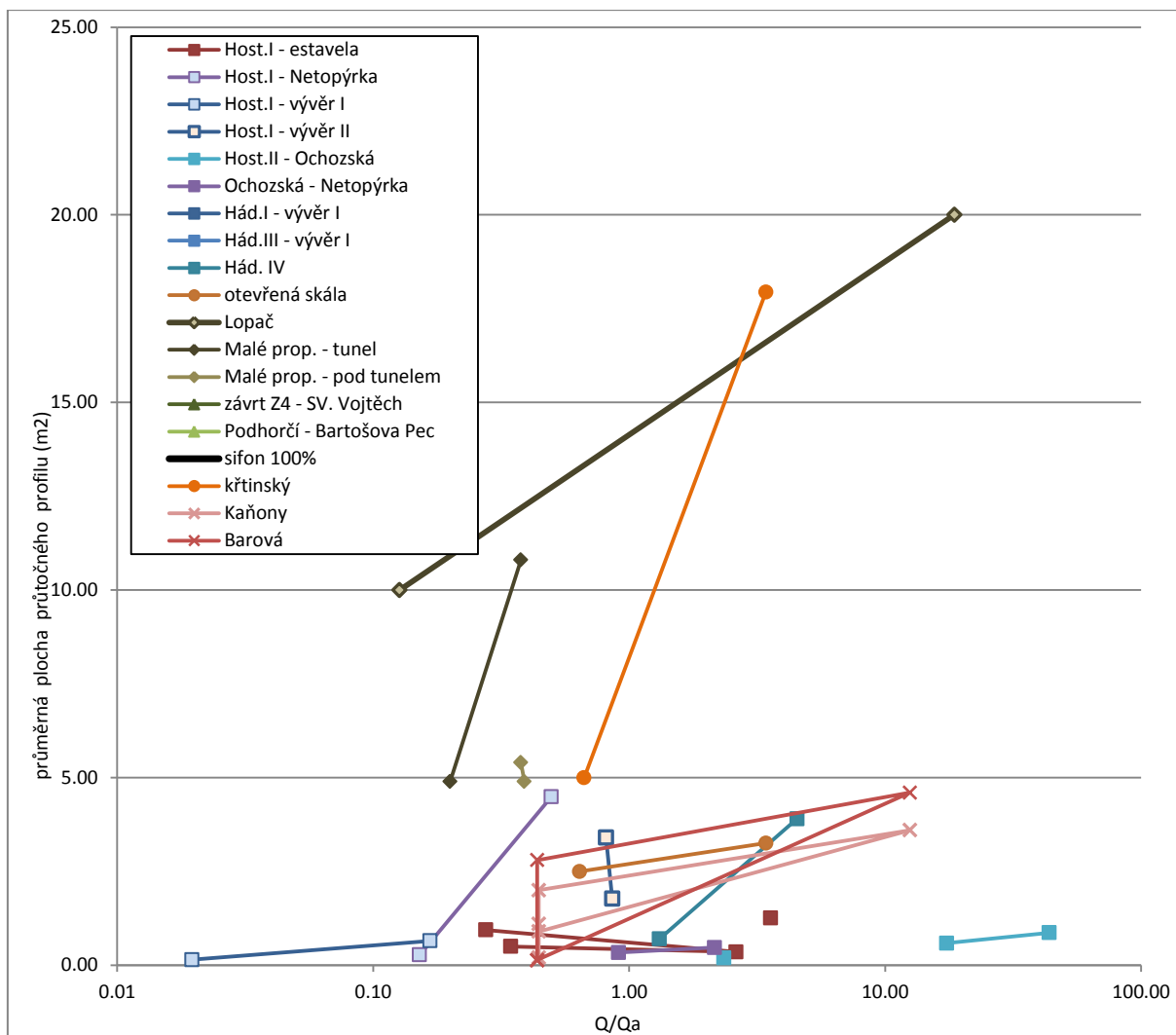
Obrázek 4.24 Závislost v_p na průtoku ze srovnávaných stopovacích zkoušek v Česku.

Aby bylo možno vzájemně srovnat stopovací zkoušky z různých krasových kanálů v ČR, které mají často velmi odlišné průtoky, byl průtok při stopovací zkoušce normalizován průměrným průtokem z tabulky 2.1 (obr. 4.25 a 4.26).

Z obr. 4.25 je zřejmé, že nejnižší rychlosti proudění se vyskytují v krasových kanálech mezi Hostěnickým propadáním I a vývěry Říčky a mezi jeskyní Výpustek a vývěrem Křtinského potoka (pod $1,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Jak Hádecké ponory, tak ponory Křtinského potoka jsou již za vyšších průtoků plně zaplavené a nadbytečná voda pokračuje povrchovým korytem. Maximální rychlosti z Hádeckých propadání k vývěrům Říčky tedy ani za nejvyšších vodních stavů nepřesahují 6 až $7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (Knížek 2006) a rychlost proudění v kanálech nedovoluje transport hrubší frakce. To je důvod, proč v obou údolích nevznikla poloslepá údolí. Podobně rychlost v krasovém kanálu nad Malým propadáním nepřesahuje ani za povodní $6,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Naopak v případě Hostěnického potoka v Ochozské jeskyni, kde je vyvinuto poloslepé údolí, je rychlost proudění při povodňových stavech přes $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a za extrémních povodní lze očekávat rychlost ještě několikrát vyšší.



Obrázek 4.25 Závislost v_p na normalizovaném průtoku. Na horizontální ose je průtok při stopovací zkoušce vydělený průměrným průtokem. Hodnota průtoku 1 tedy značí průměrný průtok, který se ovšem vyskytuje méně než 50% času.



Obrázek 4.26 Závislost průměrné plochy průtočného profilu ze stopovacích zkoušek v Moravském krasu na průtoku normalizovaném dlouhodobým průtočným profilem.

4.4.2. Koncentrace, disperze

Koncentrace stopovače na místě sledování závisí na množství injektovaného stopovače, jeho ztrátách, průtoku a podélné disperzivitě (Hubbard et al. 1982). Parametr používaný pro srovnávání stopovacích zkoušek je jednotková maximální koncentrace (Hubbard et al. 1982, Jobson 1996, Morales et al. 2007). Maximální koncentrace je přímo úměrná množství injektovaného stopovače a nepřímo úměrná průtoku. Nejedná se ale o jednoduchou nepřímo úměru. Pokud se průtok zdvojnásobí, sníží se koncentrace díky většímu zředění, ale protože se stopovač šíří rychleji, má méně času na disperzi. Při nižších průtocích se také objevuje víc míst, kde voda stagnuje, podélná disperzivita se díky tomu zvyšuje. Až na výjimky to potvrzují i výsledky stopovacích zkoušek v Moravském krasu (obr. 4.29). Stejnou závislost ukazuje graf na obr. 4.30, který znázorňuje závislost průtoku na Pecletově čísle. Pe se s rostoucím průtokem zvyšuje, to znamená, že relativní podíl disperze na transportu se snižuje a vliv advekce roste.

Naměřené koncentrace mohou být normalizovány podle množství injektovaného stopovače a jeho ztráty během zkoušky a průtoku na tzv. jednotkovou koncentraci (C_u - unit concentration). Tato

veličina je definována jako 10^6 krát koncentrace v průtoku 1 litr za jednotku času na jeden mg.l^{-1} navráceného stopovače. Může být vyjádřena rovnicí:

$$C_u = 1 \times 10^6 \times \frac{C}{R_r} \times \frac{Q}{M_i} = 1 \times 10^6 \times \frac{C}{M_r} \times Q, \quad (4.3)$$

kde C je koncentrace stopovače, R_r návratnost stopovače, Q průtok, M_i hmotnost injektovaného stopovače a M_r hmotnost navráceného stopovače. Jednotky C_u mají rozměr převráceného času (s^{-1}). Číslo 10^6 je tam použito pro lepší čitelnost (Jobson 1996).

Vývoj jednotkové maximální koncentrace v čase popisuje efektivitu procesu mísení (Morales et al. 2007). Proložením přímkou naměřenými daty získáme rovnici ve tvaru

$$C_{up} = \alpha t_p^{-\beta} \quad (4.4)$$

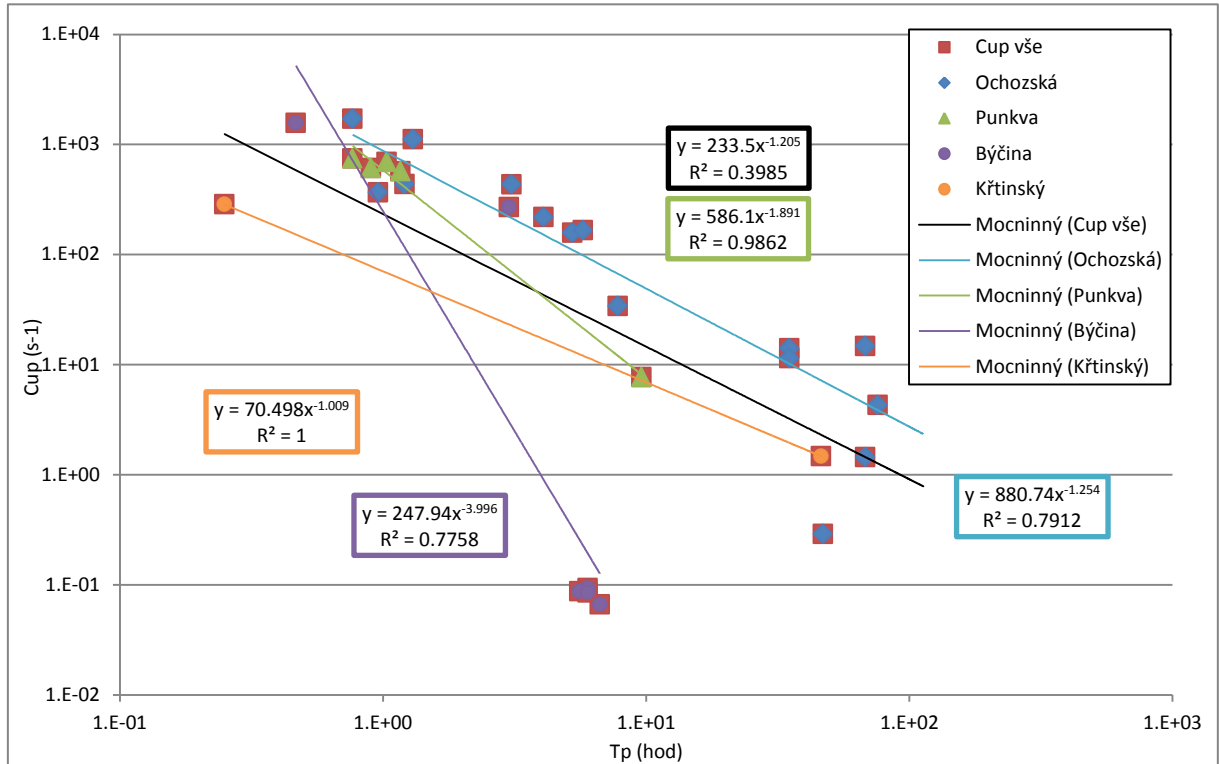
Koeficienty α a β získáme z regresní křivky. Koeficient β popisuje snížení C_{up} v čase. Hodnota β v ideálním případě dosahuje hodnot 1,5 pro krátký čas a vzdálenost stopovací zkoušky, kdy ještě nedojde k úplnému promíchání (na obr. 3.5 znázorněný úsek I), k mísení dochází nejen podélně, ale ve všech třech rozměrech, křivka má proto větší sklon (Hubbard et al 1982, Morales et al 2007). Pro dlouhý čas T_p se v ideálním případě hodnota β sníží na 0,5 a transport je řízen pouze podélnou disperzivitou. Ve skutečnosti ale existují další procesy ovlivňující mísení, a to především nepravidelnost koryta, přítomnost zákrutů a stagnujících zátočin (Morales et al. 2007). Hodnota podélné disperze v přírodním toku může přesahovat 150% hodnoty naměřené v odpovídajícím pravidelném kanálu (Kashefipour a Falconer 2002). Reálná hodnota β se tedy pohybuje nejnižší mezi 0,7 a 0,9 (Morales et al. 2007, Jobson 1996).

Protože v rovnici 4.3 není zahrnuta podélná disperzivita, mohou se v grafech projevit její změny, především pokud byly zkoušky prováděny na různých místech a při různých průtocích. Hubbard et al. (1982) proto uvádí různé křivky pro jednotlivé vodní stavy (obr. 4.28). Na rozdíl od ostatních autorů neprováděl stopovací zkoušky na více různých místech, ale pouze na jedné řece, kdy při různých průtocích měřil průnikové křivky stopovače na několika různě vzdálených profilech. Je proto otázkou, do jaké míry jsou jeho data srovnatelná s daty obsahujícími více sledovaných profilů.

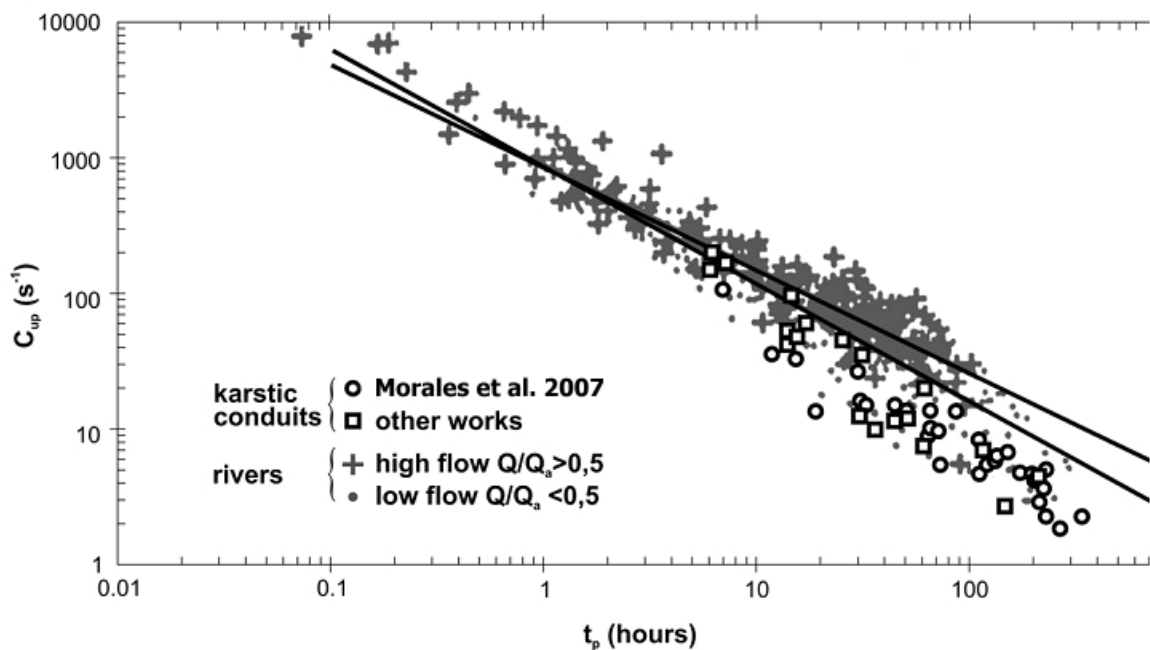
Pokusila jsem se porovnat výsledky výše zmíněných autorů se stopovacími zkouškami z Moravského krasu (obr. 4.27). Cup nevykazuje podobně těsnou závislost pro všechny zkoušky, ani po rozdělení podle Q/Q_a se nedá zjistit lepší závislost. Vyšší korelace jsem dosáhla až po rozdělení stopovacích zkoušek podle lokalit. I přesto nejsou závislosti ideální, například v případě Křtinského potoka. Zkoušky zde byly prováděny za velmi různých stavů a během několika let, a za tu dobu se prokazatelně změnil poměry průtoků v jednotlivých vývěrech Jedovnického potoka (viz kapitola 4.3.3.). V Ochozské jeskyni, přestože se jedná o zkoušky na různých místech s odlišnými vlastnostmi (viz kapitola 4.3.1) je korelace relativně vysoká. Ke Křtinskému potoku jsou k dispozici pouze dvě hodnoty, křivku proto není možné interpretovat. V případě Punkvy má většina stopovacích zkoušek podobný T_p , korelaci je podle mého názoru stále možné považovat za dobrou.

Jak již bylo zmíněno výše, čím větší je sklon křivky, tím méně dochází k procesu podélné disperze. Odpovídá to přímým výsledkům stopovacích zkoušek, kde Býčí skála i Punkva patří k lokalitám s nejnižší podélnou disperzivitou (obr. 4.29).

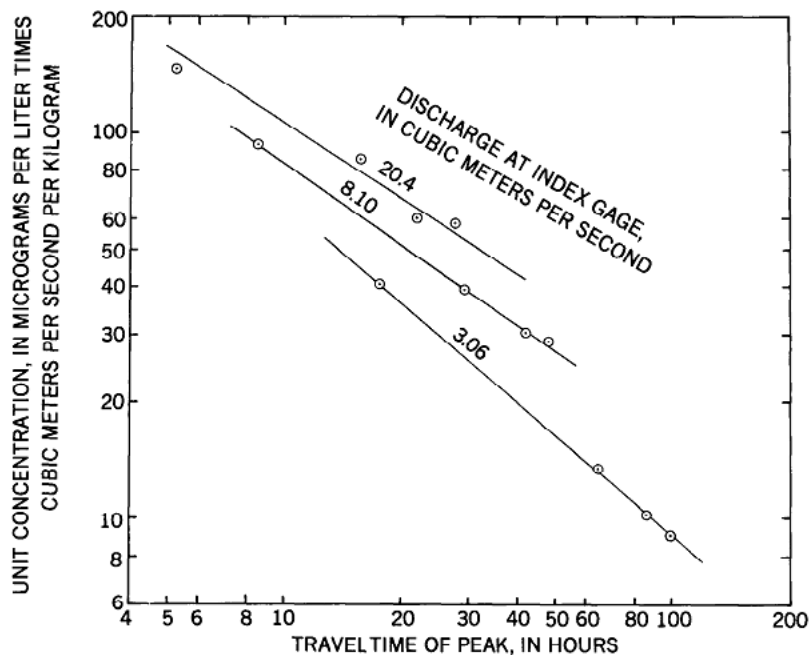
a)



b)



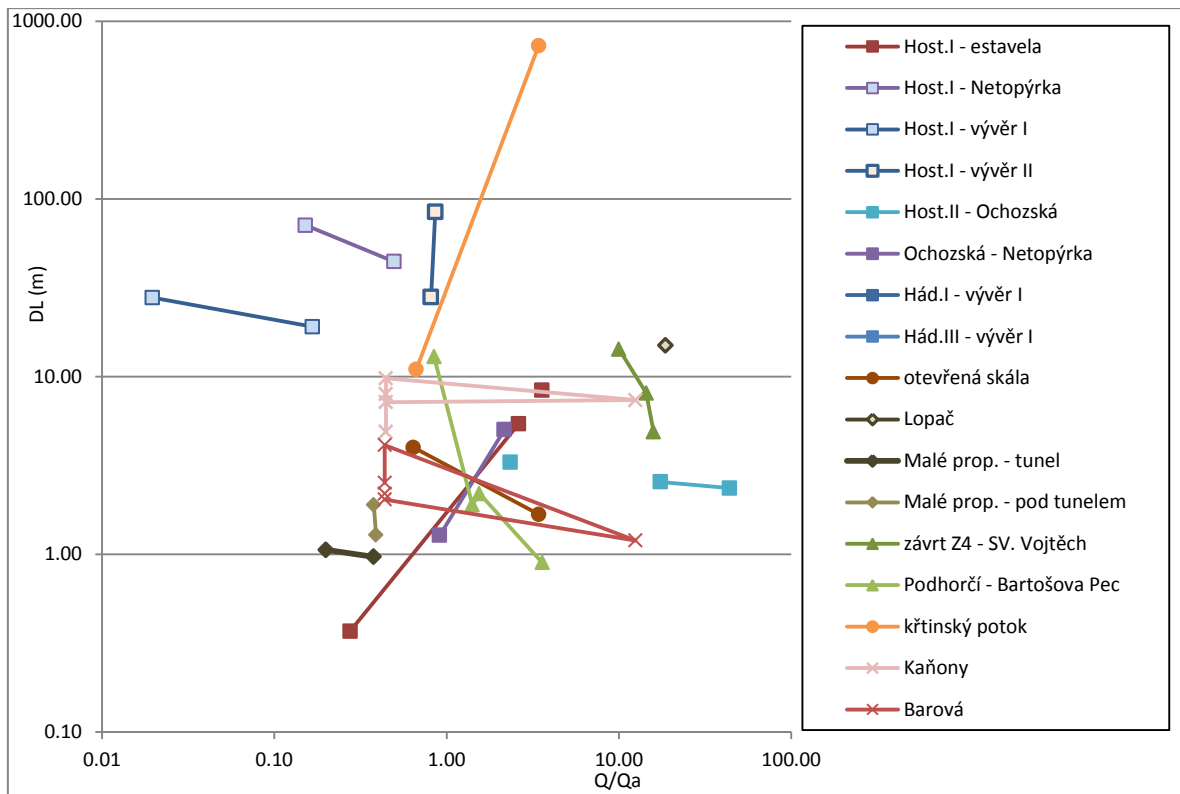
Obrázek 4.27 Závislost C_{up} na čase píku a) ze stopovacích zkoušek v Moravském krasu a české křídové pánvi, b) porovnání dat ze zkoušek provedených v Pyrenejích (Freixes et al. 1997), v Belgii (Meus a Balakowicz 1997) a v Severní Americe (EPA 1988) v porovnání se zkouškami v Pyrenejích (Morales et al. 2007) a v povrchových tocích (Jobson et al. 1996; převzato z Moralese et al. 2007).



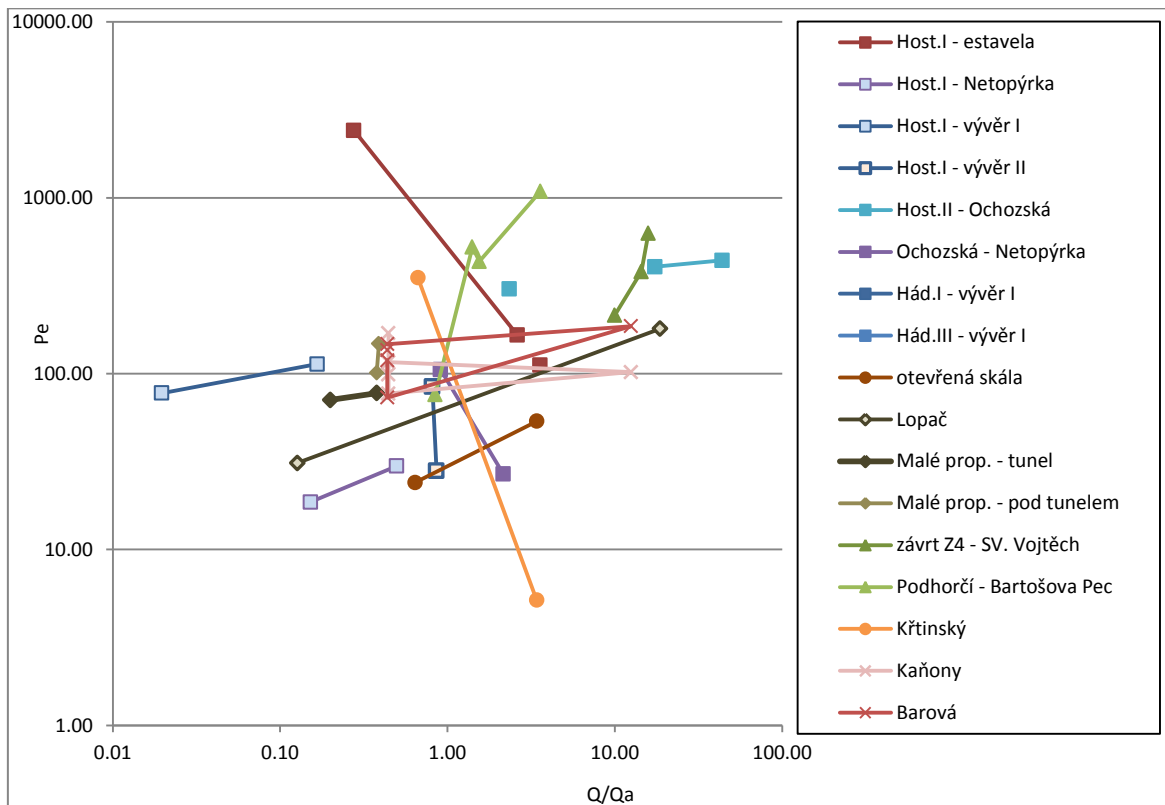
Obrázek 4.28 Snižování maximální jednotkové koncentrace v závislosti na čase píku (Hubbard et al. 1982)

Podélná disperzivita s průtokem klesá (obr. 4.29). Většina stopovacích zkoušek vykazuje disperzivitu nižší než 5 m. Daleko vyšší hodnoty disperzivity vykazují stopovací zkoušky z Hostěnického propadání do Netopýrky i do vývěřů Říčky I a Říčky II (až 85 m). Je pravděpodobné, že vyšší hodnoty disperzivity, zejména disperzivita nad 10 či 20 m, jsou zdánlivé hodnoty způsobené prouděním vody dvěma a více cestami (kanály) s různou dobou zdržení a nikoli skutečné hodnoty disperzivity v jediném krasovém kanálu. Nad vývěry Říčky lze očekávat existenci paralelních krasových kanálů. V případě stopovacích zkoušek v české křídové pánvi bude při nízkých průtocích nezanedbatelná část stopovače pomalu proudit v písčitém dně koryta což výrazně zvýší disperzivitu.

Pecletovo číslo má opačnou závislost na průtoku než disperzivita. Dokazuje to naprostá většina zkoušek. Tam kde je nízká disperzivita, je Pe vysoké a naopak (obr. 4.30).



Obrázek 4.29: Závislost podélné disperzivity na průtoku (normalizovaný dlouhodobým průměrným průtokem).



Obrázek 4.30: Závislost Pe na průtoku (normalizovaný dlouhodobým průměrným průtokem).

5. TEPLOTA A ŠÍŘENÍ HYDRAULICKÉHO RÁZU

Kromě stopovacích zkoušek je ke zjištění vlastností krasových kanálů možné použít šíření hydraulického rázu. Jedná se o rychlost postupové hydraulické vlny při zvýšení průtoku na začátku systému. Spolu se zvýšením hladiny/průtoku je dalším sledovaným parametrem teplota. Voda povrchového toku má zpravidla odlišnou teplotu teploty horninového masivu v jeskyni a zaznamenání zvýšení teploty v jeskyni indikuje příchod vlastní srážkové vody. Čas zvýšení teploty je vyšší než čas zvýšení hladiny, protože hydraulická odezva se v zaplaveném systému šíří rychleji. První zvýšení hladiny je způsobeno vytlačení vody již přítomné v krasových kanálech. V plně zaplavených kanálech se hydraulický pulz šíří řádově rychleji, než v kanálu s volnou hladinou. Čím více je tedy zaplavených úseků na celkové dráze podzemního toku, tím rychleji se hydraulická odezva šíří (Goldscheider et al. 2008).

Šíření hydraulické odezvy se používá pouze v případě reakce na srážkovou událost a řeší se analýzou hydrogramu. Zkoumá se tak závislost vydatnosti pramenů na srážkách a vztah krasových kanálů a okolního porézního prostředí (Taylor a Greene 2008, Kovács et al. 2005).

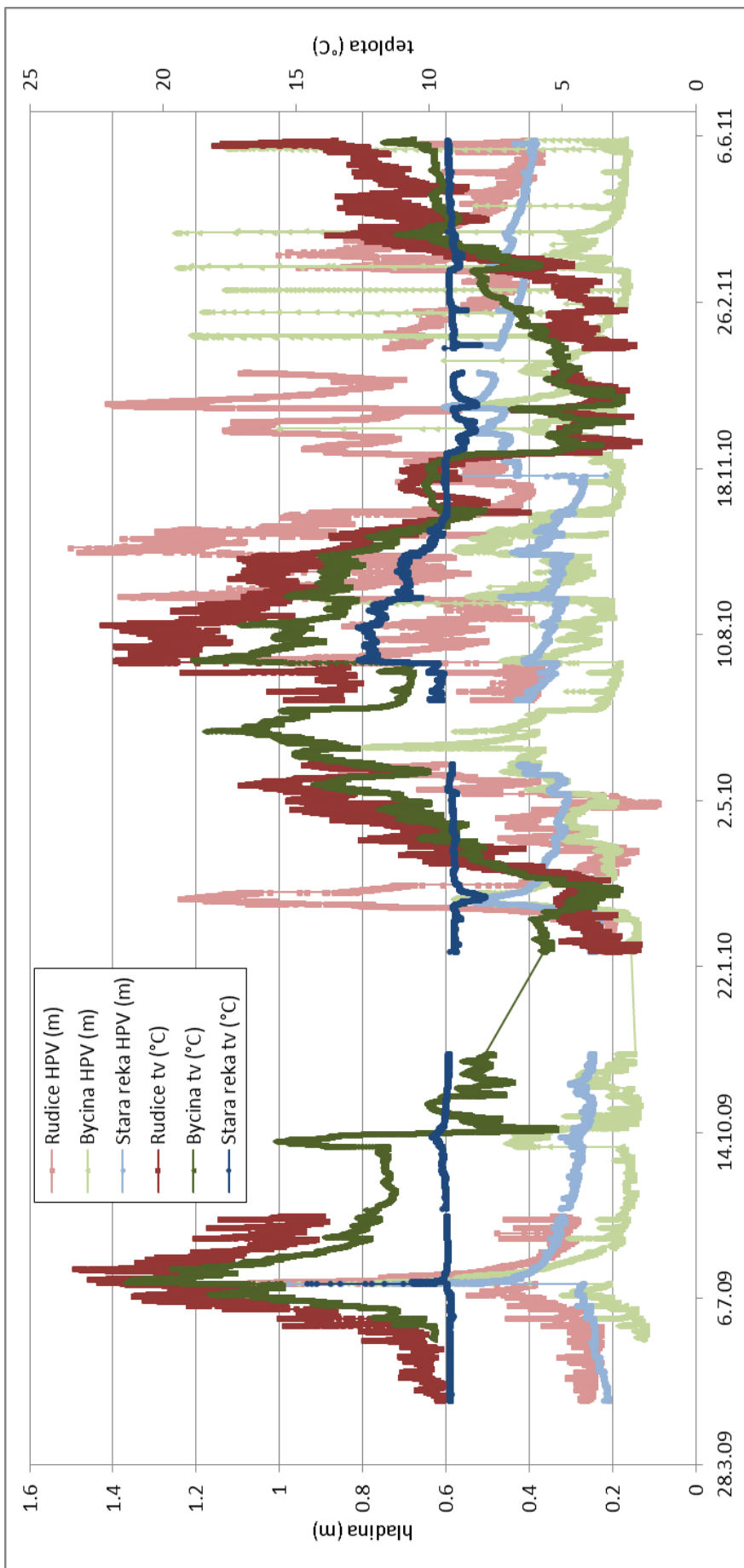
Použití teploty jako stopovače bylo na rozdíl od toho popsáno už v 60. letech 20. století (Anderson 2005), a to k lokalizaci infiltrace z povrchu a řek, přítoků do jezer a povrchových toků. Stallman (1963) poprvé zmínil možnost použití teploty pro zjištění rychlosti proudění podzemní vody, hydraulické vodivosti a permeability kolektoru pomocí teploty v kombinaci s hladinou podzemní vody. Od té doby bylo na základě teplotních měření vyvinuto množství modelů pro proudění podzemní vody, komunikaci s povrchovou vodou, odtokové poměry i vliv na ochlazování a oteplování zemského povrchu (Anderson 2005). Většina těchto modelů se týká porézního prostředí, ale jsou autoři, kteří se zabývají i modelováním transportu tepla v krasových kolektorech (např. Genthon et al. 2005, Long a Gilcrease 2009).

Teplota má podobné vlastnosti jako běžně používané stopovací látky rozpustné ve vodě – rychlost šíření, disperze, advekce se řídí stejnými fyzikálními zákony. Problém je, že teplota podzemní vody není konzervativní stopovač a k teplotním výměnám dochází i mezi vodou a okolním horninovým prostředím. Množství tepla přeneseného mezi vodou a horninou závisí na teplotním gradientu a na rychlosti proudění (podílu disperze a advekce; Anderson 2005, Genthon et al. 2005).

5.1. Rudické propadání – Býčí skála

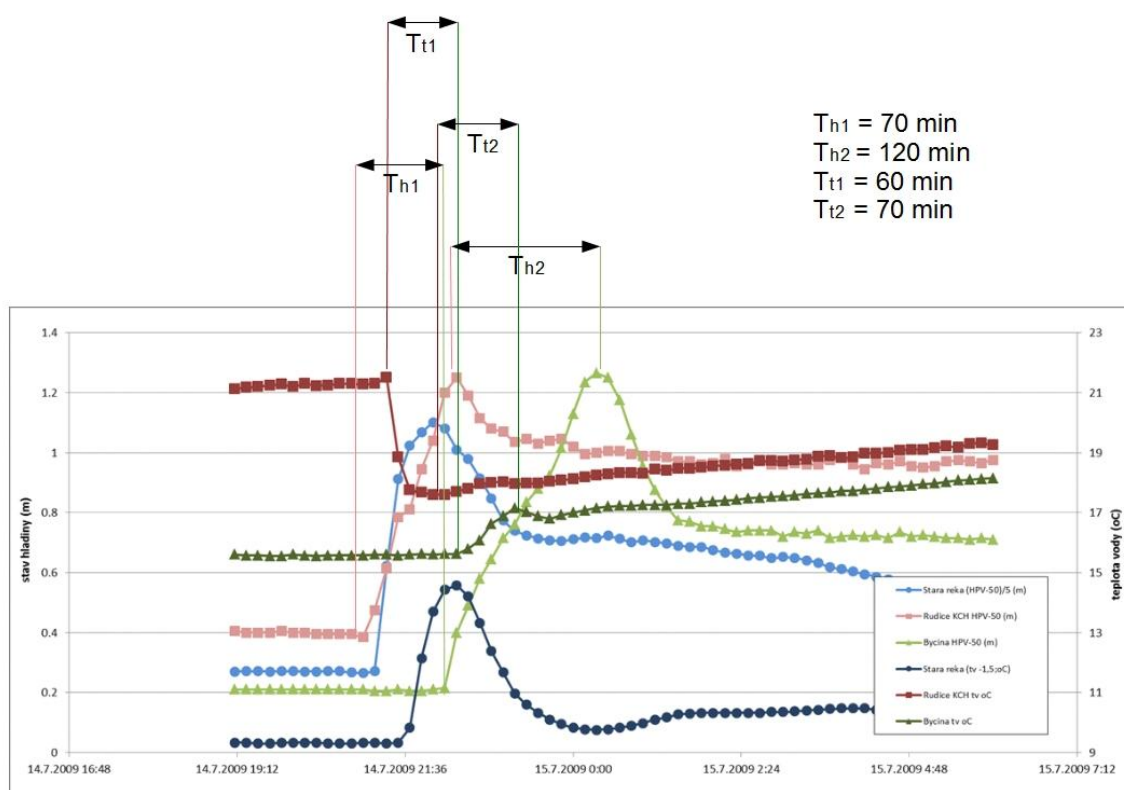
V jeskynním systému Rudické propadání – Býčí skála jsou umístěna tlaková/teplotní čidla zaznamenávající kontinuálně výšku hladiny a teplotu vody (viz metodika kapitola 3.2., obr. 5.1). Je třeba zmínit, že mimo srážkových událostí nastávají změny hladiny na Jedovnickém potoce i díky regulaci hladiny na rybnících Olšovci a Dýmáku přibližně 2 km nad propadáním.

Nejnižší vodní stavy (od doby, kdy byla čidla zprovozněna od 11.6.2009 do současnosti – červen 2011) byly naměřeny 4.2.2010, a to 0,229 m v Rudicích, 0,135 m v Býčí skále. V Rudicích byl zaznamenán i nižší stav (0,087 m), ale předcházela mu náhlý pokles hladiny a snížení trvalo pouze jeden den, v Býčí skále k tak výraznému snížení nedošlo (pouze na 0,195 m). Nejvyšší hladina byla naměřena 14.7.2009, v Rudicích 1,265 m, Býčí skále 1,250 a ve Staré řece 1,101 m. Průměrná výška hladiny je v Rudicích 0,538 m, ve Staré řece 0,350 m a v Býčí skále 0,236 m.



Obrázek 5.1 Záznam měření hladiny a teploty vody v jeskynním systému Rudice – Býčí skála.

Ze záznamů čidel od června 2009 do konce roku 2010 jsem vybrala všech 114 povodňových událostí (resp. událostí s náhlým zvýšením průtoku) a pokusila jsem se interpretovat rozdíly časů postupu hydraulické odezvy a změny teploty (příklad na obr. 5.2). Změna hladiny, pokud je přítomna na všech čidlech, tak se dobře identifikuje. Nárůst teploty v Býčí skále bývá v řadě případů velmi pozvolný a první nástup zvýšení teploty je velmi nejasný. Často také zanikne v pozadí, které kolísá během dne, nebo je stále ovlivněno předchozí povodní. Z celkových 114 událostí se pouze u 19 z nich dá spolehlivě určit změna teploty související s danou povodňovou vlnou. Ve Staré řece se hydraulická odezva neobjeví vždy, ze 114 případů se zde hladina zvýšila 65 krát. Zvýšení teploty přitom nastalo pouze ve 43 případech, často je odezva malá a změnu teploty nevyvolá.



Obrázek 5.2 Ukázka ideálního případu šíření hydraulické odezvy a teploty z Rudického propadání do Býčí skály. T_{h1} – rozdíl časů prvního zvýšení hladiny, T_{h2} – rozdíl časů maximální hladiny, T_{t1} – rozdíl časů prvního zvýšení teploty, T_{t2} – rozdíl časů teplotního maxima.

První čidlo umístěné přibližně 1 km od propadání má nejvýraznější rozdíly v teplotě i hladině. Jsou zde vždy až na výjimky patrné denní variace teploty. U čidla v Býčí skále je zvýšení hladiny posunutě od 30 minut po pět hodin, rozdíly časů maximální výšky hladiny jsou mírně vyšší, ale nástup je i zde velmi rychlý. Na rozdíl od toho změny teploty se pohybují v rozmezí času od jedné do šesti hodin přibližně v polovině případů, v ostatních případech se teplota na čidle v Býčí skále zvedne až po více než 10 hodinách. Neznamena to ale, že v takových případech se i hydraulický ráz šíří nadprůměrně pomalu, jedná se i o situace, kdy se první zvýšení hladiny objeví po 1,5 nebo 2 hodinách a maxima dosáhne cca po 2 až 2,5 hodinách. Denní variace teploty se v Býčí skále projevují pouze při zvýšeném průtoku, kdy výška hladin překročí hodnotu přibližně 0,20 až 0,24 metru.

Stará řeka po většinu času udržuje konstantní hladinu a teplotu 9 °C. Hladina za nízkého stavu se podle záznamu z čidla mění, pravděpodobně to je způsobeno ukládáním sedimentů a zvyšováním

dna, hodnoty jsou tedy relativní. Dne 13.11.2010 byl na Staré řece zkonstruován přepad, který by mohl tyto rozdíly alespoň zčásti eliminovat. Tím byla zvýšena hladina měření o 0,164 m, tento skok je patrný i na obr. 5.1. Přítok Staré řeky má neznámé spojení s tokem Jedovnického potoka v Rudickém propadání. Na změnu hladiny Jedovnického potoka reaguje pouze někdy a není to podmíněno určitou výškou hladiny. Pokud se zde odezva objeví, je velmi rychlá, ve většině případů mezi 10 minutami a jednou hodinou.

Původní domněnka byla, že bude existovat závislost rychlosti šíření hydraulického rázu na maximální dosažené hladině. Hladiny jsem po získání několika souborů dat o průtocích z ČHMÚ přepočítala na průtoky. Závislosti se ale v různých obdobích liší, proto by bylo vhodnější získat kompletní data. Po vynesení závislostí do grafu ale není patrný žádný trend (grafy viz příloha B). Tento vztah je pravděpodobně komplikovaný, vliv může mít rychlost nástupu vlny a podmínky v době nástupu. Na sledovaném úseku se nachází také několik sifonů, které se mohou být zanášeny sedimenty (jak také zmiňuje Musil et al. 1993), a ty pak ovlivňují rychlost proudění a šíření hydraulické odezvy.

5.2. Přehrada

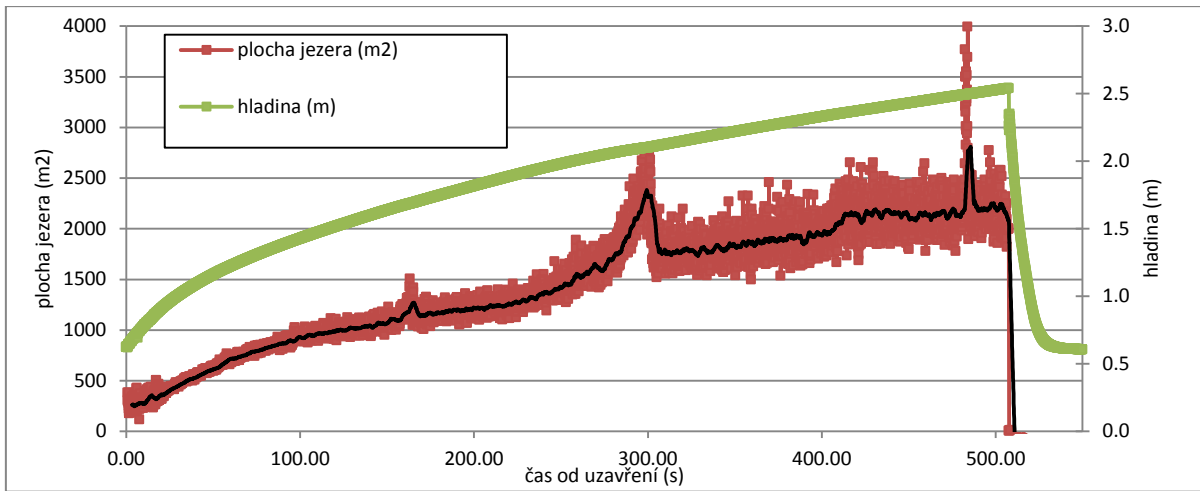
Na toku Jedovnického potoka v Kaňonech v Nové Býčí skále byla v několika minulých letech místními jeskyňáři zbudována dřevěná přehrada o výšce cca 3 metry se zavíracími vraty o rozměrech 1x1 metr. Její účel je zadržení velkého objemu vody a po otevření přehrady vzniká dostatečně silný proud, který odnáší sedimenty z níže položených částí jeskyně. Tyto prostory tvoří úzké členité chodby a sifony z velké části zanesené sedimenty a velmi špatně přístupné. V červnu 2011 zde byl proveden pokus o změření hydraulického pulzu po otevření přehrady a zjištění dalších údajů o charakteru krasových kanálů a parametrů přehrady.

Průtok Jedovnického potoka napájející přehradu se podle opakovaných měření pohyboval mezi 65 a 75 l.s⁻¹, počítáno tedy bylo s průtokem 70, se zanedbáním přibližně 5 l.s⁻¹ protékajících hrází. Přehrada se začala plnit 3.6.2011 v 11:30 hodin a do 19:57 se plnila z počáteční stálé hladiny 0,6 m do výšky 2,52 m. Nebyla napuštěna na maximální hodnotu, ta přesahuje 3 metry. Přibližně 5 metrů nad přehradní hrází bylo umístěno tlakové čidlo zaznamenávající hladinu nádrže v intervalu 5 sekund. Další čidla byla umístěna do vývěrů I, III a IV a pod soutok všech vývěrů.

Ze známého průtoku jsme získali přírůstek objemu (V) za časový úsek 5 sekund a dále podle známé hladiny (h) plochu (S) vznikajícího jezera (obr. 5.3):

$$\Delta V = 0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \times 5 \text{ s} = 0,35 \text{ m}^3 \quad (5.1)$$

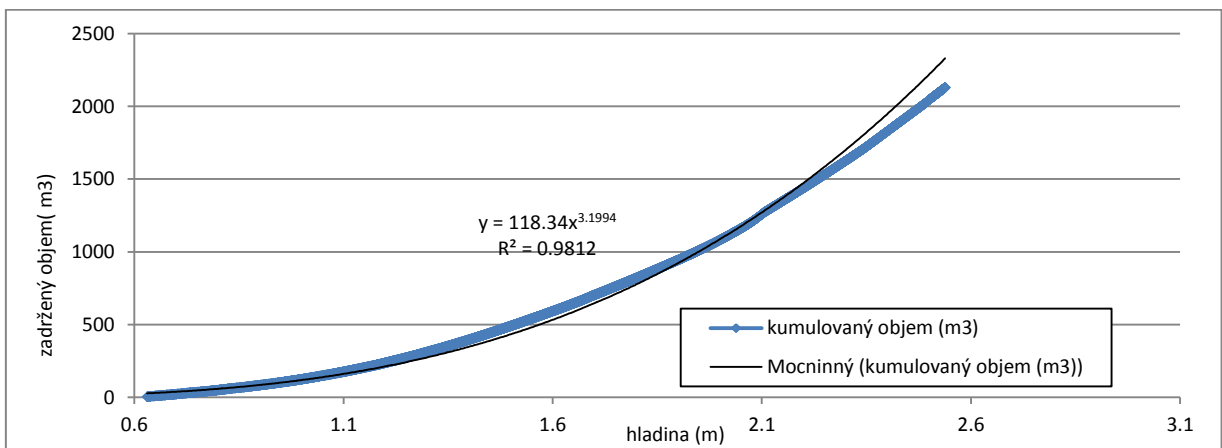
$$S = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (5.2)$$



Obrázek 5.3 Průběh hladiny a plochy jezera při napouštění přehrady

Po vynesení naměřených hodnot hladiny a kumulativní hodnoty objemu (obr. 5.4) je možné proložit křivku a získáme mocninnou závislost objemu na výšce hladiny:

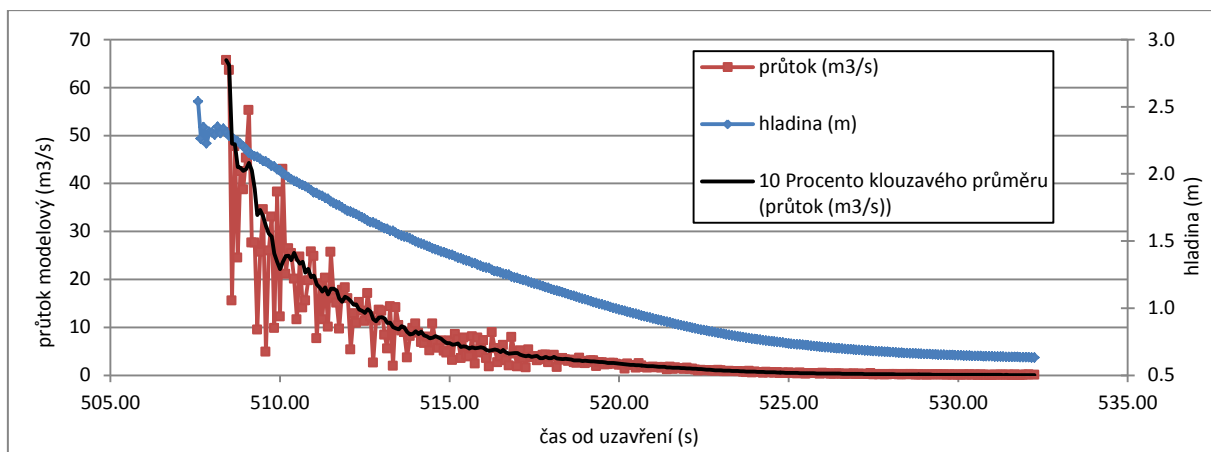
$$V = 118 \times h^{3,2} \quad (5.3)$$



Obrázek 5.4 Závislost zadržovaného objemu na naměřené hladině na přehradě

Z tohoto modelového objemu a naměřených hladin při vypouštění přehrady vypočteme přibližnou hodnotu okamžitého průtoku a závislost průtoku na hladině jako podíl úbytku objemu ($-\Delta V$) a časového úseku (Δt) v tomto případě 5 sekund (obr. 5.5):

$$Q = \frac{-\Delta V}{\Delta t} \quad (5.4)$$



Obrázek 5.5 Průběh hladiny a modelového průtoku při vypouštění přehrady

Uvedená závislost průtoku na hladině je pouze orientační, při otevření přehrady došlo k okamžitému snížení hladiny a deformaci proudového pole vlivem rychlého nárůstu hydraulického gradientu. Uvedené průtoky jsou tedy zpočátku výrazně podhodnocené oproti skutečnosti.

Rychlost proudění krasovými kanály je pak možné zjistit pomocí změny hladiny zachycené u vývěřů. Hráz byla otevřena v 19:57:40. Časy nástupu povodňové vlny a změny teploty na vývěřech uvádí tab. 5.1 a označení vývěřů je zde uvedeno podle obr. 4.16.

Profil	čas změny hladiny(s)	čas změny teploty (s)	Vzdálenost od přehrady(m)	v_h (m.min ⁻¹)	v_t (m.min ⁻¹)
pod vývěry	350	-	750	128,6	-
vývěř III	280	380	675	144,6	106,6
vývěř IV	370	550	720	116,8	178,6
vývěř I	645	1285 - 1615	780	72,6	36,4-29

Tabulka 5.1 Časy nástupu povodňové vlny v sekundách od momentu otevření přehrady a rychlosti hydraulického rázu (v_h) a rychlosti proudění vody z přehrady podle změny teploty (v_t). Označení vývěřů je podle obr. 4.16.

V tabulce 5.1 je uveden čas prvního zvýšení hladiny a čas změny teploty. V přehradě byla naměřena teplota 10°C a měnila se v průběhu vypouštění pouze minimálně, je tedy možné jí považovat za konstantní. Ve vývěřech byla před otevřením přehrady vyšší teplota, pouze ve vývěřu IV byla velmi podobná, a to 10,1°C. Snížení teploty ve vývěřu indikuje objevení vody, která byla zdržena v přehradě, případně vody o stejné teplotě z krasových kanálů před přehradou. Zvýšení hladiny značí nástup tlakové vlny, která před studenou vodou z jeskyně vytlačuje i vodu zdržující se blízko povrchu v jiných teplotních podmínkách.

Jako první se po 4:40 minutách zvýšila hladina ve vývěřu III., ke zvýšení teploty došlo po 6:20. Ve vývěřu IV došlo k mírnému zvýšení hladiny po 4:40 minutách, protože došlo k přetoku z vývěřu III. Výrazně se hladina zvedla v 6:10. Teplota se nejdříve v čase 5:50 začala zvedat a v čase 9:10 dosáhla maxima a začala se opět snižovat až pod původní hodnotu, změny byly ale velmi malé, pouze v rozsahu cca 0,05°C. Ve vývěřu I došlo k prvnímu nárůstu hladiny v čase 10:45. K velmi nevýraznému snížení teploty došlo mezi časy 21:20 a 26:50 od otevření přehrady. Čidlo umístěné pod vývěřem bylo při minimálním stavu nad hladinou vody, proto změnu hladiny pravděpodobně zaznamenalo později. Teplotu z tohoto profilu není možné použít, protože zpočátku zaznamenávalo teplotu vzduchu, která byla velmi vysoká a velký teplotní rozdíl mezi vzduchem a vodou přebil všechny rozdíly v teplotě vody (grafy v příloze C).

Rychlosti šíření vody prázdným kanálem se podle tohoto pokusu pohybují mezi 70 a 140 m.min⁻¹. Počáteční průtok při otevření přehrady dosahoval pod hrází cca 5-15 m³.s⁻¹. Ze stopovacích zkoušek v tomto úseku vycházejí maximální rychlosti stopovače 2-2,5 m.min⁻¹ při průtoku 70 l.s⁻¹ (viz B5) a 75 m.min⁻¹ při průtoku 1600 l.s⁻¹. Podobný pokus prováděl Himmel (2009) v Ochozské jeskyni. Odvedl Hostěnický potok při průtoku 10,65 l.s⁻¹ od propadání I do propadání II a měřil postupové rychlosti suchým řečištěm. Průměrná postupová rychlost činila 3 m.min⁻¹. Při zopakování pokusu v již zvodnělém řečišti se postupová rychlost zvýšila na 7 m.min⁻¹ při stejném průtoku. Rychlost stopovače při stejném průtoku byla 3,6 m.min⁻¹ (rychlost podle píku, viz O12; Himmel 2009).

6. ZÁVĚR

V rámci své diplomové práce jsem ve spolupráci s kolegy provedla 14 nových kvantitativních stopovacích zkoušek v Moravském krasu v době trvání od 30 minut po 20 dní a zpracovala výsledky a vyhodnotila dalších 12 nových a převzala data z 32 archivních stopovacích zkoušek. Na Křtinském potoce se jedná o vůbec první provedené kvantitativní stopovací zkoušky. V systému Rudické propadání – Býčí skála a v Ochozské jeskyni jsem od května 2009 do června 2011 stahovala data z instalovaných tlakových a teplotních čidel a prováděla měření průtoku pro získání dat o stavech hladiny, průtoku a teploty v 10 minutových intervalech.

V první části práce věnované stopovací zkouškám jsem srovnala výsledky 58 stopovacích zkoušek na 19 lokalitách v Moravském krasu a v české křídové pánvi, tj. všech dostupných zkoušek, které umožňují zpracování vybranou metodou. Ze 33 kompletně vyhodnocených zkoušek jsem zjistila závislost maximální rychlosti (v_L) a rychlosti píku (v_p) a také času prvního objevení (T_L) a času píku (T_p). Závislost T_L a T_p odpovídá výsledkům Morales et al. (2007). Veličiny v_p a Q v jednotlivých jeskyních nemají ideální závislost, jakou uvádí Morales et al. (2007), během stopovacích zkoušek v Moravském krasu průtok dosahoval vyšších hodnot a jeskynní systémy jsou komplikovanější, často zde existuje více paralelních kanálů.

Pomocí závislosti rychlosti proudění, podélné disperzivity, Pecletova čísla a průměrné plochy průtočného profilu na průtoku jsem porovnávala charakter proudění ve všech lokalitách. Pro freatické kanály platí lineární závislost rychlosti na průtoku a plocha průtočného profilu se s průtokem nemění (Goldscheider et al. 2008). Pro kanály s volnou hladinou platí logaritmická závislost rychlosti na průtoku a velké změny průtočného řezu. Většina testovaných kanálů v Moravském krasu ukazuje na přítomnost úseků s volnou hladinou. V případech Malého propadání Punkvy a Netopýrky rychlost s rostoucím průtokem klesá. Důvodem je pravděpodobně úzký odtokový profil drénující rozsáhlý prostor, který se za vyšších vodních stavů zaplavuje.

Extrémně vysoké hodnoty disperzivity (>20) naznačují přítomnost paralelních kanálů nad vývěry Říčky, Netopýrkou a na Křtinském potoce. Tyto hodnoty tedy neznačí přímo disperzitivitu, ale rozdělení stopovače do více kanálů s různou rychlostí proudění. Pro jednotlivé úseky platí, že disperzivita s rostoucím průtokem klesá a Pecletovo číslo roste. Nejnižší disperzivita je v krátkých kanálech nebo v kanálech, kde voda proudí laminárně a velkou rychlostí, určující je míra mísení vody. Proces mísení dobře popisuje závislost jednotkové maximální koncentrace na času podle píku na logaritmickém grafu, kde sklon přímky značí vliv procesů (mimo disperzitivitu) ovlivňujících mísení.

Jednotlivé lokality by se podle výsledků práce daly charakterizovat takto:

- Z 29 stopovacích zkoušek v různých úsecích systému Ochozské jeskyně je zřejmé, že se zde nachází mnoho různých typů krasových kanálů. Mezi Hostěnickým propadáním I, Netopýrkou a vývěry Říčky se pravděpodobně vyskytují paralelní krasové kanály. Od Hostěnického propadání I k Estavele s průtokem rychlost proudění rychle roste až do úplného naplnění kapacity propadání a pak pravděpodobně i klesá. Disperzivita stoupá s průtokem, důvodem může být zanesení kanálů sedimenty nebo zaplavení dalších prostor. Při překročení kapacity Hostěnického propadání I přetéká potok do propadání II a do Ochozské jeskyně. Tento kanál pojme všechnu zbývající vodu i za velkých povodní a má proto odlišný charakter a proudění dosahuje několikanásobně vyšších rychlostí.

- Na Křtinském potoce jsem vyhodnotila a srovnala výsledky 4 stopovacích zkoušek, a to na úseku z ponoru E/Výpustku a z Otevřené skály do vývěru. Proudění v celém systému dosahuje rychlosti maximálně $1,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, průměrný průtočný profil pravděpodobně přesahuje 10 m^2 a jedná se o kanál s volnou hladinou. V úseku od Otevřené skály k vývěru je maximální rychlost $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a téměř se zde nemění průtočný profil, proto se s největší pravděpodobností jedná o sifon.
- Podle 12 stopovacích zkoušek v krátkých úsecích z Kaňonů v Býčí skále a z Barové jeskyně do vývěrů v těchto částech toku Jedovnického potoka převládají freatické kanály. Více z těchto zkoušek nelze vyvodit, v době mezi archivními a současnými zkouškami se změnilo průtoky vývěrů (především kvůli velkému přemístování sedimentů hydrotěžbou) a není k dispozici více zkoušek ze stejných míst.
- Na Křtinském potoce a na Říčce byly ze stopovacích zkoušek zjištěny nízké rychlosti proudění v kanálech i za vysokých vodních stavů, kdy oba toky již přetékaají povrchovým korytem. Ani za nejvyšších vodních stavů tak nelze očekávat dosažení rychlostí umožňujících transport hrubých klastů přinášených vodními toky. Nízké rychlosti proudění tak nedovolují, aby si tok Křtinského potoka a Říčky vytvořil slepé či poloslepé údolí, jako je tomu u ostatních ponorných toků.
- Dále jsem porovnávala dvě stopovací zkoušky z Malého propadání Punkvy do odvodňovacího tunelu a dále tunelem ven. Je zde dobře vidět, že disperzivita narůstá především v krasovém kanále, v umělém tunelu se již nemění velikost průtočného profilu ani disperzivita. Při zvýšení průtoku v krasovém kanále došlo ke snížení rychlosti proudění a více než dvojnásobně se zvýšila průměrná plocha průtočného profilu.
- Pro porovnání jsem uvedla i výsledky stopovacích zkoušek z české křídové pánve (Bruthans et al. 2011). Vychází z nich mnohem těsnější závislost rychlosti, disperzivity i Pecletova čísla na průtoku. Rychlosti jsou srovnatelné s Moravským krasem, ale s průtokem rychlost roste rychleji, což může být důsledek rozdílné geometrie kanálů a také zcela daleko jemnějšího materiálu, který se v těchto kanálech transportuje (písek).

Ve druhé části práce jsem zpracovala záznam z čidel v jeskynním systému Rudické propadání - Býčí skála zaznamenávajících teplotu a hladinu vody. Ze záznamu jsem odečetla časy šíření povodňové vlny ze všech náhlých zvýšení hladiny a časy šíření teploty, pokud to bylo možné. Určit čas změny teploty se ukázalo být velmi subjektivní a ve většině případů nemožné. Po vynesení závislosti času šíření na maximálním a minimálním stavu hladiny, a na průtocích do grafu není patrný žádný trend. Rychlost šíření hydraulického rázu je pravděpodobně mnohem více závislá na momentálním poměru plně zaplavených úseků a úseků s volnou hladinou. V rozsáhlé střední části systému se nachází nízké polosifony, které se zřejmě rychle zaplavují a míra jejich zaplavení se zřejmě liší v závislosti na množství a sedimentů v škrťácích profilech. V některých případech může tlakové čidlo v Býčí skále hydraulicky reagovat na přítok krasových vod z mezipovodí mezi ponorem a vývěrem a nikoli na vody z ponoru.

Pokus s uměle vyvolaným šířením hydraulického rázu jsme provedli ve vývěrové části Jedovnického potoka, kde se nachází uzavíratelná hráz. Jedná se zatím o první test a není ho možné s ničím srovnat. Pouze Himmel (2009) zkoumal podobným způsobem šíření hydraulického rázu v Ochozské jeskyni, bylo to ale za stálého nízkého průtoku. Rychlost hydraulického rázu podle pokusu v Býčí skále je přibližně 2 krát vyšší než rychlost ze stopovacích zkoušek provedených na stejném úseku za maximálního průtoku.

7. POUŽITÁ LITERATURA

- Anderson M. P. (2005): Heat as a Ground Water Tracer, *Ground Water* 43 (6), p. 951-968.
- Balák, I. (1997): Geologická stavba Moravského krasu, mapa, MS, SCHKO Moravský kras. Blansko.
- Balák, I., Kovařík, M., Tůma, A. (2004): Stopovací experimenty v údolí Říčky, MS, zpráva SCHKO Moravský kras. Blansko.
- Bruthans (2006): Využití přirozených stopovačů (18O; 3H; freony; SF6) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v krasových oblastech ČR, MS, disertační práce, PŘF UK, Praha.
- Bruthans, J., Zeman, O., Vysoká, H. (2006): Geologie a hydrologie Bartošovy pece a okolí. In: Jenč, P. – Šoltysová, L. (Eds.): Pískovcový fenomén českého ráje, p. 79-91. SCHKO Český ráj. Turnov.
- Bruthans J., Vojtěchovská A. (2009): Stopovací zkoušky na Kovářském a Křtinském potoce (Moravský a Mladečský kras), *Speleofórum*, 28, Praha, p. 106-107.
- Bruthans J., Jäger O. (2010): Charakter podzemního kanálu mezi Malým propadáním a odvodňovacím tunelem Punkevních jeskyní, *Speleofórum*, 29, Praha.
- Bruthans, J., Churáčková, Z. (2011): Využití stopovačů pro studium proudění, původu a vývoje chemického složení vody pramene (Sv. Vojtěch, Česká křídlová pánev). – *Zpr. Geol. Výzk. v roce 2010* (v tisku)
- Burkhardt, R. (1971-1972): Hydrografie Hostěnického ponorného potoka ve vztahu k Ochozské jeskyni (Moravský kras). – *Acta Mus. Moraviae, Sci. Natur.*, LVI-LVII: p. 75-92. Brno
- Dvořák J., Pták J. (1963): Geologický vývoj a tektonika devonu a spodního karbonu Moravského krasu. *Sborník geologických věd. Praha* 1963, 3, p. 49-84.
- E.P.A. (1988): Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes. United States Environmental Protection Agency EPA904/6-88-001. Digital Version, 90 p.
- Freixes A., Montere M., Ramoneda J. (1997): Tracer test in the Joèu karstic system (Aran Valley, Central Pyrenees, NE Spain). In: Kranj, A. (Ed.), *Tracer Hydrology*, vol. 97. Balkema, Rotterdam, p. 219–225.
- Field M. (2002): The Qtracer2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington Office, Washington, DC, EPA/600/R-02/001.
- Genthon P., Bataille A., Fromant A., D'Hulst D., Bourges F.(2005): Temperature as a marker for karstic waters hydrodynamics. Inferences from 1 year recording at La Peyrère cave (Ariège, France), *Journal of Hydrology* 311 (1–4), p. 157-171
- Goldscheider N., Meiman J., Pronk M and Smart C. (2008): Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37 (1), p. 27-40. Bologna (Italy). ISSN 0392-6672.
- Himmel J. (1966): Hádecká estavela a její vztah k jeskynnímu systému ponorného Hostěnického potoka. – *Kras v Českoslov.*, 1/1964: p. 6-10. Brno.
- Himmel J. (1988): Ponorné vody Hostěnického potoka a jejich vztah k Ochozské jeskyni. *Regionální sborník okresu Blansko, Blansko*, 1988, p. 80 - 84.
- Himmel J. (1990): Hydrografie systému Ochozské jeskyně, *Československý kras* 41, Praha, p. 71 – 81

- Himmel J. (1999): Vztah Hádecké estavely k vodám Hostěnického potoka a Hádecké Říčky. Estavela, 2, p. 11 – 17.
- Himmel J. (2002): Nové poznatky o směru podzemního odtoku od Hostěnického propadání II. Speleo, 34, Praha, p. 7 – 9.
- Himmel J. (2009): Retenční schopnost povodňového řečiště Hostěnického potoka v Ochozské jeskyni a směry odtoku od propadání I, Speleofórum 2009, ročník 28, Praha, p. 127130
- Himmel J. (2010): Hydrografie toků jižní části Moravského krasu, Speleofórum 2010, ročník 29, Praha, p. 118-122
- Hladil J. (1983): The biofacies section of Devonian Limestones in the central part of the Moravia karst. – Sbor. geol. Věd, Geol., 38, 71-94. Praha.
- Hort J., Kocůrová E., Kožnárek Z., Kůra O., Sommer M., Slezák L. (1967): Nové poznatky o hydrografii jižní části Moravského krasu. Acta. Mus. Moraviae, 52, Brno, s. 43 - 57.
- Hubbard E. F., Kilpatrick F. A., Martens L. A., Wilson, Jr. J. F. (1982): Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing. United States Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigation, Book 3. Chapter A9. 44 p.
- Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z. (2011): Geologická minulost České republiky, 2. vydání, Academia, Praha, ISBN 978-80-200-1961-5, 436 p.
- Jahn A., Kozłowski S. a Wisziowska T. (1989): Jaskinia Niedzwiedzia w Kletnie. – Polska Akademia Nauk. Wrocław, 366 p.
- Jobson H. E. (1996): Prediction of Traveltime and Longitudinal Dispersion in Rivers and Streams. Water-Resources Investigation Report 96-4013, USGS, 30 p.
- Kadlec J. (2003): Rekonstrukce směrů proudění pomocí měření anizotropie magnetické susceptibility ve fluvialních sedimentech Ochozské jeskyně, Moravský kras, Geol. výzk.Mor. Slez v roce 2002, Brno 2003, p. 5-7.
- Kaschefipour S. M., Falconer R. A. (2002): Longitudinal dispersion coefficients in natural channels, Water Research 36 (2002), p. 1596-1608
- Kilpatrick F.A., Wilson Jr. J.F. (1989): Measurement of time of travel in streams by dye tracing. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 3. Chapter A9. 27 p.
- Knížek M. (2006): Charakter proudění vody a krasových kanálů na základě kvantitativních stopovacích zkoušek (Moravský kras), MS, diplomová práce, Masarykova univerzita – přírodovědecká fakulta, Brno
- Kopáč J. (2007): Měření Průtoku pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity, MS, diplomová práce, PŘF UK, Praha
- Kos P., Kučera P. (2006): Na Podzemním potoku v jeskyni Netopýrka v jižní části Moravského krasu, Speleofórum 2006, ročník 25, Praha, p. 15-16
- Kovacs A., Perrochet P., Kiraly L., Jeannin P.-Y. (2005): A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis, Journal of Hydrology 303 (1–4), 2005, p. 152–164.
- LGR 2 HT, Geomon, s.r.o., <http://www.geomon.cz/lgr2ht.htm>, 14.7.2011

Long A. J., Gilcrease P. C. (2009): A one-dimensional heat-transport model for conduit flow in karst aquifers), *Journal of Hydrology*, 378 (3-4), p. 230-239.

Meus, P., Bakalowicz, M. (1997): Les tracages artificiels, outils de reconnaissance et d'étude des aquifères karstiques. *Hydrogéologie* 3, p. 43–50.

Mikuš, P., Bruthans, J., Soukup, H. (v tisku): Nové stopovací zkoušky za vysokých vodních stavů v infiltračním území Bartošovy pece. In: Jenč P. (Ed.): *Pískovcový fenomén českého ráje*. Turnov.

Morales T., Fernandez de Valderrama I., Uriate J. A., Antigüedad I., Olazar M. (2007): Predicting Travel Times and Transport Characterization in Karst Conduits by Analyzing Tracer-breakthrough curves. *Journal of Hydrology*, p. 183-198

Musil R., Demen J., Dvořák J., Gaisler J., Grolich V., Havel H., Hypr D., Ložek V., Příbyl J., Quitt E., Raušer J., Slezák L., Souchopová V., Štelcl O., Štefka L., Valoch K., Vaněčková L., Vašátko J., Vlček V., Vodička J., Zima J. (1993): *Moravský kras – Labyrinty poznání*, Adamov, 336 p.

Otava J., Kahle V. (2003): Svážná studna v Moravském krasu - geneze a hydrografická situace. – *Speleofórum*, 2003, p. 5-7. Praha.

Pavelová E., Bruthans J., Kamas J., Lejska S. (2011): Stopovací zkouška za vysokého stavu na systému Vilémovické propadání – Malý výtok, *Speleofórum 2011*, Praha, p. 136-138

Solinst Levelogger, <http://www.solinst.com/index.html>, 12.8.2011

Taylor Ch. J., Greene E. A. (2008): Hydrogeologic Characterization and Methods Used in Investigation of Karst Hydrology. In: Rosenberry D. O., LaBaugh J. W. (Eds.): *Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water*, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2, 2008, 128 p.

Vojtěchovská A., Bruthans J. (2010): Parametry Krasových kanálů a proudění v Česku na základě kvantitativních stopovacích zkoušek, *Zprávy o geologických výzkumech 2009, ČGS 2010*, p. 293-296

Zeman O., Bruthans J. (2002): Stopovací zkouška ze systému Lopače a nové poznatky o ostrovsko-vilémovických vodách. *Speleofórum 2002*, Praha, p. 24-28