

program Prostředí pro život 6

Projekt SS06010268

Poznání, kvantifikace a ochrana strategických zdrojů podzemní vody české křídové pánve
hlubokého oběhu v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522

Výsledek SS06010268-V6

Závěrečná zpráva z realizovaného výzkumu

Vsouhrn

Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D. (PřF UK)

Mgr. Martin Slavík, Ph.D (PřF UK)

RNDr. Josef Datel, Ph.D. (VÚV TGM, v.v.i.)

Mgr. Jakub Mareš, Ph.D (PřF UK)

Mgr. Kateřina Šabatová (PřF UK)

Ing. Anna Hrabánková (VÚV TGM, v.v.i.)

Ing. Alena Jačková (VÚV TGM, v.v.i.)

Bc. Kateřina Kučerová (VÚV TGM, v.v.i.)

Bc. Kateřina Malechová (PřF UK)

Praha, březen 2026

OBSAH

1. Úvod.....	4
2. Geologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území – stav poznání před započítím projektu..	4
3. Metodika.....	6
3.1. Určení hydrostratigrafie.....	6
3.2. Měření průtoků.....	7
3.3. Hydrochemie a environmentální stopovače.....	8
3.3.1. Hydrochemické analýzy.....	9
3.3.2. Stabilní izotopy O, H.....	9
3.3.3. Vzácné plyny.....	10
3.3.4. Analýza ¹³ C a ¹⁴ C.....	11
3.3.5. Datování pomocí tritia a CFC (freonů) a SF ₆	11
3.3.6. Datování pomocí ³⁹ Ar a ⁸⁵ Kr.....	12
3.3.7. Modelování střední doby zdržení.....	13
3.3.8. Tvorba účelové mapy zájmové hydrogeologické struktury.....	14
3.3.9. Konstrukce geologických řezů zájmovou oblastí.....	14
3.3.10. Návrh ochrany dané hydrogeologické struktury.....	15
4. Výsledky projektu.....	15
4.1. Určení hydrostratigrafie, vymezení kolektorů a hlavních strukturních prvků ovlivňujících proudění podzemní vody.....	15
4.2. Měřené průtoky.....	19
4.3. Hydrochemie.....	20
4.4. Stabilní izotopy O, H.....	24
4.5. Analýza vzácných plynů.....	25
4.6. Analýza ¹³ C a ¹⁴ C.....	25
4.7. Střední doba zdržení.....	28



4.8. Účelová mapa zájmové hydrogeologické struktury.....	33
4.9. Geologické řezy.....	34
5. Interpretace výsledků a diskuse.....	40
5.1. Proudové systémy a střední doba zdržení podzemní vody.....	40
5.2. Ochrana a optimální využití významné akumulace kvalitních starých vod.....	42
5.2.1. Potřeba ochrany hydrogeologické struktury.....	42
5.2.2. Poznámky k jímání podzemních vod s dlouhou dobou zdržení v budoucnosti.....	44
6. Závěrečné zhodnocení.....	45
7. Seznam použitých zdrojů.....	46
Poděkování.....	48

1. Úvod

Předložený dokument je souhrnnou zprávou projektu TAČR SS06010268 Poznání, kvantifikace a ochrana strategických zdrojů podzemní vody české křídové pánve hlubokého oběhu v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522. Zpráva detailně obsahuje všechny provedené práce, popisuje zvolené postupy, shrnuje získaná data a uvádí a interpreтуje dosažené výsledky za celou dobu řešení projektu (06/2023–03/2026).

Cílem projektu bylo zajistit ochranu významné akumulace kvalitních podzemních vod hlubokého oběhu, které se nacházejí ve dvou rajonech české křídové pánve 4410 Jizerská křída pravobřežní a 4522 Křída Liběchovky a Pšovky. Na tyto vody upozornil předchozí projekt Rebilance zásob podzemních vod (2011–2016), v jehož rámci ale nebylo možné provést podrobný výzkum této struktury. Přírodní zdroje těchto vod jsou díky dlouhé době zdržení (výrazně více než 60 let) odolné vůči současným obdobím sucha i potenciálnímu znečištění, mohou tedy sloužit jako strategické zásoby pitné vody pro krizové situace. Tyto vody jsou vhodné coby významný zdroj podzemní vody vysoké kvality, dle předběžných odhadů před započítáním projektu o vydatnosti nejméně vyšší desítky l/s.

Za tímto účelem tedy bylo nutné lépe poznat hydrogeologickou strukturu, ověřit území tvorby těchto vod, stanovit využitelné množství a dobu zdržení v geologickém prostředí, a podle toho navrhnout jejich optimální ochranu a využití.

V rámci projektu byly v zájmovém území vzorkovány vybrané prameny a vrty na chemismus, koncentrace tritia (^3H), radiouhlíku (^{14}C), stabilních izotopů uhlíku, kyslíku a vodíku (^{13}C , ^{18}O , ^2H), freonů (CFC -11, -12 a -113), SF_6 a několik objektů bylo vzorkováno technicky a finančně náročnými technikami izotopů ^{39}Ar , ^{85}Kr a pomocí vzácných plynů (Ar, Ne, Kr, Xe a He). Na vybraných pramenech byla měřena vydatnost a její kolísání. Ze studia geochemického a izotopového složení a za pomoci nově konstruovaných geologických řezů, hydraulických výšek a dříve realizovaných karotážních měření bylo nově konceptualizováno proudění podzemní vody v oblasti. Byla stanovena doba zdržení podzemní vody a bylo kvantifikováno množství tzv. staré vody s dobou zdržení nad 300 let. Bylo navrženo vhodné využití jímacích objektů a byly identifikovány oblasti s potenciálem dalšího vodárenského využití starých vod.

2. Geologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území - stav poznání před započítáním projektu

Česká křídová pánev je největší sedimentární pánev v České republice, pokrývající území o rozloze přibližně 14600 km². Zájmová oblast spadá zčásti do hydrogeologického rajonu 4410 (Jizerská křída pravobřežní), který má tzv. jizerský litofaciální vývoj české křídové pánve. Ten tvoří přechodní facii mezi většinou písčitém vývojem (tzv. lužický vývoj) na ZSZ od Jizery a většinou jílovitým vývojem (tzv. labský vývoj) na VJV od Jizery.

V rajonu 4410 je významný výskyt facie vápnitých a kvádrových pískovců ve středním až svrchním turonu (Klein, 1966; Valečka, 1979). Druhým hydrogeologickým rajonem v zájmové oblasti je 4522 (Křída Liběchovky a Pšovky), která litologickým charakterem spadá do východního okraje lužické litofaciální oblasti (písčité sedimentace; Svoboda, 1964) a směrem k jihu přechází do vltavsko-berounské litofaciální oblasti, východním směrem do jizerské litofaciální oblasti. Třetím rajonem v oblasti je 4720 Bazální křídový kolektor. Dotčeným hydrogeologickým rajonem je v severním sousedství ještě rajon 4640 Křída Horní Ploučnice.

Studované území o celkové rozloze přibližně 1600 km² se nachází asi 50 km severoseverovýchodně od Prahy mezi městy Mělník, Mladá Boleslav a Liberec. Leží v nadmořské výšce 200–600 m n. m., přičemž orografické povodí v krystaliniku může dosahovat až 1012 m n. m. Průměrné roční srážky a teplota vzduchu činí 550–800 mm, resp. 7–10 °C. Průměrná roční dotace podzemních vod je 1–6 l/s/km² (ČGS, 2026a).

V zájmové oblasti jsou litostratigraficky vyčleňována tato souvrství (od nejstarších): perucko-korycanské, bělohorské, jizerské, teplické a rohatecké vrstvy, a to stáří cenoman až coniac. Mladší křídová souvrství se nezachovala (Čech, 1980). V rámci Rebilancí byly vymezeny tzv. genetické sekvence podle dr. Uličného et al. (2009): CEN coby cenomanské perucko-korycanského souvrství, TUR1 a TUR2 coby pelitický interval bělohorského souvrství, TUR3 až TUR6 jizerské souvrství (Kůrková et al., 2016a,b).

Kolektory podzemní vody byly tradičně interpretovány jako tvořené především křemennými pískovci, kde proudění podzemní vody je řízeno primárně pórovitostí a puklinami. Nedávné studie však prokázaly, že vápnité pískovce a tenké polohy písčitých vápenců mohou lokálně vyvinout krasovou porozitou a zvýšenou propustnost v důsledku rozpouštění karbonátů, což umožňuje významné proudění podzemní vody prostřednictvím rozpouštěním rozšířených puklin a kanálů (Kůrková et al., 2019; Starý et al., 2024). Tyto poznatky ukazují, že architektura kolektorů v české křídové pánvi je složitější, než se dříve předpokládalo.

V hydrogeologii se v turonských horninách historicky rozlišují tři faciální typy (Hynie, 1961): proximální, přechodní a distální, z nichž každá vykazuje odlišné hydrogeologické vlastnosti. Proximální facie je tvořena hrubozrnnými křemennými pískovci vytvářejícími deltová tělesa (Uličný et al., 2001; Uličný et al., 2009). Prameny zde mají obvykle střední vydatnosti nepřesahující několik l/s. Přechodní facie obsahuje kromě křemenných pískovců také kalcitem tmelené pískovce a písčité vápence, v nichž rozpouštění vytváří krasové kanály, což vede ke vzniku velkých pramenů s vydatnostmi od desítek až po více než 100 l/s (Kůrková et al., 2019; Starý et al., 2024). Distální facie je tvořena slínovci a jílovcí a vyznačuje se pouze malými prameny a vysokou hustotou povrchové říční sítě.

Kolektory jsou v české křídové pánvi tradičně označovány odspodu nahoru abecedními symboly (A – cenoman, B – spodní turon, C – střední a svrchní turon). Z hlediska vodárenského využití je nejvýznamnější kolektor C, na který připadá 52 % zásob podzemní vody české křídové pánve (Pačes et al., 2008). Před zahájením tohoto projektu byl po několik desetiletí přijímán následující konceptuální model proudění podzemní vody. Ve studované oblasti byly historicky rozlišovány dva kolektory – A a C. Cenomanský kolektor A je doplňován pouze v několik kilometrů širokém pásu na severu podél lužického zlomu, nejméně 10–15 km

od hranic studovaného území. Podzemní voda v kolektoru A proudí pomalu, převážně k jihu, směrem k Labi, kde je odvodňována. Voda vykazuje dlouhé doby zdržení (až 30 tisíc let) a má specifické izotopové i chemické složení.

Turonský kolektor C byl vymezen částečně arbitrárně na základě makroskopického popisu vrtných jader a obecného předpokladu, že hrubozrnné pískovce jsou propustnější než ostatní horniny a že tvoří kolektory. Tento konceptuální model zpochybnil už [Hynie \(1961\)](#), který poukázal na to, že největší prameny nejsou vázány na hrubozrnné křemenné pískovce, ale spíše na jemnozrnnější litologie obsahující kalcit. Jeho zjištění však byla z velké části přehlížena. U kolektoru C se dlouhodobě předpokládalo, že obsahuje převážně mladé podzemní vody (s jasně měřitelnými, nenulovými hodnotami tritia). Předchozí projekt Rebalance realizovaný v letech 2010–2015 však ukázal, že z více než tří set měření tritia v celé české křídové pánvi byly vody bez tritia téměř výhradně nalezeny v kolektoru A, pouze jedinou výraznou výjimkou byla právě studovaná oblast, kde několik objektů (prameny i několik čerpaných vrtů) vykazovalo nulové nebo velmi nízké koncentrace tritia, a to i u vod, které nemohly pocházet z kolektoru A. Kromě mladých vod se tedy v turonu ve studované oblasti bezpochyby vyskytují také staré podzemní vody, což naznačuje existenci několika nezávislých proudových systémů, které nebylo možné vysvětlit tehdy přijímaným konceptuálním modelem s jediným turonským kolektorem C.

Ve studovaném území se nachází řada jímacích vrtů pro zásobování pitnou vodou, místy s mimořádně vysokou kvalitou vody. Největší soustředěné odběry se nacházejí v jímacích územích Řepín (cca 360 l/s) a Bělá (více než 200 l/s), která jsou společně schopna zásobovat pitnou vodou více než 300 tisíc obyvatel.

Studovaným územím protéká několik povrchových toků. Nejvýznamnější jsou řeka Jizera, která tvoří východní hranici oblasti, a řeka Labe, vymežující její západní hranici; jižně od studovaného území se Jizera vlévá do Labe. Severní část území je odvodňována řekou Ploučnicí a jejími přítoky. Dalšími významnými vodními toky jsou Košátecký potok, Liběchovka a Pšovka v povodí Labe a Strenický potok, Bělá a Zábrdka v povodí Jizery.

3. Metodika

3.1 Určení hydrostratigrafie

Hydrostratigrafií míníme rozdělení proudových systémů podzemní vody do jednotlivých kolektorů. Hydrostratigrafie byla stanovena na základě měřené výšky hladiny podzemní vody ve vrtech, výškové úrovně jejich perforovaných úseků a nadmořské výšky rozhraní oddělujících cenomanské a turonské genetické sekvence (CEN vs. TUR1–5). Báze genetických sekvencí byly určeny na základě karotážních měření (rezistivimetrie a gama-gama) ve 130 vrtech, a to podle metodiky [Uličného et al. \(2009\)](#) a s využitím aktualizovaného souboru nadmořských výšek ohraničujících jednotlivé sekvence. Tyto báze laskavě poskytli

dr. D. Uličný a dr. L. Špičáková z Geofyzikálního ústavu Akademie věd ČR, v.v.i. za přispění Mgr. J. Bohadla z České geologické služby.

Dohromady bylo využito 862 vrtů s údaji o hladině p. v. z databáze Geofond ([Geofond, 2026](#)), které byly podle otevřených úseků přiřazeny k jednotlivým genetickým sekvencím. Genetické sekvence vykazující v daném místě podobné úrovně hl. p. v. byly interpretovány jako totožný kolektor, zatímco sekvence vykazující významné rozdíly v hl. p. v. byly interpretovány jako dva odlišné kolektory oddělené izolátorem. Tento přístup umožnil nové vymezení kolektorů a izolátorů dle objektivních dat.

Dle náhlých změn v nadmořské výšce bází genetických sekvencí jsme dále vymezili vyzdvižené horninové bloky. Průběh bazických žil jsme převzali z geologických map ([ČGS, 2026b](#)) a doplnili o další lineamenty identifikované z digitálního modelu reliéfu DMR 5G ([DMR 5G, 2026](#)).

3.2 Měření průtoků

Na vybraných tocích s výskytem staré vody bylo prováděno dlouhodobé měření průtoku. Celkem byl monitoring prováděn na deseti objektech. Zhruba ve dvouměsíčním intervalu byl měřen průtok rychlostní metodou, metodou ředění nebo objemovou metodou. Rychlostní metoda spočívá v měření rychlosti proudění pomocí přístroje FlowTracker2 v několika bodech a hloubkách v profilu skrz tok. Z těchto hodnot se vypočítá rychlostní profil proudění přes známou plochu, což udává průtok v místě měření. Metoda ředění spočívá v injektáži známého množství rozpuštěného NaCl do toku a sledování průběhu jeho koncentrace níže po proudu, kde je napříč tokem umístěno až pět konduktometrů s automatickým záznamem po pěti sekundách. Vztah mezi konduktivitou a koncentrací NaCl je stanoven kalibrací. Vzdálenost místa měření konduktivity od místa injektáže musí být dostatečně velká, aby došlo k rovnoměrnému rozmíchání injektované soli v toku. V každém místě měření byly provedeny tři injektáže NaCl, což vedlo až k 15 nezávislým hodnotám průtoku na profil (pro každý konduktometr a injektáž). Objemová metoda spočívá v měření času plnění kalibrované nádoby. Na 7 objektech bylo manuální měření doplněno o měření výšky hladiny nad přelivem ([obr. 1](#)) s automatickým záznamem dat po jedné hodině.

Vybrané lokality se nacházely v povodích Strenického potoka, Bělé, Liběchovky a Pšovky. Strenický potok je z většiny dotován základním odtokem z hlubších zón a jeho průtok je relativně stálý v čase. První lokalita monitoringu byla na Strenickém potoce v Krnsku před ústím do Jizery. Druhá lokalita je Strenický potok u obce Cetno, která se nachází nad dvěma prameny vod s nízkou koncentrací tritia. Třetí lokalita je výtok staré vody z vodárny u obce Cetno. Čtvrtá lokalita je pramen PP0230 monitorovaný v současnosti ČHMÚ v obci Podkováň. Tento pramen je jeden z vydatných zdrojů v prameništi Podkováň s nízkou aktivitou tritia. Pátou lokalitou je Velký pramen v Podkováňském prameništi, což je nejvydatnější zdroj v prameništi. Nachází se tu historický přepad ČHMÚ (v minulosti sledován jako PP00229), který však již ČHMÚ nemonitoruje. Šestá lokalita je Strenický potok nad Podkováňským prameništěm. Znalost průtoku Strenického potoka nad a pod

prameništi (rozdíl průtoku z lokalit 1 a 6) umožňuje určit celkovou vydatnost vod prameniště se starými vodami. Sedmá lokalita je pramen Klokočka, který se nachází u vodního toku Rokytka ve Velkém Rečkově. Osmá lokalita je drobný pramen s nízkým obsahem tritia u obce Nedamov na horní Liběchovce. Devátá lokalita je Nedamov, mlýnek, což je pramenný tok s nízkým obsahem tritia. Desátou lokalitou je pramen Stříbrník poblíž Vojtěchova v Kokořínském důlu u Pšovky, který je částečně jímán jako zdroj pitné vody.



Obr. 1. Sledované objekty s automatickým měřením výšky hladiny nad přelivem a manuálním měřením průtoku.

3.3 Hydrochemie a environmentální stopovače

Za účelem vymezení proudových systémů podzemní vody a stanovení původu a doby zdržení podzemní vody ve studovaném území byly odebrány vzorky pro následné hydrochemické a izotopové analýzy. Celkově bylo vzorkováno 92 objektů s měřeními fyzikálně-chemickými parametry. Celkově byly odebrány následující počty vzorků pro příslušné analýzy: 59 chemických rozborů, 31 vzorků na ^2H a ^{18}O , 71 vzorků na ^3H , 41 vzorků na ^{13}C , 20 vzorků na ^{14}C , 36 vzorků na freony a SF_6 , 4 vzorky na vzácné plyny a 3 vzorky na ^{39}Ar , ^{85}Kr . Tato poměrně rozsáhlá databáze hodnot byla dále rozšířena o data z předchozího projektu Rebilance. Níže popisujeme metodiku jednotlivých metod. Výsledky jednotlivých metod a jejich interpretace jsou uvedeny v kapitolách 4 a 5. Podrobná data včetně souřadnic všech vzorkovaných objektů jsou součástí přílohy volně dostupného článku [Bruthans et al. \(2026\)](https://www.mdpi.com/article/10.3390/w18060683/s1) pod tímto odkazem:

<https://www.mdpi.com/article/10.3390/w18060683/s1>.

Většina vzorkovaných vrtů byly jímací objekty využívané pro zásobování pitnou vodou, a byly tak vybaveny ponornými čerpadly a vystaveny intenzivnímu čerpání. Odběr vzorků z monitorovacích vrtů byl časově a logisticky náročný, protože bylo potřeba nejprve z vrtu odčerpat alespoň 3 objemy vody ve vrtu, aby byla bezpečně vzorkována podzemní voda z okolního horninového prostředí, a nikoliv stagnující voda ve vrtu.

Podzemní voda byla odebírána plastovou hadicí pevně připojenou k ventilu, přičemž při odběru vzorků pro analýzu plyných stopovačů bylo dbáno na zamezení kontaktu vody se vzduchem. Při odběru vzorků pro analýzu plyných stopovačů z vodních toků a pramenů byly vzorky odebírány pomocí ponorného čerpadla.

V terénu byly měřeny základní fyzikálně-chemické vlastnosti vody: elektrická vodivost (EC) pomocí přístroje Cond 3310 se sondou TetraCon (WTW, Německo), přičemž hodnoty byly normalizovány na 25 °C; obsah rozpuštěného kyslíku pomocí přístroje Multi 3630 IDS s optickým senzorem IDS FDO 925 (WTW, Německo); pH a oxidačně-redukční potenciál byly měřeny přístrojem GMH 3531 se sondami pH a ORP GE100-BNC a GR105-BNC (Greisinger, Německo).

Vzorky pro analýzu kationtů a aniontů byly v terénu filtrovány přes Millipore membránové filtry z celulózy o velikosti pórů 0,45 μm připojené k injekční stříkačce a přefiltrovaná voda byla uchovávána v lahvích Nalgene. Vzorky pro stanovení kationtů byly stabilizovány ultračistou kyselinou dusičnou. Vzorky pro stanovení alkality nebyly filtrovány.

3.3.1 Hydrochemické analýzy

Kationty byly analyzovány metodou plamenové atomové absorpční spektrometrie, resp. pomocí ICP-OES Prodigy7 (Teledyne Leeman Labs, USA), anionty byly analyzovány metodou vysokoúčinné kapalinové chromatografie, resp. na přístroji DIONEX AQUION (Thermo Fischer Scientific, USA), a alkalita byla stanovena titrační metodou. Analýzy probíhaly ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka. Tendence vzorkovaných vod ke srážení či rozpouštění minerálů byla modelována pomocí geochemického kódu PHREEQC (Parkhurst a Appelo, 2013) a s využitím termodynamické databáze PHREEQC.

Na chemických datech byla provedena analýza hlavních komponent (principal component analysis, PCA) pomocí programu PAST (Hammer a Harper, 2001). PCA je vícerozměrná statistická metoda používaná pro redukci počtu proměnných před klasifikací dat, včetně jejich vizualizace. PCA transformuje data tak, aby hlavní komponenty byly navzájem nekorelované. Hlavní komponenty jsou lineární kombinace původních proměnných, které nejlépe vysvětlují celkovou variabilitu dat.

3.3.2 Stabilní izotopy O, H

Izotopy kyslíku a vodíku ve vodě byly odebírány do HDPE lahví Nalgene. Stabilní izotopové složení kyslíku ($\delta^{18}\text{O}$) a vodíku ($\delta^2\text{H}$) ve vzorcích vody bylo stanoveno pomocí analyzátoru Picarro L2130-i využívajícího metodu cavity ring-down spectroscopy (CRDS) (Picarro, USA) na Univerzitě Karlově v Praze. Přístroj byl kalibrován pomocí mezinárodně uznávaných standardů VSMOW, SLAP a GISP. Výsledky jsou uváděny pomocí

izotopové odchylky δ (‰), relativně vůči standardu Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW). Analytická chyba činila $\pm 0,03$ ‰ pro $\delta^{18}\text{O}$ a $\pm 0,09$ ‰ pro $\delta^2\text{H}$.

3.3.3 Vzácné plyny

Pomocí metody Noble Gas Temperature (NGT) byla stanovena teplota vzduchu v době infiltrace vody, používaná jako proxy údaj pro identifikaci infiltrační oblasti a/nebo období infiltrace. Metoda spočívá ve stanovení koncentrací rozpuštěných vzácných plynů (Ar, Ne, Kr, Xe a He) ve vodě. Protože jejich rozpustnost závisí na teplotě, lze z naměřených koncentrací rekonstruovat teplotu vzduchu v době infiltrace ([Aeschbach-Hertig a Salomon, 2013](#)).

Odběr vzorků probíhal pomocí měděných trubic podle standardizovaných protokolů USGS (Geologické služby Spoj. států; [Hunt, 2015](#)). Měděné trubice byly připojeny ke vzorkovanému objektu pomocí průhledných hadic, přičemž bylo zajištěno, aby nedocházelo k přisávání vzduchu ani k přítomnosti viditelných vzduchových bublinek. Voda byla systémem proplachována při sníženém výtokovém průtoku, aby se zabránilo odplynění, poté byly měděné trubice uzavřeny kovovými svorkami a izolovány od atmosféry, aby se zabránilo výměně plynů s atmosférou ([obr. 2](#)). Odběr proběhl pro 4 objekty: jímací vrt Ř8A z jímacího území Řepín, jímací vrt KL7 z jímacího území Bělá, dále monitorovací vrt 111062T (DIAMO, s.p.) a z Kováneckého pramene.



Obr. 2. Odběr vzorků pro analýzu vzácných plynů (Kovánecký pramen).

Vzácné plyny byly extrahovány metodou vysokého vakua a následně čištěny a separovány kryogenními technikami v laboratoři Dissolved Gas Laboratory na University of Utah (USA). Helium bylo měřeno na přístroji

Thermo Scientific Helix SFT (Thermo Fischer Scientific, Německo) a těžké vzácné plyny byly analyzovány pomocí kvadrupólového hmotnostního spektrometru (Hiden Analytical, UK).

3.3.4 Analýza ^{13}C a ^{14}C

Dle metodiky dr. K. Žáka z České geologické služby byly vzorkovnice se vzorkem pro analýzu stabilního izotopu uhlíku ^{13}C a radioaktivního izotopu ^{14}C obráceny dnem vzhůru a přes uzávěr do nich byl injektován roztok BaCl_2 a NaOH tak, aby se zabránilo úniku CO_2 . Cílem bylo veškerý rozpuštěný anorganický i plynný uhlík vysrážet s baryem za vzniku sraženiny BaCO_3 , která byla následně ihned vakuově filtrována (4 μm) a promyta zchlazenou, předem převařenou destilovanou vodou za účelem odstranění nereagovaného BaCl_2 a NaOH . Sraženina byla sušena při laboratorní teplotě a rozemleta na analytickou jemnost.

Pro analýzu ^{13}C bylo BaCO_3 rozloženo 100% H_3PO_4 ve vakuu a izotopové složení uhlíku v uvolněném CO_2 bylo stanoveno pomocí hmotnostního spektrometru Thermo Finnigan Delta V v laboratořích České geologické služby. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ jsou uváděny relativně ke standardu Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) s analytickou chybou $\pm 0,1 \text{ ‰}$.

Vzorky pro analýzu ^{14}C byly analyzovány metodou urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS). Grafítizované vzorky byly měřeny na systému MICADAS AMS na pracovišti DeA (Atomki, Maďarsko). Počáteční aktivita A_0 byla přednostně stanovena pomocí Pearsonova modelu a následně ověřena pomocí modelů Mook a Fontes-Garnier (Clark, 2015). Použité vstupní hodnoty byly $\delta^{13}\text{C} -23 \text{ ‰}$ pro půdní CO_2 a $+3 \text{ ‰}$ pro mořské karbonáty.

3.3.5 Datování pomocí tritia a CFC (freonů) a SF_6

Aktivita tritia (^3H) byla stanovena pomocí kapalinového scintilačního spektrometru TriCarb 3170 Tr/SL (PerkinElmer, USA) na Univerzitě Karlově v Praze. Vzorky byly před měřením obohaceny elektrolýzou v poměru 1:10. Každý vzorek byl měřen ve čtyřech po sobě jdoucích cyklech, každý o délce 700 minut. Směrodatná odchylka činila 0,6 tritiových jednotek (TU) a aktivita tritia byla přepočtena k datu odběru.

Freony CFC-11, CFC-12 a CFC-113, stejně jako plyn SF_6 , byly analyzovány v laboratoři Spurenstofflabor (Německo) metodou plynové chromatografie s purge-and-trap systémem a detektorem elektronového záchytu. Byly odebrány dva paralelní vzorky do speciálních skleněných lahví umístěných v kovovém obalu. Koncentrace CFC a SF_6 byly stanoveny plynovou chromatografií podle standardní metodiky (IAEA, 2006).

3.3.6 Datování pomocí ^{39}Ar a ^{85}Kr

Doba zdržení podzemní vody byla rovněž stanovena pomocí metody ATTA (Atom Trap Trace Analysis), což je metoda založená na počítání atomů pro stanovení koncentrací rozpuštěného ^{39}Ar a ^{85}Kr v podzemní vodě (Musy et al., 2025). Množství ^{39}Ar , kosmogenního radionuklidu s poločasem rozpadu 269 let, se po infiltraci vody a jejím oddělení od atmosféry začíná snižovat vlivem radioaktivního rozpadu, což umožňuje výpočet doby zdržení podzemní vody. ^{85}Kr , antropogenní radionuklid, který se v prostředí nevyskytoval před rokem 1950 a má poločas rozpadu 10,7 roku, byl použit jako doplňkový stopovač pro odhad podílu moderní vody.

V terénu byla odebíraná voda odplyňována pomocí zařízení pro degazaci podzemní vody (obr. 3). Zařízení bylo těsně připojeno ke vzorkovanému objektu, voda jím protékala a extrahovaný plyn byl shromažďován do vzduchotěsných vaků o objemu přibližně 8 litrů. Odebraný plyn byl následně v laboratoři čištěn a počty atomů ^{39}Ar a ^{85}Kr byly stanoveny pomocí laserového počítání atomů v magnetooptické pasti, což umožňuje extrémně citlivou detekci na úrovni jednotlivých atomů. Měření byla provedena v Laser Laboratory for Trace Analysis and Precision Measurements na University of Science and Technology of China v Hefei (Čína). Výpočty doby zdržení byly korigovány na poměry $^{39}\text{Ar}/\text{Ar}$ v atmosféře podle Gu et al. (2021). Protože se jedná o na odběr složitou a finančně náročnou techniku, byly odebrány tři vzorky: jímací vrt Ř8A z jímacího území Řepín, jímací vrt KL7 z jímacího území Bělá, Kovánecký pramen.

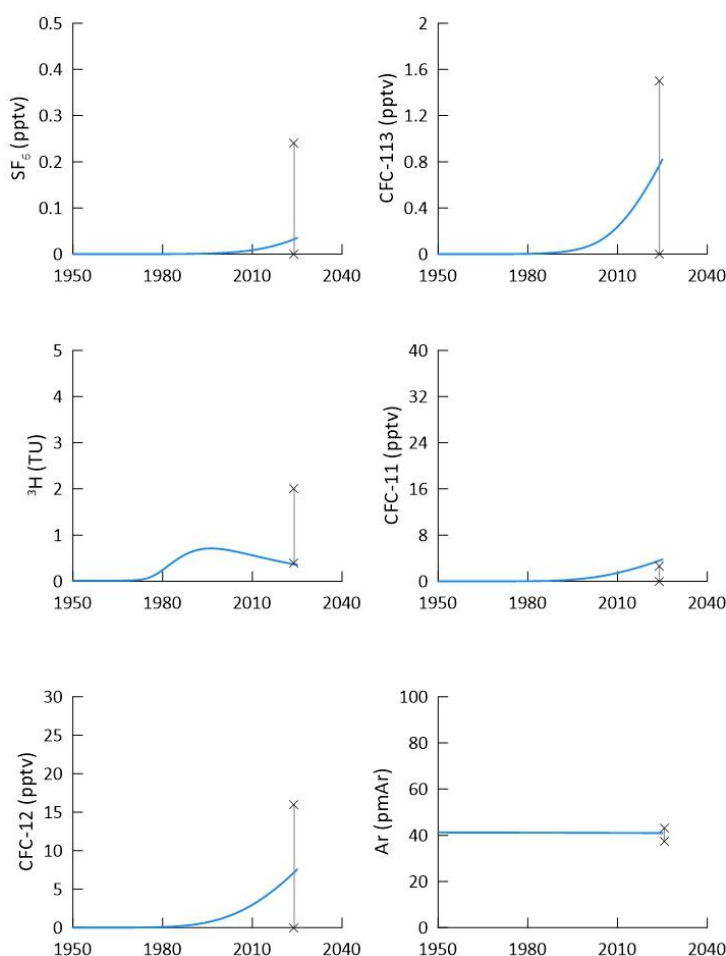


Obr. 3. Odběr vzorků pro analýzu ^{39}Ar , ^{85}Kr (vrt KL7).

3.3.7 Modelování střední doby zdržení

Na základě analýz freonů (CFC-11, CFC-12 a CFC-113), SF₆, ³H a ³⁹Ar, a s přihlédnutím k výsledkům analýz ⁸⁵Kr a ¹⁴C byla stanovena střední doba zdržení podzemní vody. Modelování (obr. 4) bylo provedeno v programu TracerLPM od USGS (Geologické služby Spoj. států, Jurgens et al., 2012). Jako vstupní data modelu byla použita aktivita tritia ve srážkách ve Vídni a obsah CFC a SF₆ ve vzduchu severní polokoule (Jurgens et al., 2012; IAEA/WMO, 2018).

Vzhledem k předpokladu mísení dvou odlišných složek podzemní vody (zde označovaných jako mladá a stará) bylo modelování primárně prováděno pomocí binárního míscího modelu, který simuluje mísení dvou složek podzemní vody různého stáří v kvantifikovatelných poměrech. Stáří staré složky bylo odvozeno z analýz ³⁹Ar na lokalitách, kde tato složka dominovala, a bylo vždy aproximováno pomocí disperzního modelu.



Obr. 4. Ukázka fitování křivek environmentálních stopovačů na měřená data z programu TracerLPM (jímací vrt Ř8A v Řepíně).

Stáří mladé složky bylo na většině lokalit modelováno pomocí disperzního modelu a v menší míře pomocí exponenciálně-pístového modelu, který kombinuje charakteristiky exponenciálního a pístového proudění; oba přístupy však poskytly velmi podobné výsledky. Pro dosažení co nejlepší shody mezi modelovanými křivkami stopovačů a naměřenými koncentracemi byly relativní podíly mladé a staré vody iterativně upravovány, dokud nebyla dosažena maximální shoda (**obr. 4**).

Relativní podíly staré a mladé složky podzemní vody byly takto odhadnuty pro každý stanovovaný objekt. Pro objekty vykazující binární mísení byla střední doba zdržení vypočtena jako vážený průměr stáří obou složek a jejich podílů na celkovém složení podzemní vody. Na některých lokalitách, zejména u pramenů s dominancí mladé podzemní vody, nebylo možné data stopovačů uspokojivě reprodukovat pomocí binárního mísicího modelu; tyto lokality byly proto popsány pomocí jednosložkového exponenciálního modelu.

3.3.8 Tvorba účelové mapy zájmové hydrogeologické struktury

Na základě podkladů z vlastní rešerše vytvořené v průběhu prvního roku projektu a zejména s využitím nově zjištěných informací o výskytu a proudění podzemní vody a hladin ve vrtech byla vytvořena účelová mapa zájmové hydrogeologické struktury.

3.3.9 Konstrukce geologických řezů zájmovou oblastí

Na základě dat z karotáže vrtů byly sestaveny geologické řezy jímacími územími Bělá a Řepínský důl a údolím Strenického potoka. K tomu bylo využito celkem 37 vrtů s karotážními daty. Do řezů byly dále zakresleny další vodárenské vrty bez karotáže pro interpretaci, ve kterých vertikálních úsecích jsou tyto vrty otevřené a s jakým horninovým prostředím tedy komunikují. V řezech jsou zobrazeny také přítoky vody do vrtu zjištěné z čerpacích zkoušek a metodou ředění označené kapaliny ve vrtu. Tyto přítoky umožňují určit, z jakého kolektoru pochází jímaná voda.

Pro rozlišení jednotlivých vrstev v řezu byly využity karotážní měření ve vrtu, konkrétně gama karotáž a zdánlivý měrný odpor (RAPS). Interpretace karotážních křivek a geologické zařazení bylo prováděno podle [Uličného et al. \(2009\)](#). Na základě fyzikálních parametrů je možné křídové sedimenty rozdělit na tři hlavní skupiny: 1) Horniny s vysokým obsahem jílových minerálů, typicky slínovce, které mají vyšší radioaktivitu, nižší odpor a většinou fungují jako poloizolátory až izolátory (v řezech tmavě šedě); 2) Horniny bez jílových minerálů, což jsou kvádrové pískovce, které mají nízkou radioaktivitu a vysoký odpor, a fungují jako kolektory (v řezech barevně), a 3) Horniny s příměsí jílových minerálů, většinou vápnité pískovce, které často fungují jako poloizolátory, ale vlivem krasovění se v nich mohou vytvářet velmi propustné kanály a mohou tak tvořit nejpropustnější část kolektoru (v řezech šedě).

3.3.10 Návrh ochrany dané hydrogeologické struktury

Na základě všech výše uvedených informací a dat byla navržena ochrana hydrogeologické struktury s výskytem podzemních vod s dlouhou dobou zdržení. Ochrana je navrhována v ploše výskytu těchto vod, s důrazem na vymezení infiltrační oblasti a na charakter a mocnost nadložních vrstev. Ochrana je navržena primárně jako ochrana množství podzemní vody s dlouhou dobou zdržení, v infiltrační oblasti s nedostatečnou mocností krycích vrstev je navrhována i ochrana kvality.

4. Výsledky projektu

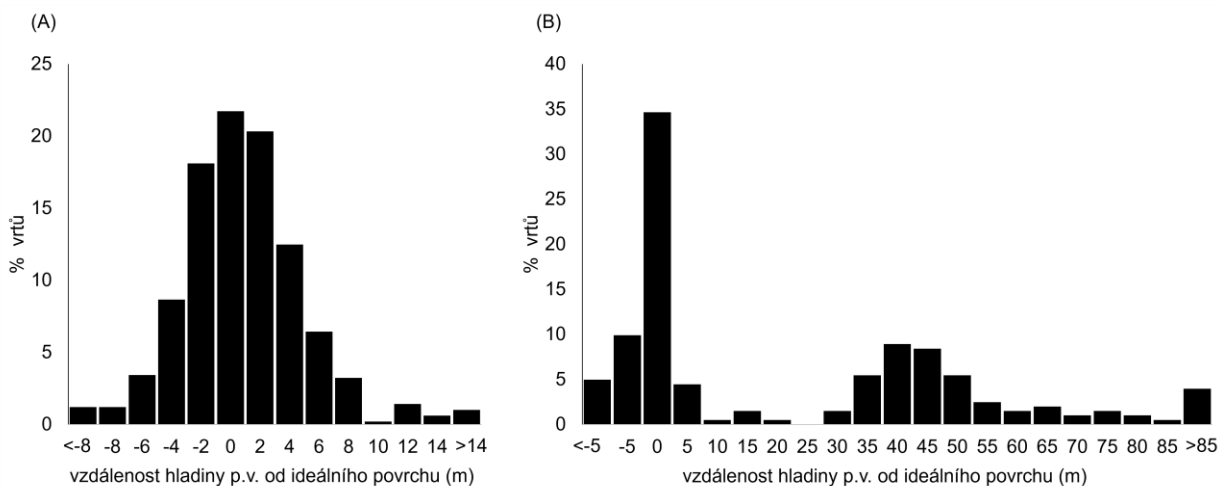
4.1. Určení hydrostratigrafie, vymezení kolektorů a hlavních strukturních prvků ovlivňujících proudění podzemní vody

Pro jednotlivé turonské genetické sekvence bylo testováno, zda jsou úrovně hladiny podzemní vody ve vrtech s perforací v těchto sekvencích v dané lokalitě shodné, což by znamenalo, že tvoří společný kolektor, nebo zda se liší, což by poukazovalo na hydraulicky nezávislé kolektory. Na základě těchto kritérií byly ve studovaném území vymezeny tři kolektory.

Na bázi se nachází kolektor A, vyvinutý v cenomanských křemenných pískovcích o mocnosti 30–70 m. Kolektor A byl definován již dříve a není hlavní náplní projektu. Od nadložních vrstev je oddělen izolátorem o mocnosti 40–80 m, tvořeným jílovcem a slínovcem.

Nad tímto izolátorem je vymezen kolektor Ca, vyvinutý v rámci genetických sekvencí TUR3 a TUR4, o mocnosti 140–180 m (Uličný et al., 2009). Úrovně hladiny podzemní vody v perforovaných úsecích vrtů zasahujících do TUR3 a TUR4 jsou v blízkých vrtech shodné, což indikuje existenci společného kolektoru (obr. 5). Tento kolektor je tvořen jak hrubozrnnými křemennými pískovci proximální facie, tak jemnozrnnými vápnatými pískovci a polohami písčitých vápenců přechodní facie.

Nad ním se nachází kolektor Cb, vyvinutý v rámci TUR5 a denudačních reliktních vrstev TUR6. Je tvořen hrubozrnnými křemennými pískovci, hrubě až jemnozrnnými vápnatými pískovci s častými raně diagenetickými karbonátovými konkrecemi a tenkými polohami písčitých vápenců. Tento kolektor se vyskytuje v jižní a centrální části studovaného území, zatímco v severní části je z velké části erodován. Na bázi TUR5 se nachází polopropustný izolátor, který podmiňuje samotnou existenci kolektoru Cb.



Obr. 5. Histogramy porovnávající úrovně hladiny podzemní vody ve vrtech s perforací v turonských vrstvách s rekonstruovanou úrovní hladiny v kolektoru Ca. (A) Úrovně hladiny podzemní vody ve vrtech s perforací v TUR3 a TUR4 ($n = 497$ vrtů) ukazují, že většina vrtů spadá do intervalu ± 5 m od rekonstruované hladiny kolektoru Ca, což naznačuje, že tyto jednotky tvoří společný kolektor. (B) Naproti tomu přibližně 50 % úrovní hladiny podzemní vody v TUR5 ($n = 202$ vrtů) se nachází o 30–100 m výše než hladina v kolektoru Ca, což dokládá, že TUR5 tvoří samostatný kolektor. Zbývajících 50 % vrtů má hladinu na úrovni kolektoru Ca v důsledku ztenčení izolátoru v údolích a existence četných vrtů, které vytvářejí hydraulické propojení (zkrat) mezi kolektory Ca a Cb.

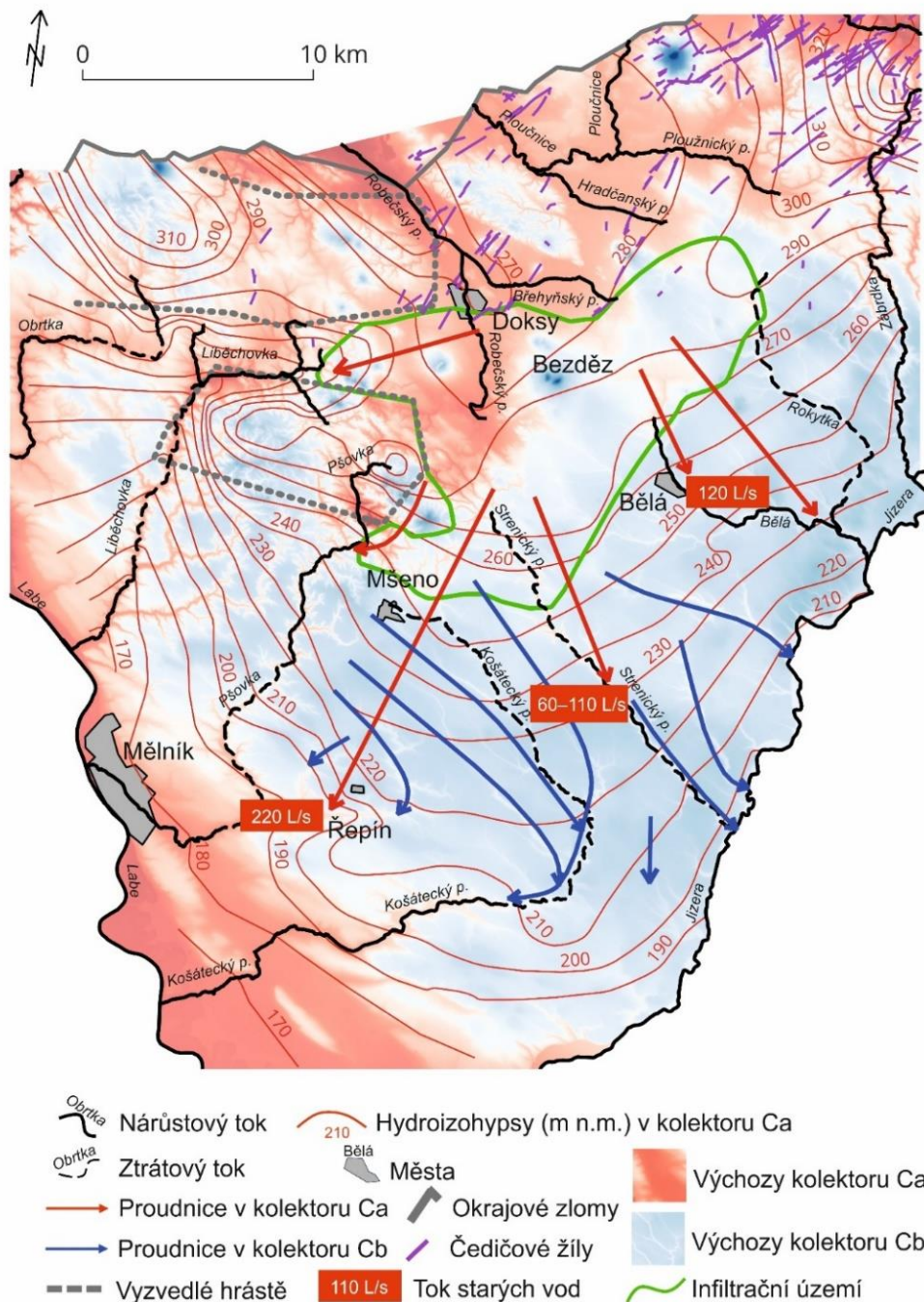
Dříve byl ve studovaném území vymezován pouze jediný turonský kolektor (Corcho Alvarado et al., 2011; Herčík et al., 1999), či byly kolektory Ca a Cb identifikovány, ale nebyly v nich výše popsáním způsobem odděleny hladiny (Kůrková et al., 2016a,b). Toto pojetí však bylo v rozporu s výrazně odlišnými úrovněmi hladiny podzemní vody pozorovanými v kolektorech Ca a Cb. Kolektor Ca je nejvýznamnějším kolektorem jak z hlediska proudění podzemní vody, tak z hlediska jejích odběrů. Hladina podzemní vody v kolektoru Ca je znázorněna na obr. 6. Vzhledem k přílišné rozkolísanosti měřené hladiny v kolektoru Cb není možné ji vykreslit do mapy.

Hladina podzemní vody v kolektoru A je v průměru o 26 m nižší než v kolektoru Ca, s výjimkou drenážních oblastí, kde ji lokálně převyšuje. Naproti tomu hladina podzemní vody v kolektoru Cb se obecně nachází o 40–100 m výše než v kolektoru Ca. V místech, kde vrty hydraulicky propojují kolektory Ca a Cb nebo kde dochází k porušení izolátoru mezi Ca a Cb kvůli ztenčení mocnosti nadloží a přípovrchovému zvětrání, však dochází ke snížení hladiny v kolektoru Cb na úroveň kolektoru Ca v důsledku hydraulického zkratu.

Hodnoty specifické vydatnosti (l/s/m) z čerpacích zkoušek získané z databáze Geofond byly přepočteny na koeficienty transmisivity (m²/den) podle [Krásného \(1993\)](#). Podle této klasifikace jak kolektor Ca (průměrná transmisivita 425 m²/den; n = 212), tak kolektor Cb (průměrná transmisivita 655 m²/den; n = 43) odpovídají prostředí s vysokou transmisivitou. Rozsah transmisivity v kolektoru Ca je téměř 4 řády (2–12 500 m²/den) a v kolektoru Cb 5 řádů (0,1–9300 m²/den), což je pravděpodobně dáno střídáním méně a více propustných (vápnitých a zkrasovělých) poloh.

V západní části studovaného území se nacházejí dva vyzdvižené horninové bloky (hrástě), kde báze kolektoru Ca leží nad místní erozní bází, čímž dochází k blokování proudění podzemní vody směrem k jihozápadu ([obr. 6](#)). V severovýchodní části území se vyskytuje řada čedičových žil směru SV–JZ, které působí jako bariéry proudění podzemní vody k jihovýchodu. Pouze ve střední části studovaného území se nevyskytuje žádná geologická bariéra a pozvolně ukloněná báze kolektoru Ca k jihovýchodu tak umožňuje proudění podzemní vody směrem k hlavní erozní bází, představované řekami Jizerou a Labem ([obr. 6](#)).

Za infiltrační oblast lze považovat vyvýšenou oblast okolí Bezdězu, charakterizované velmi plochou hladinou podzemní vody. To je potvrzeno i geometrií hladiny v kolektoru Ca, která má vějířovitý tvar, naznačující, že z této vyvýšené oblasti odtéká relativně velké množství podzemní vody do více směrů: k jihu, jihozápadu a jihovýchodu ([obr. 6](#)).

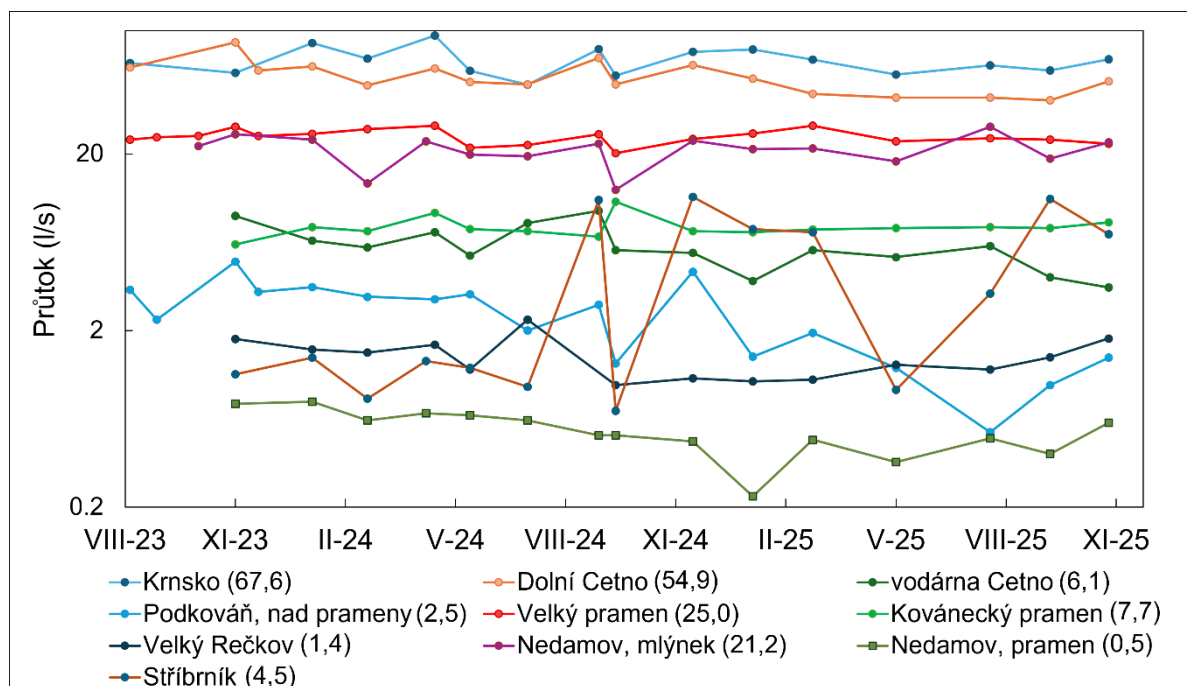


Obr. 6. Mapa zájmového území znázorňující výskyt obou kolektorů, hrástí a bazických žil blokujících proudění podzemní vody. Zeleně ohraničená infiltrační oblast starých vod je vymezena na základě hydroizohyps v kolektoru Ca, mocnosti nadloží kolektoru Ca i měření průtoků na povrchových tocích a bilancování toku vody

v různých povodích vůči základnímu odtoku. Dále jsou vyobrazeny povrchové toky s jejich ztrátovými a přítokovými úseky (dle Bruthanse et al., 2026), hladina podzemní vody v kolektoru Ca, směry proudění v kolektorech, kvantifikace toku staré podzemní vody a další details dle legendy. Tmavší modré oblasti indikují větší mocnost výchozů kolektoru Cb, bílé oblasti značí přechod mezi výchozy Cb a Ca, tmavší červené oblasti ukazují hluboce erodované výchozy hornin kolektoru Ca. Rozsah toku starých vod k Strenickému potoku je dán časovým obdobím, ke kterým je vztažen (archivní data z projektu Rebilance vykazují vyšší průtoky než v sledovaném období v rámci projektu).

4.2. Měřené průtoky

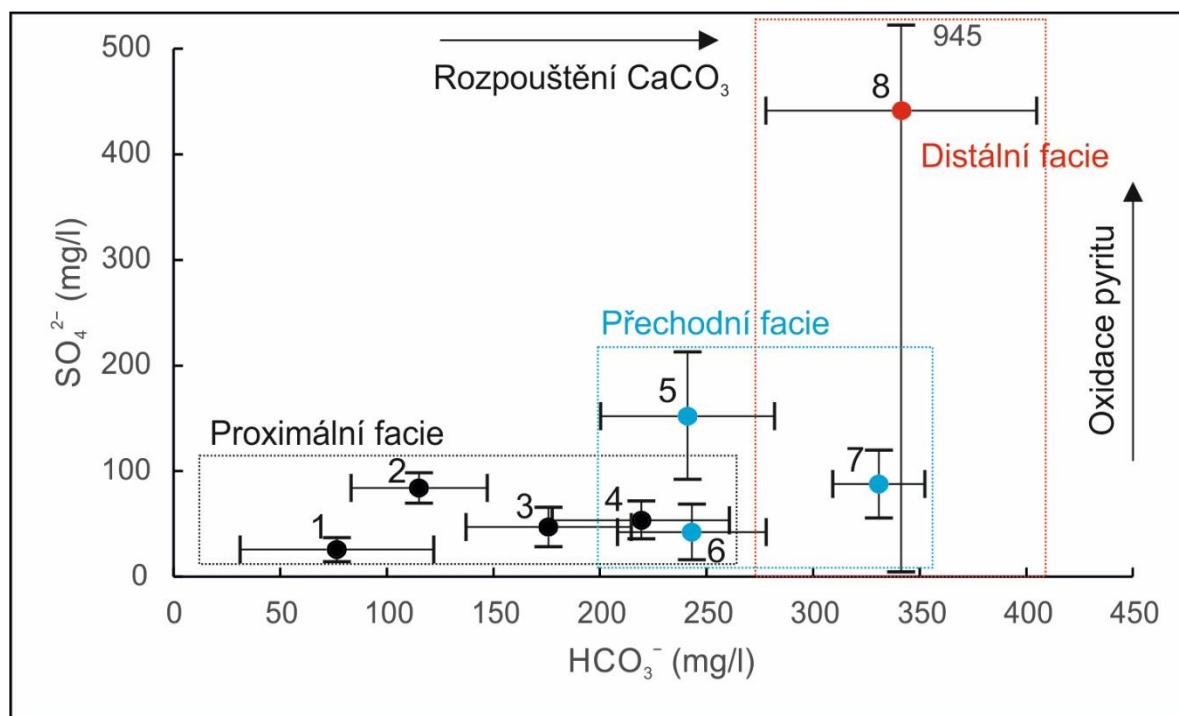
Sledované objekty na Strenickém potoce vykazují stálou vydatnost v čase, která, mimo horní úsek nad prameništěm, kolísá vydatnost pouze o 20 %. To značí delší oběh vody bez aktuálních meteorologických vlivů. To neplatí pro horní tok nad prameništěm, který v průběhu roku výrazně kolísá. V letním bezsrážkovém období tam teklo pouze 0,5 l/s, naopak ve vlhčím období až 5 l/s. Z rozdílu průtoků v Krnsku a nad prameništěm je možné určit celkovou vydatnost starých vod na Strenickém potoce, která ve sledovaném období dosahovala 65 l/s a tvoří přibližně 95 % vodnosti Strenického potoka před ústím do Jizery. Průměrná vydatnost pramene Klokočka je 1,4 l/s a v čase kolísá pouze o 25 %, což značí stálost v čase. Jak lokalita Nedamov pramen, tak Nedamov mlýnek vykazují stálost průtoků v čase, která kolísá do 25 %. Výrazně odlišná je situace u pramene Stříbrník, u něhož vydatnost ve sledovaném období kolísala od 0,8 do 11,4 l/s. Tento výrazný rozptyl je však dán tím, že se jedná o přetok z jímací štoly, která je využívána k vodohospodářským účelům a standardně se velká část odvádí do vodovodní sítě. Ve sledovaném období však docházelo k rekonstrukci štoly a vypouštění veškeré vody do přepadu. Z tohoto důvodu není možné určit stálost pramene v čase. Veškeré naměřené hodnoty průtoků zobrazuje **obr. 7**.



Obr. 7. Vydátnost sledovaných objektů v čase. Čísla v závorkách uvádějí průměrný průtok (l/s) v průběhu měřeného časového období.

4.3. Hydrochemie

Pro turonské kolektory bylo pro studované území k dispozici celkem 170 chemických analýz, převážně pramenů z databáze Rebilance, spolu s 59 novými analýzami (převážně z vrtů). Testování korelací mezi jednotlivými chemickými složkami a využití PCA analýzy odhalilo významnou vzájemnou korelaci mezi dvěma skupinami iontů: (1) SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ a Cl^- a (2) HCO_3^- , Ca^{2+} . Variabilitu chemického složení je proto možné do značné míry redukovat na binární diagram, ve kterém každá osa reprezentuje jednu z těchto skupin, tj. SO_4^{2-} a HCO_3^- (obr. 8), jak bylo potvrzeno PCA analýzou.



Obr. 8. Binární diagram koncentrací SO_4^{2-} a HCO_3^- s vyznačenými rozsahy hodnot pro jednotlivá prostředí. Hodnoty pro distální facii jsou převzaty z projektu Rebalance mimo studované území. V diagramu je pomocí čísel vyznačeno několik oblastí: 1 – proximální facie (severní část české křídové pánve); 2 – proximální facie (Český ráj); 3 – proximální facie (povodí Liběchovky); 4 – proximální facie (povodí Pšovky); 5 – přečodní facie (povodí Pšovky); 6 – přečodní facie v povodí Bělé, jímací území Bělá, Zábrdka, Liběchovka, severní část české křídové pánve a Strenický p.; 7 – přečodní facie jímacího území Řepín, Obrtka a Košátecký p.; 8 – distální facie (Roudnice). Vyšší obsah SO_4^{2-} v oblasti 2 je způsoben nadložní vrstvou jílovitých sedimentů s pyritem. Uvedeny jsou průměrné hodnoty (body) a směrodatné odchylky (úsečky).

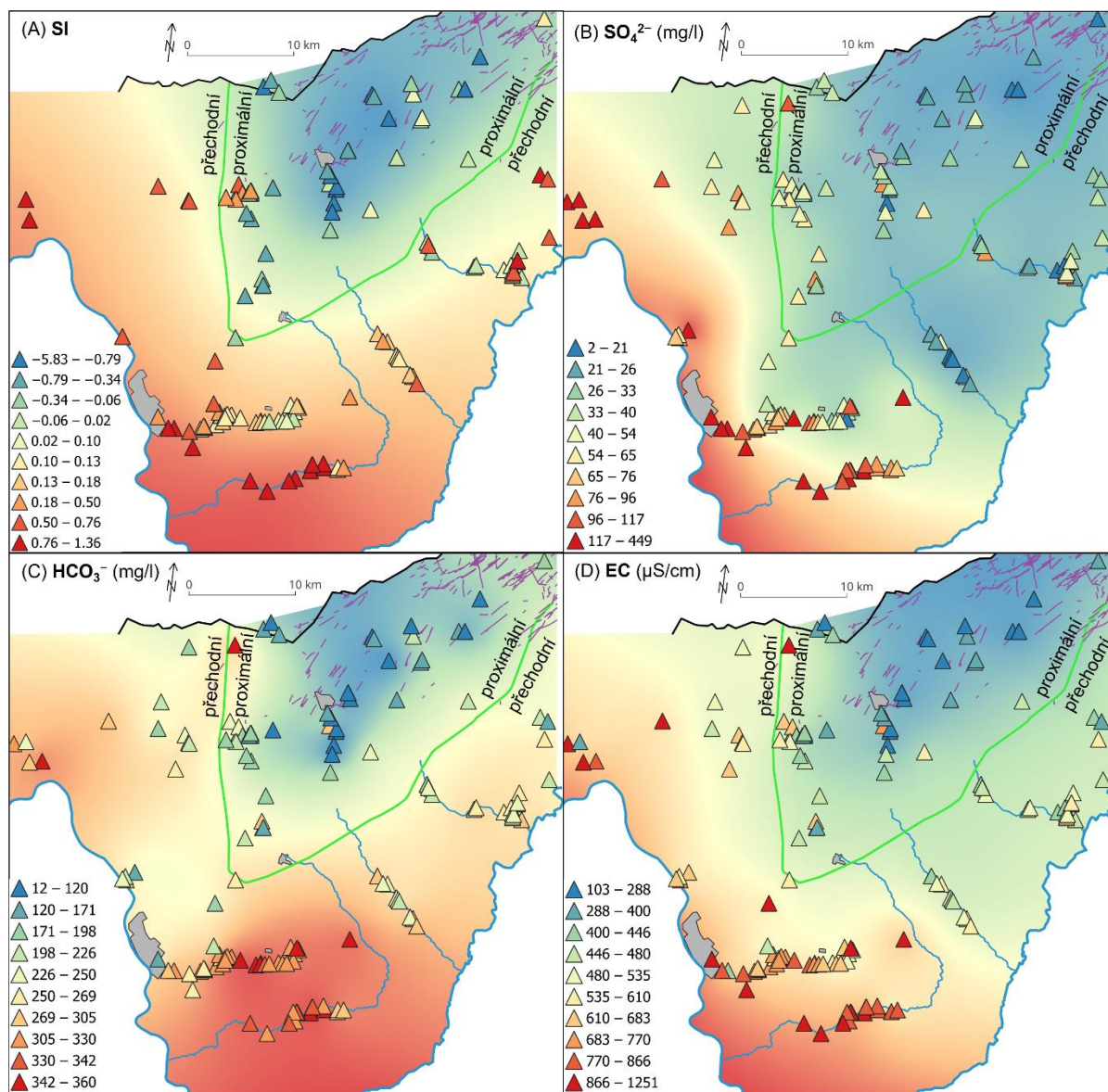
Obsah SO_4^{2-} odráží míru oxidace pyritu, při níž dochází k uvolňování vysoce rozpustných síranů do podzemní vody. Agresivita vznikající při rozkladu pyritu podporuje uvolňování dalších iontů, jako jsou Na^+ , Mg^{2+} a K^+ z hornin do vody. Obsahy HCO_3^- a Ca^{2+} primárně odrážejí množství karbonátů v horninovém prostředí, mohou se však rovněž zvyšovat v průběhu rozkladu pyritu. To se běžně týká jemnozrnných hornin ve studovaném území. Binární diagram (obr. 8) lze proto využít k rozlišení, zda daný proudový systém podzemní vody náleží primárně k proximální, či přečodní facii.

Z chemických rozborů a hodnot pH byly pomocí softwaru PHREEQC stanoveny indexy nasycení vody vzhledem ke kalcitu. Vzhledem k tomu, že kalcit se rozpouští rychle, výrazné nenasycení vůči kalcitu indikuje, že horniny v proudovém systému daného vzorku jsou obecně bez karbonátu, či se zanedbatelným množstvím

karbonátu. Ve studovaném území to odpovídá proximální facii křemenných pískovců, které postrádají karbonátový tmel či karbonátové konkrce. Na základě výsledků indexu nasycení (dále SI) tak lze studované území přibližně rozdělit na dvě zóny: V severní až severovýchodní části záporné hodnoty indexu ($\leq -0,2$) jasně indikují nenasycení kalcitem, odpovídající proximální facii bez karbonátů. V jižní až jihozápadní a jihovýchodní části hodnoty $> -0,2$ odpovídají přechodní facii (**obr. 9**).

Z výsledků vyplývá, že povodí Ploučnice a jejích přítoků, stejně jako horní části povodí Liběchovky a Pšovky, jsou budovány křemennými pískovci proximální facie, zatímco ostatní povodí, včetně středních a dolních částí Pšovky, Strenického potoka a Košáteckého potoka, obsahují karbonátový tmel či konkrce, a jsou proto klasifikovány jako přechodní facie. Hlavní jímací území Řepín a Bělá rovněž spadají do přechodní facie, přičemž Bělá leží v blízkosti hranice s proximální facii.

Rozdělení na základě indexů nasycení dobře odpovídá obsahům SO_4^{2-} a zejména HCO_3^- (**obr. 8**). Vzorované objekty v rámci proximální facie vykazují výrazně nižší koncentrace HCO_3^- (zhruba pod 260 mg/l) a nižší koncentrace SO_4^{2-} (do 100 mg/l), což ukazuje na omezené rozpouštění CaCO_3 a omezenou oxidaci (přítomnost) pyritu. Naproti tomu objekty v přechodní facii vykazují koncentrace HCO_3^- v rozmezí 200–350 mg/l a koncentrace SO_4^{2-} až 220 mg/l, což odráží výrazně vyšší podíl rozpouštění CaCO_3 a oxidace pyritu (**obr. 8**). Obě facie lze rovněž dobře odlišit na základě měrné elektrické vodivosti, přičemž lokality proximální facie vykazují nižší hodnoty ($285 \pm 85 \mu\text{S/cm}$) a lokality přechodní facie vyšší hodnoty ($614 \pm 142 \mu\text{S/cm}$) (**obr. 9**).

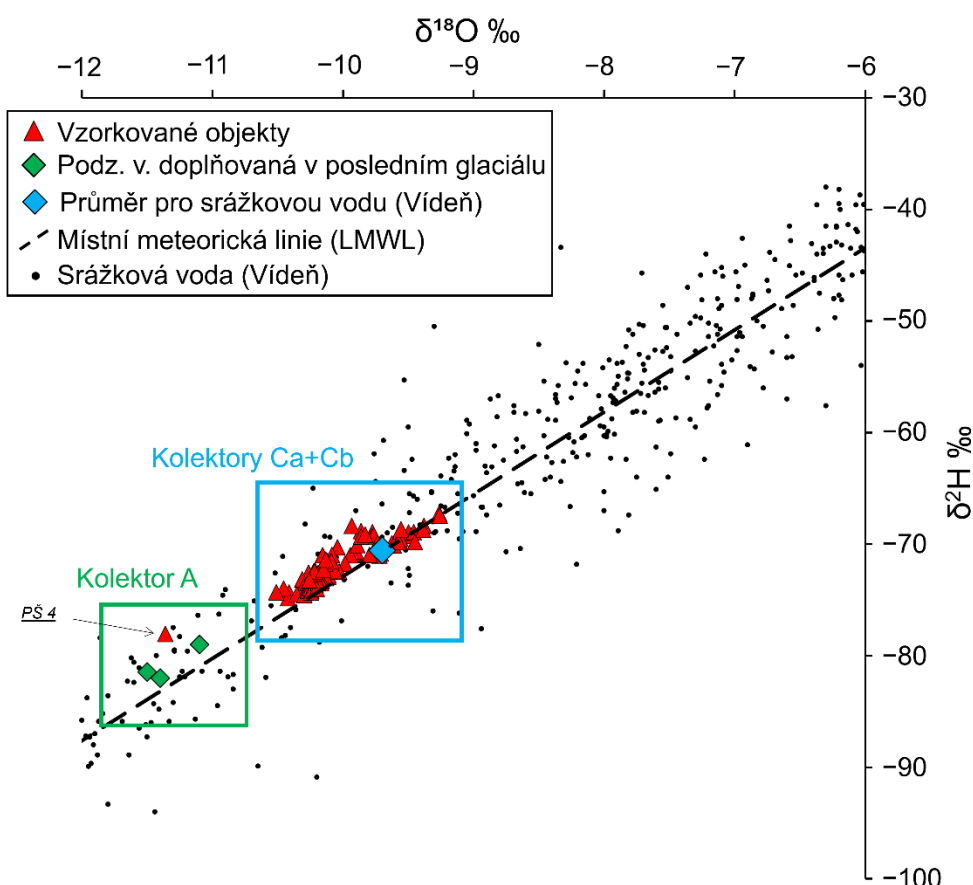


- ▲ ▲ Měřené objekty, zvýrazněné barvou dle příslušné hodnoty
- Hranice oddělující proximální a přechodní facii dle SI hodnot vůči kalcitu
- Čedičové žíly
- Povrchové toky
- Zlomy

Obr. 9. Mapa prostorové proměnlivosti následujících parametrů: (A) index nasycení vzhledem ke kalcitu, (B) koncentrace SO_4^{2-} (mg/l), (C) koncentrace HCO_3^- (mg/l) a (D) měrná elektrická vodivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Studené barvy (modrá) indikují oblasti s nižšími hodnotami, teplé barvy (červená) indikují vyšší hodnoty.

4.4. Stabilní izotopy O, H

Celkem bylo na stabilní izotopy O a H vzorkováno 85 objektů, převážně vrtů a pramenů. Izotopové složení většiny vzorků vykazuje velmi úzký rozsah, s hodnotami $\delta^{18}\text{O}$ od -10,5 do -9,3 ‰ a $\delta^2\text{H}$ od -74,8 do -67,3 ‰. Výjimkou je hluboký vrt PŠ4 v jímacím území Řepín, který zasahuje do cenomanského kolektoru A a který vykazuje hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ -11,4 ‰ a $\delta^2\text{H}$ -78,1 ‰, což odpovídá cenomanským vodám z glaciálního období popsaným v předchozích pracích (Corcho Alvarado et al., 2011; Dupalová et al., 2012) (obr. 10). To naznačuje, že s výjimkou vrtu PŠ4, který čerpá z cenomanského kolektoru, ostatní objekty odvodňují turonské kolektory Ca a Cb, nikoli kolektor A, a byly doplňovány vodou během holocénu. Srovnání izotopového složení s rozsáhlou databází Rebilance ukazuje, že voda pochází z relativně nízkých nadmořských výšek, což jednoznačně vylučuje krystalinická horská povodí obklopující českou křídovou pánev (okolí Ještědu apod.).



Obr. 10. Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^2\text{H}$ vzorkovaných objektů a jejich poloha vzhledem k místní meteorické linii (LMWL). Data pro vody doplňované během posledního glaciálu byla převzata z Corcho Alvarado et al. (2011) a Dupalové et al. (2012). PŠ4 je označení pro monitorovací vrt PŠ4 v jímacím území Řepín.

4.5. Analýza vzácných plynů

Celkem čtyři objekty z kolektorů Ca a Cb byly analyzovány na obsah vzácných plynů. Tři objekty (vrty č. KL7 a Ř8A z jímacích území Řepín a Bělá a Kovánecký pramen v povodí Strenického potoka), nacházející se všechny v přechodní facii, vykazují vypočtené teploty během infiltrace v rozmezí 8,0–8,2 °C, což naznačuje doplňování podzemní vody během holocénu a v relativně nízkých nadmořských výškách. Naproti tomu monitorovací vrt 111062T společnosti DIAMO, s.p. ze severovýchodní části území v proximální facii vykazuje teplotu 5,8 °C, což naznačuje buď vodu infiltrovanou během glaciálu, nebo spíše původem z vyšších nadmořských výšek na severu.

4.6. Analýza ^{13}C a ^{14}C

Celkem bylo v kolektorech Ca a Cb odebráno 39 vzorků pro analýzu $\delta^{13}\text{C}$. Hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ se pohybují v rozmezí od -17,4 do -8,3 ‰. Vzorky (n = 32) z přechodní facie, charakterizované vyšším podílem HCO_3^- (obr. 11), vykazují hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ v rozmezí -15,1 až -8,3 ‰ s průměrem -13,4 ‰. Naproti tomu vzorky (n = 7) z karbonátově chudé proximální facie mají hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ mezi -17,4 a -11,2 ‰ s průměrem -14,5 ‰ (obr. 11).

Méně negativní hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ (bližší nule) indikují vyšší podíl HCO_3^- pocházejícího z rozpouštění mořských karbonátů, zatímco více negativní hodnoty odrážejí větší podíl pocházející z rozpouštění půdního CO_2 . Hodnoty jsou výrazně ovlivněny tím, zda k rozpouštění HCO_3^- dochází v otevřeném systému ($\delta^{13}\text{C}$ pak činí -17 až -18 ‰), nebo v uzavřeném systému (-12 až -13 ‰), a také případným přínosem hlubinného CO_2 , který vede k hodnotám >-12 ‰ (Clark, 2015).

Pouze jeden vrt, nacházející se v proximální facii (monitorovací STPT-50 DIAMO, s.p.; -17,4 ‰), vykazuje čistý signál otevřeného systému. Sedm objektů, z nichž pět leží v přechodní facii (pramen Klokoč ve Střížovicích, jímací vrty KL 4, KL 7, KL 11 a KL 12 v Bělé) a dva (jímací vrt Pražský vrt (horní Pšovka) a monitorovací vrt HVPT-2 (DIAMO, s.p.)) v proximální facii, reprezentuje čistý uzavřený systém. Ostatní objekty vykazují hodnoty mezi krajními členy otevřeného a uzavřeného systému. Pouze dva monitorovací vrty v kolektorech Ca a Cb naznačují možný vliv hlubinného (geogenního) CO_2 ; oba se nacházejí v severní části studovaného území, jeden v proximální facii (HVPT-1, DIAMO, s.p.; -11,2 ‰) a druhý v přechodní facii (111062T, DIAMO, s.p.; -8,3 ‰; lokalizace objektů viz obr. 15).

Nejvyšší hodnota $\delta^{13}\text{C}$ byla naměřena ve vrtu PŠ 4 (Řepín; -7,3 ‰) v kolektoru A, což jednoznačně indikuje přínos hlubinného CO_2 a zřetelný rozdíl ve složení $\delta^{13}\text{C}$ oproti kolektorům Ca a Cb (s výjimkou nejsevernější oblasti).

Radiouhlíková měření byla provedena na 13 vzorcích z kolektorů Ca a Cb. Naměřená aktivita (A) se pohybovala v rozmezí 29 až 79 pmc (percent modern carbon – procent moderního uhlíku). Všechny vzorky

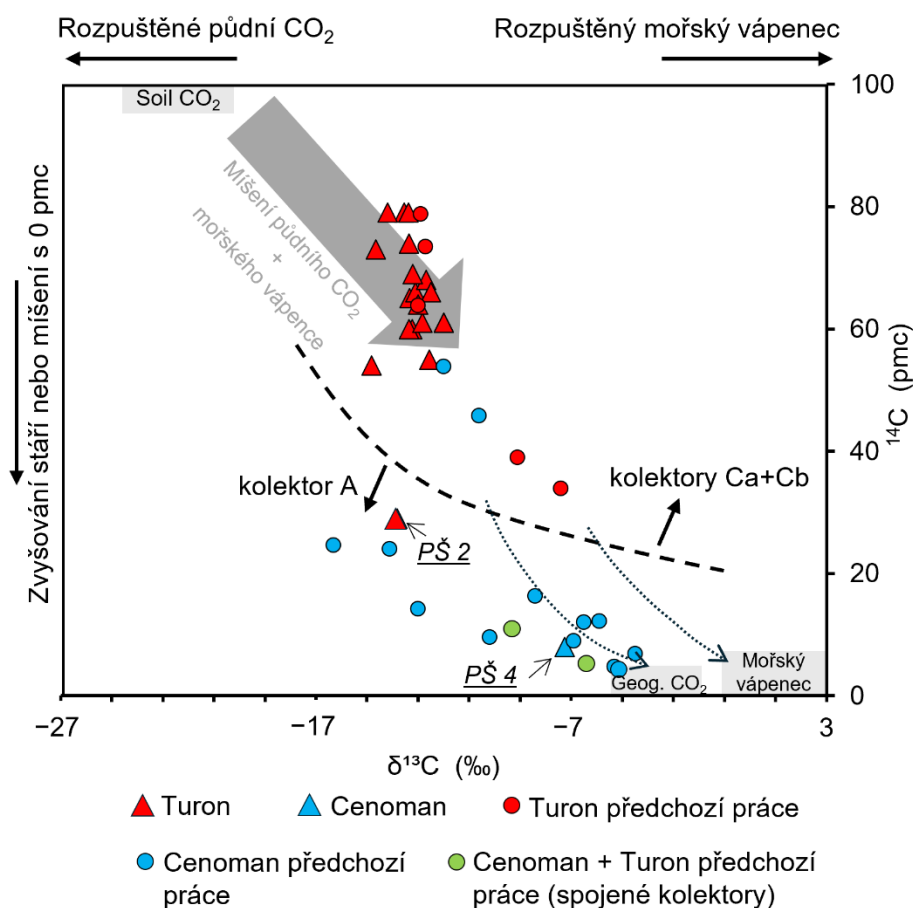
pocházely z přechodní facie, takže srovnání s proximální fací není možné. Obecně nižší hodnoty A odpovídají vyššímu stáří vody; to však platí pouze za předpokladu, že počáteční aktivita ^{14}C (A_0) je u všech vzorků stejná. Hodnota A_0 je ovlivněna podílem půdního CO_2 ($A_0 \geq 100$ pmc) a mořských karbonátů ($A_0 \approx 0$ pmc) při rozpouštění, přičemž zásadní roli hraje, zda je systém vůči půdnímu CO_2 otevřený, nebo uzavřený (Clark, 2015).

Při korekci A_0 pomocí Pearsonova modelu vykazuje většina objektů (osm ze čtrnácti) stáří řádově stovek až několika tisíců let. Čtyři objekty vykazují hodnoty A_0 vyšší než naměřené A, což lze vysvětlit buď (i) nevhodností Pearsonova modelu, který předpokládá uzavřený systém vůči půdnímu CO_2 , nebo (ii) kontaminací moderním atmosférickým ^{14}C ve druhé polovině 20. století, kdy jeho koncentrace byly výrazně zvýšeny v důsledku testování termonukleárních zbraní (až na 200 pmc). Protože použití alternativních korekčních modelů (Mook, Fontes–Garnier) tento problém neřeší, je pravděpodobnější druhé vysvětlení, zejména vzhledem k tomu, že dotčené objekty vykazují nejvyšší podíly „mladé“ vody (přesahující 50 %) dle modelování střední doby zdržení. Taková voda je běžně označována jako „moderní voda“. Vzhledem k tomu, že studované vody jsou směsí více složek různého stáří, je tento poznatek v souladu s novým konceptuálním modelem, ve kterém je pouze část vody klasifikována jako moderní, zatímco starší složka má stáří řádově stovek let (viz kapitola 4.7.).

Zbývající dva objekty vykazují výrazně vyšší stáří. Nejstarším objektem je pravděpodobně vrt PŠ 4 v Řepíně (stáří ~13800 let), který čerpá podzemní vodu z kolektoru A se starou podzemní vodou. Druhým nejstarším je vrt PŠ 2 v Řepíně (cca 7300 let), což naznačuje, že i tento vrt může alespoň částečně odvádět vodu z kolektoru A (obr. 11), nebo vodu z izolované části kolektoru Ca s výjimečně vysokou dobou zdržení (např. pískovcová tělesa v TUR3).

Výpočty A_0 výše vycházely z hodnot $\delta_{13}\text{C}$ -23 ‰ pro půdní CO_2 a +3 ‰ pro mořské karbonáty. Protože hodnoty $\delta_{13}\text{C}$ půdního CO_2 v české křídové pánvi mohou dosahovat až -27 ‰ a hodnoty mořských karbonátů se pohybují přibližně mezi +1 a +4,6 ‰ (viz Jiráková et al. 2010 a tam citované práce), přičemž žádný z těchto krajních členů nebyl v rámci našeho projektu přímo měřen, jsou výpočty radiokarbonového stáří na těchto parametrech velmi citlivé, zejména u mladých vod. Byla proto provedena následující citlivostní analýza: změny $\delta_{13}\text{C}$ půdního CO_2 v uvedeném rozmezí vedou k průměrné variabilitě stáří ~1200 let, zatímco změny složení karbonátových minerálů vedou k průměrné variabilitě stáří ~850 let. S výjimkou vrtů PŠ 4 a PŠ 2 tak může být podzemní voda buď zcela moderní (jeden krajní scénář), nebo může mít stáří od několika set do přibližně tisíce let (opačný krajní scénář). Nicméně i při použití různých realistických parametrů zůstává celková interpretace nezměněna: kolektory Ca a Cb vykazují charakteristiky moderní vody nebo stáří v řádu stovek až několika tisíc let, zatímco jednoznačně starší vody se vyskytují pouze ve vrtech PŠ 4 a PŠ 2, což je v souladu i s výsledky dalších stopovačů (viz kapitola 4.7.).

Z obr. 11 vyplývá, že většina studovaných objektů spadá do velmi úzkého rozmezí vztahu $\delta^{13}\text{C}$ vs. ^{14}C . Vody z kolektorů Ca a Cb se nacházejí v polohách odpovídajících turonským vodám z předchozích studií. Jediný vrt z kolektoru Ca (PŠ 2) se promítá do pole cenomanských vod. Z izotopů uhlíku nelze jednoznačně určit, zda vrt obsahuje významný podíl cenomanské vody, nebo zda jsou pozorované hodnoty výsledkem in situ stárnutí v nějaké stagnující části kolektoru. Izotopové složení O a H (kde vrt PŠ 2 svým složením nikterak nevybočuje ve srovnání s ostatními turonskými sekvencemi, obr. 10) jej však jednoznačně řadí k turonským kolektorům.

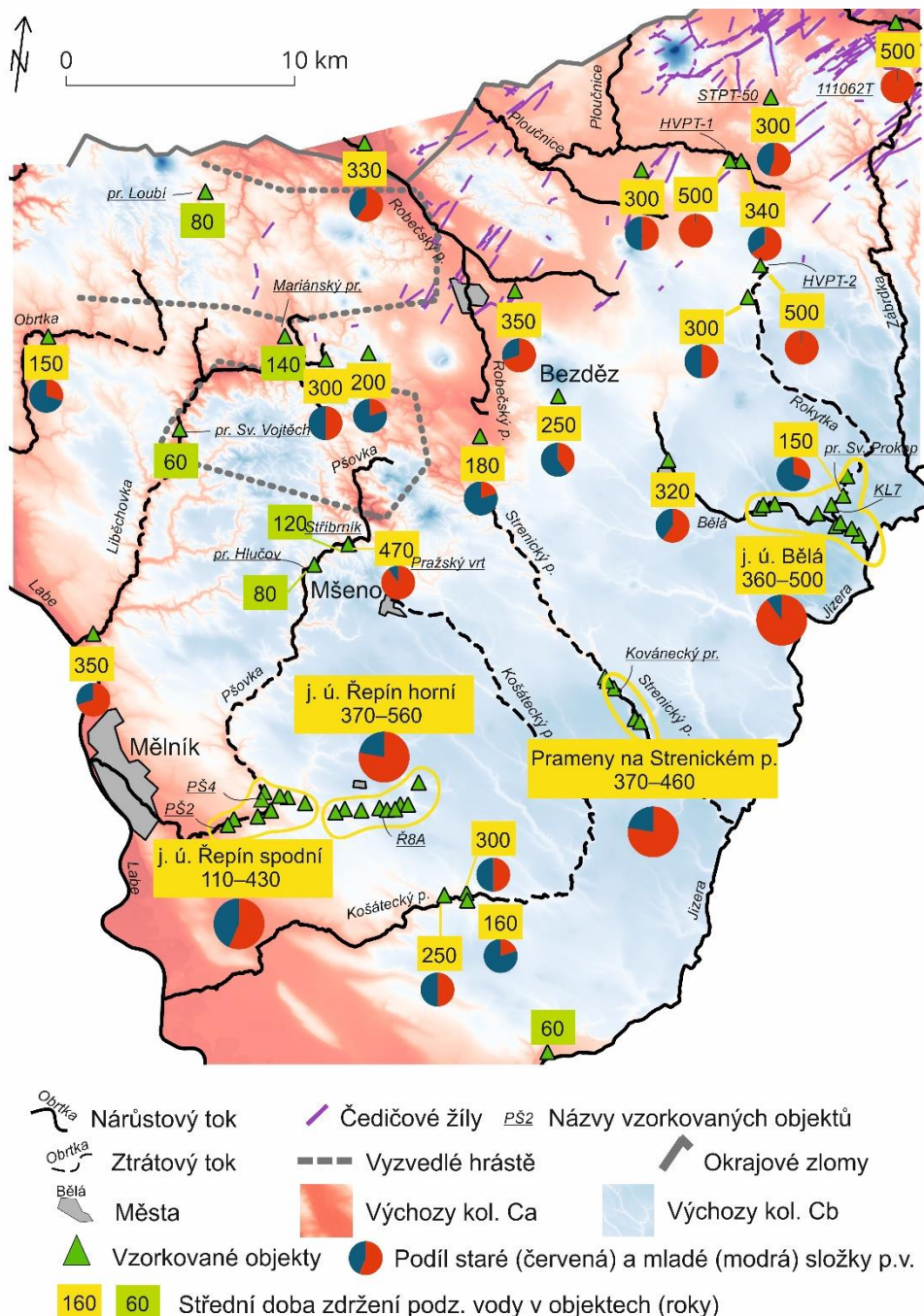


Obr. 11. Vztah mezi $\delta^{13}\text{C}$ a aktivitou ^{14}C . Obrázek zahrnuje data z předchozích studií (Jiráková et al., 2010; Pačes et al., 2008). Jediné dva cenomanské objekty z předchozích prací (modrá kolečka) nacházející se v poli kolektorů Ca+Cb jsou z infiltrační oblasti kolektoru A vzdálené do 10 km od lužické poruchy.

4.7. Střední doba zdržení

Na základě analýz freonů (CFC-11, CFC-12 a CFC-113), SF₆, ³H a ³⁹Ar byla pro 62 objektů v kolektorech Ca a Cb modelována střední doba zdržení podzemní vody. Výsledky ukázaly, že u většiny objektů je střední doba zdržení nejlépe aproximována modelem binárního mísení, což indikuje mísení dvou složek podzemní vody různého stáří v kvantifikovatelném poměru. Starší složka má stáří přibližně 500–600 let, zatímco mladší složka dosahuje stáří 5–300 let (v průměru 60 let). Příklad prokládání modelových křivek naměřenými daty je uveden na **obr. 4**.

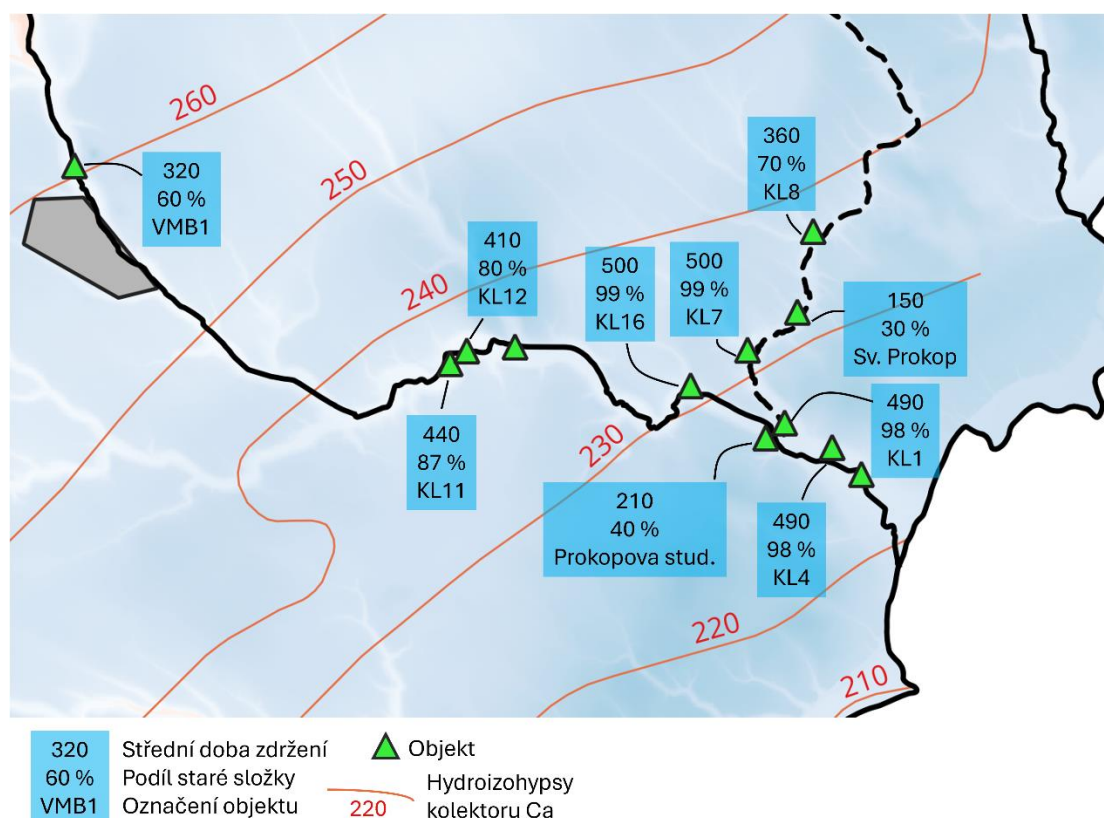
Výsledky ukazují, že střední doba zdržení u všech objektů s binárním mísením se pohybuje přibližně od 100 let do více než 500 let a podíl staré vody se pohybuje od 15 % do 99 % (**obr. 12**). Průměrná střední doba zdržení objektů s binárním mísením je v přechodní i proximální facii téměř shodná (360 vs. 350 let). Přechodní facie vykazuje širší rozmezí hodnot než proximální facie (60–560 vs. 200–500 let), což může být způsobeno rozdílnou velikostí datových souborů (50 vs. 7 objektů) nebo nižší pórovitostí a tedy rychlejším prouděním v přechodní facii ([Kůrková et al., 2019](#)).



Obr. 12. Mapa znázorňující střední dobu zdržení podzemní vody v jednotlivých vzorkovaných objektech. Hodnota střední doby zdržení (v rocích) podbarvená žlutě označuje binární míscí model, zatímco zelené

podbarvení označuje jednosložkový exponenciální model. Koláčkové diagramy v červené a modré barvě znázorňují podíly staré (červená) a mladé (modrá) složky podzemní vody v binárním mísicím modelu.

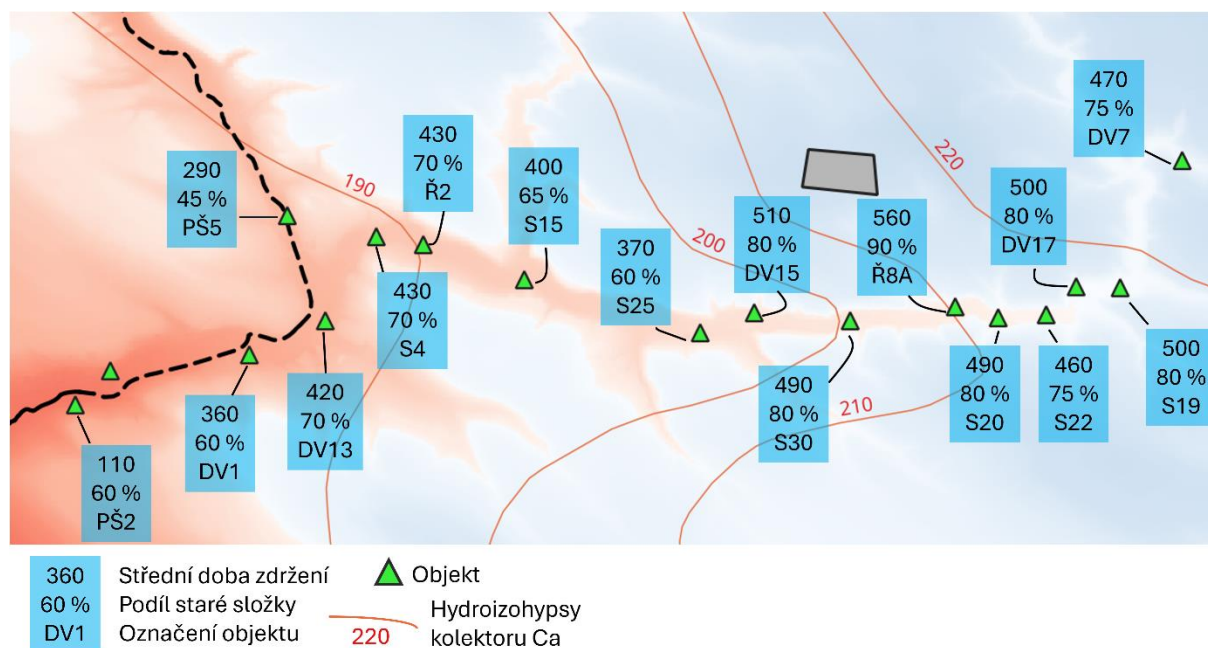
V jímacím území Bělá se střední doba zdržení v čerpaných vrtech pohybuje přibližně mezi 360 a 500 lety, s podílem staré složky nad 70 %. Tyto vrty jsou převážně dotovány z kolektoru Ca. Naproti tomu zachycený pramen Svatý Prokop, nacházející se v bezprostřední blízkosti (v řádu prvních stovek metrů) jímacích objektů v Bělé, vykazuje střední dobu zdržení přibližně 150 let a podíl staré složky pouze kolem 30 % (obr. 13). Podobně Prokopova studánka poblíž vrtu KL1 vykazuje střední dobu zdržení 210 let a podíl staré složky kolem 40 %. To poukazuje na nižší podíl vody z kolektoru Ca v těchto dvou pramenech a vyšší zastoupení drénované vody z mělčího kolektoru Cb oproti jímacím vrtům. Objekty Cetno vodárna a Cetno pramen, nacházející se 12 km JZ od Bělé, podílem staré vody i dobou zdržení odpovídají vodě z jímacích vrtů v Bělé.



Obr. 13. Detailní pohled na střední dobu zdržení (v rocích) objektů v oblasti jímacího území Bělá. Pro vysvětlení ostatních grafických prvků je čtenář odkázán na popis obr. 12.

V povodí Strenického potoka vykazují čerpaný vrt (pracovně označený) Horní Cetno a Velký pramen střední dobu zdržení a podíly staré složky vody srovnatelné s čerpanými vrty v jímacím území Bělá – střední doba zdržení je zde 370 až 460 let a podíl staré složky okolo 80 %. Dále se zde nacházejí čtyři prameny se střední dobou zdržení přesahující 370 let, které odvodňují kolektor Ca.

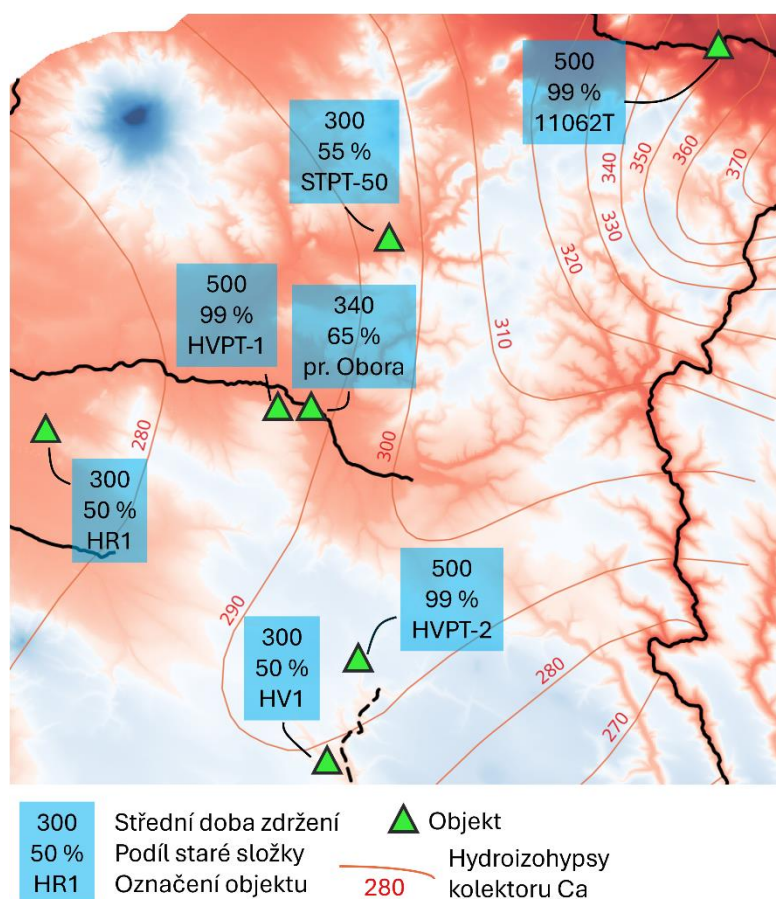
Jímací území Řepín lze pro zjednodušení rozdělit na dvě části (horní ve V a SV části; a spodní v Z a JZ části). V horní části je podíl staré vody 75 až 90 % a střední doba zdržení je zde 370 až 560 let. Ve spodní části je podíl staré vody nižší, zhruba 25 až 70 %, a doba zdržení dosahuje 100 až 430 let (obr. 14). Spodní část tak má pravděpodobně mírně nižší zastoupení starých vod z kolektoru Ca, lze zde navíc předpokládat vliv přítoku velmi mladé vody ze Pšovky (zejména pro vrty PŠ2 a PŠ5) – v takovém případě se jedná o míšení nikoliv dvou, ale tří složek různých typů vod. Pod správou jímacího území Řepín je i tzv. Pražský vrt u Vojtěchova, ve kterém voda poměrem míšení i dobou zdržení odpovídá té z hlavní řepínské jímací struktury (90 % staré vody, doba zdržení 470 let). Oproti tomu hned vedle se nacházející jímáním podchycená štola Stříbrník odvádí v drtivé většině mladší vodu (dle exponenciálního modelu o stáří 120 let).



Obr. 14. Detailní pohled na střední dobu zdržení (v rocích) objektů v oblasti jímacího území Řepín. Pro vysvětlení ostatních grafických prvků je čtenář odkázán na popis obr. 12.

Hlavní prameny podél Košáteckého potoka pravděpodobně odvodňují jak kolektor Ca, tak Cb, protože obsahují směs mladé a staré podzemní vody (podíl staré složky 20–50 %) se střední dobou zdržení přibližně 160–300 let.

Nejvyšší podíly staré složky vody se vyskytují v severozápadní části studovaného území (obr. 15), což pravděpodobně reprezentuje pomalu proudící podzemní vodu v hlubších zónách křemenných pískovců; tento fenomén může být ovlivněn i tím, že voda zde byla odebrána z monitorovacích vrtů bez dlouhodobého čerpání, na rozdíl od ostatních objektů.



Obr. 15. Detailní pohled na střední dobu zdržení (v rocích) objektů na severu a severovýchodě zájmové oblasti. Pro vysvětlení ostatních grafických prvků je čtenář odkázán na popis obr. 12.

Několik jímacích vrtů (R31 Jordán, HV1, HR1, ZP6 a HVPT-1) v kolektoru Ca, situovaných ve střední části studovaného území, rovněž vykazuje střední dobu zdržení přesahující 300 let a podíl staré složky vody nad

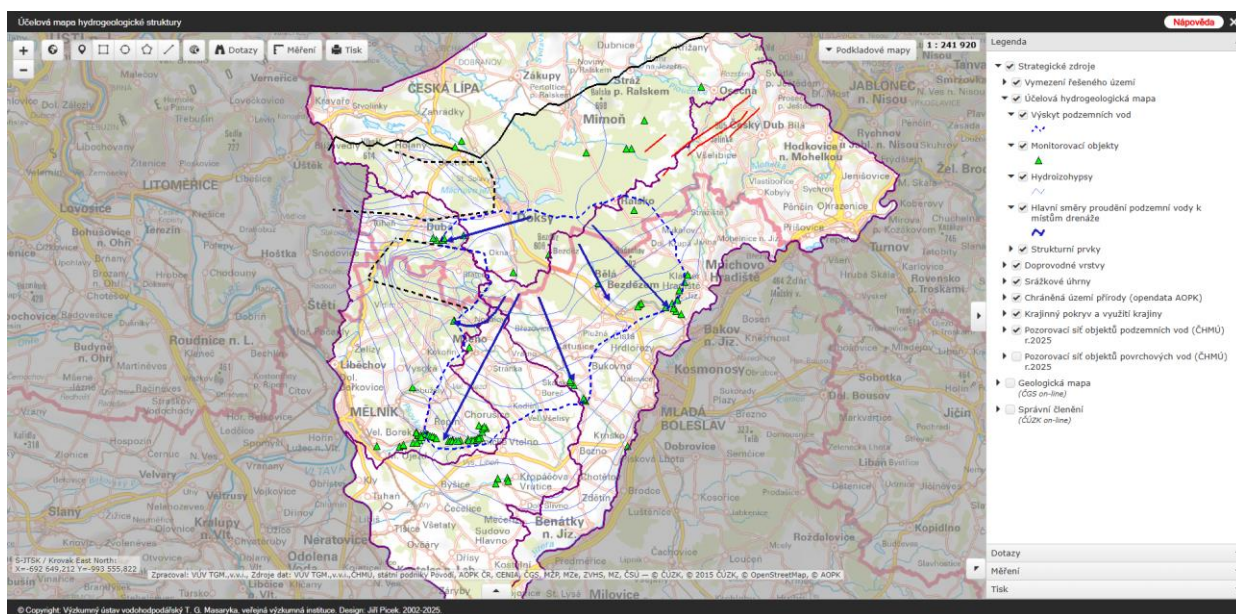
50 % (obr. 12; obr. 15). Většina ostatních objektů vykazuje obecně nižší střední dobu zdržení (<250 let) a nižší podíl staré složky (<50 %) ve srovnání s jímacími územími Bělá a Řepín. Prameny mají obecně výrazně mladší vody; nejčastěji je pro ně vhodný exponenciální model, se stářím mezi 40 a 140 lety. Existují však i výjimky. Jednou z nich je pramen Obora u Mimoně v severní části studovaného území, který vykazuje střední dobu zdržení přibližně 340 let a podíl staré složky 65 %, což pravděpodobně odráží hlubší hydraulické propojení nebo vývěr velmi staré vody z kolektoru Ca (obr. 12).

4.8. Účelová mapa zájmové hydrogeologické struktury

Mapa vznikla na základě analýzy obrovského množství dat, stovek litologických profilů vrtů a chemických analýz podzemních vod z archívu ČGS, z vlastních terénních a laboratorních měření a z velkého množství regionálně hydrogeologických prací.

Účelová mapa (obr. 16) se skládá z 5 vrstev GIS: Výskyt podzemních vod, Monitorovací objekty, Hydroizohypsy, Hlavní směry proudění podzemních vod k místům drenáže, Stáří a zastoupení starých vod. Kromě toho bylo zpracováno dalších 5 vrstev geologických strukturních aspektů, označených jako Strukturní prvky, které jsou důležité pro koncept proudění podzemní vody v zájmovém území. Mapová prohlížečka umožňuje zobrazit vrstvy s doplňujícími údaji, které jednak usnadňují orientaci v mapě, a jednak uvádějí různé informace, které mohou omezovat, limitovat či podmiňovat využívání nebo ochranu zkoumaných starých vod. Popis mapy, textové vysvětlivky i návod k použití mapy je uveden ve zprávě Bruthans, Datel et al. (2025). Samotná mapa společně s podrobnějším uživatelským popisem mapy, textovými vysvětlivkami a návodem k použití je veřejně dostupná na webové adrese:

<https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/strategiezdroje>.



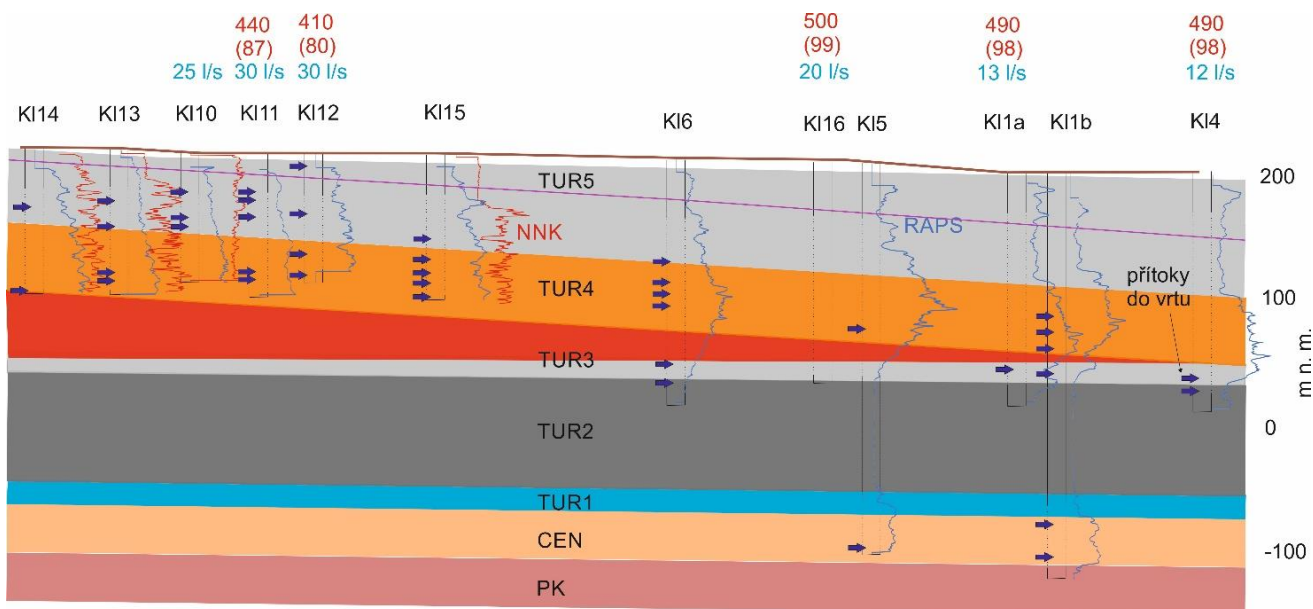
Obr. 16. Náhled veřejně přístupné účelové mapy (k lednu 2026) zájmové hydrogeologické struktury. V příkladovém zobrazení je modrou přerušovanou čarou znázorněna oblast s výskytem starých vod, modré izoliny jsou hydroizohypsy kolektoru Ca se starou vodou, kolmo na ně jsou modré šipky s hlavními směry proudění staré vody. Zelené trojúhelníky značí studované objekty (vrty, prameny). Vpravo je nabídka s možnostmi zapínání a vypínání zobrazení dalších vrstev a prvků.

4.9. Geologické řezy

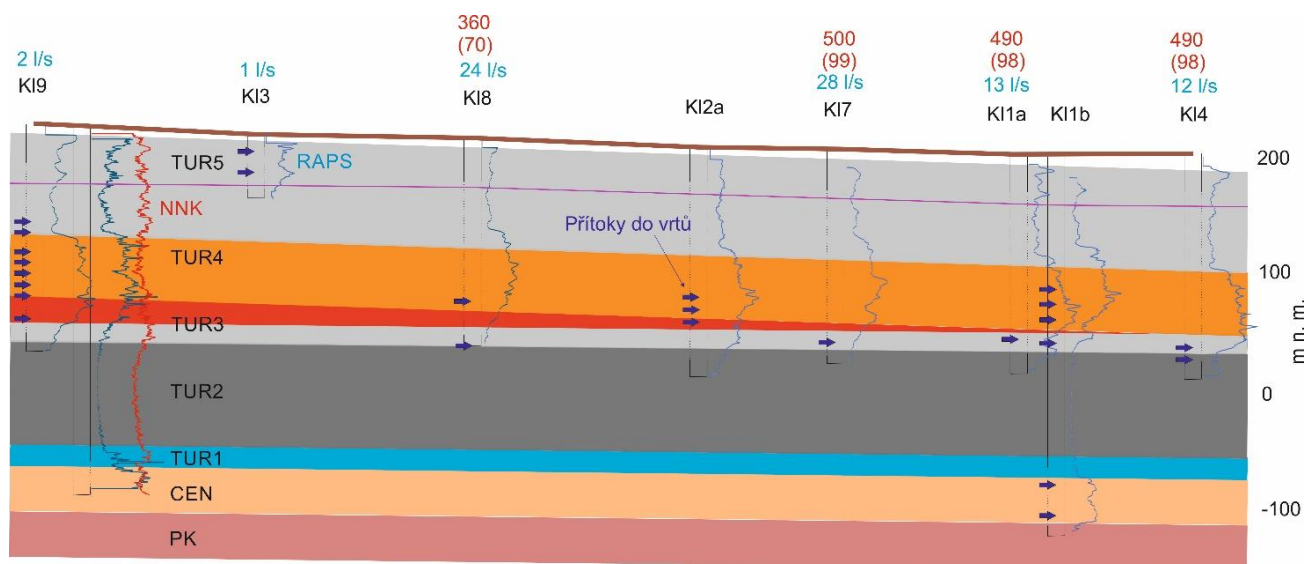
Byly zkonstruovány čtyři nové geologické řezy (obr. 17): dva jímacím územím Bělá (obr. 18; obr. 19), jeden údolím Strenického potoka (obr. 20) a jeden jímacím územím Řepín (obr. 21). Tyto řezy pomohly pochopit komplexní geologickou situaci v zájmovém území a přehledně zobrazují, do jakých sekvenčně stratigrafických jednotek spadají jednotlivé jímací vrty.



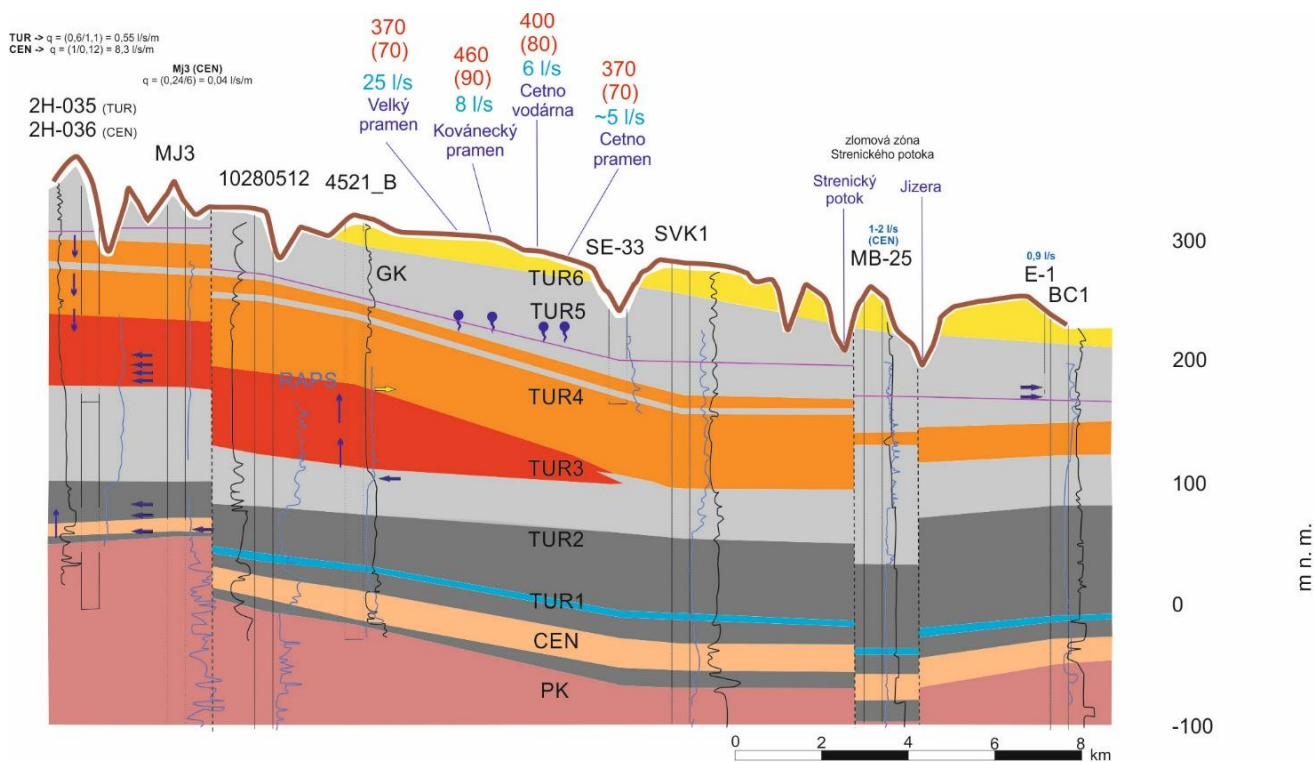
Obr. 17. Průběh geologických řezů zájmovým územím (červené linie).



Obr. 18. Řez jímacím územím Bělá od vrtu KL14 (Z) k vrtu KL4 (V). Modré číslo značí maximální vydatnost daných vrtů, červené číslo značí střední dobu zdržení v rocích a v červené číslo závorce uvádí procentuální podíl staré složky podzemní vody. Fialová linie značí bázi sekvenční jednotky TUR5.



Obr. 19. Řez jímacím územím Bělá od vrtu KL9 (S) k vrtu KL4 (JV). Modré číslo značí maximální vydatnost daných vrtů, červené číslo značí střední dobu zdržení v rocích a v červené číslo závorce uvádí procentuální podíl staré složky podzemní vody. Fialová linie značí bázi sekvenční jednotky TUR5.



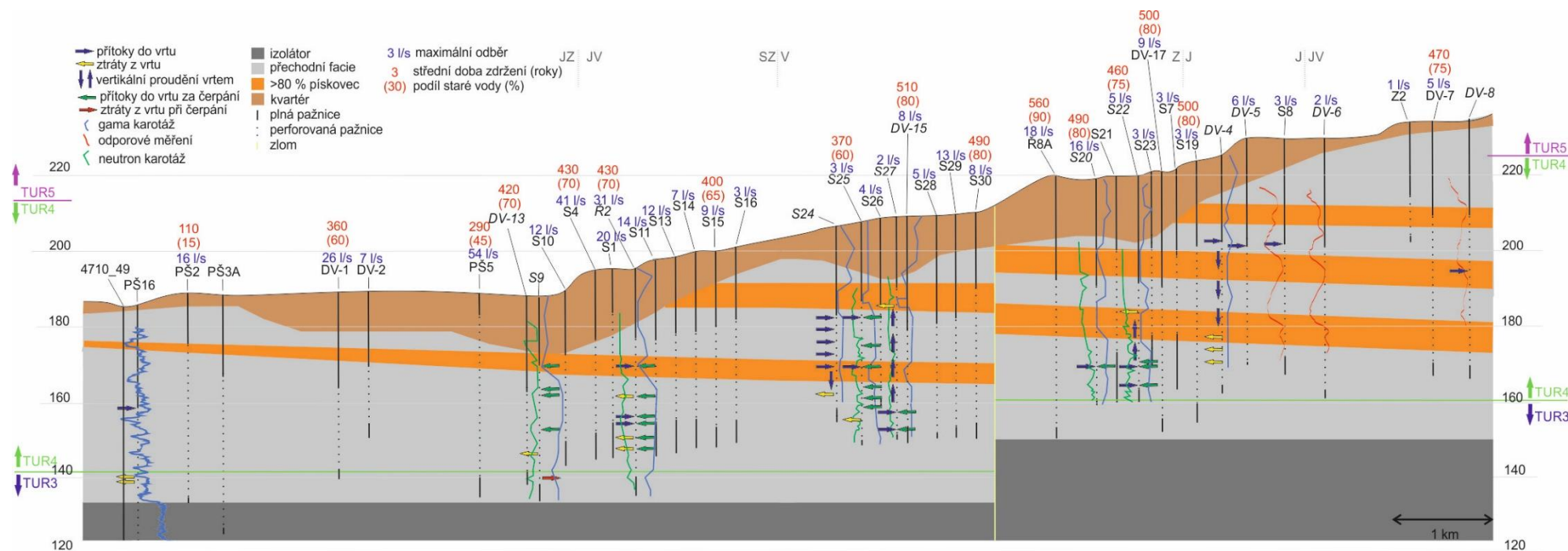
Obr. 20. Řez údolím Strenického potoka (SZ-JV). Modré číslo značí průtok pramenů v době řešení projektu, červené číslo značí střední dobu zdržení v rocích a v červené číslo závorce uvádí procentuální podíl staré složky podzemní vody. Fialová linie značí bázi sekvenční jednotky TUR5.



Výzkumný ústav
vodohospodářský
T. G. Masaryka
veřejná výzkumná instituce



Přírodovědecká fakulta
Univerzita Karlova



Obr. 21. Řez jímacím územím Řepín od vrtu PŠ16 (JZ) k vrtu DV8 (V). Modré číslo značí maximální vydatnost daných vrtů, červené číslo značí střední dobu zdržení v rocích a v červené číslo závorce uvádí procentuální podíl staré složky podzemní vody. Fialová linie značí bázi sekvenční jednotky TUR5.

5. Interpretace výsledků a diskuse

5.1. Proudové systémy a střední doba zdržení podzemní vody

S využitím indexu nasycení podzemní vody vzhledem ke kalcitu (**obr. 9**) a s využitím archivních dat vydatnosti pramenů (dle **Hrabánkové, 2009; obr. 22**) byly v kolektoru Ca vymezeny jednotlivé facie. Proximální facie zahrnuje povodí Ploučnice a jejích přítoků, stejně jako horní části povodí Liběchovky a Pšovky. Tyto oblasti jsou tvořeny hrubozrnnými křemennými pískovci bez karbonátů a podzemní voda je proto vůči kalcitu nenasycená. Odtok podzemní vody probíhá převážně do povrchových toků s relativně malým počtem lokalizovaných pramenů, jejichž vydatnost většinou nepřesahuje 5 l/s. Naproti tomu jižní povodí včetně jímacích území Bělá a Řepín náleží přechodní facii, která je charakterizována četnými velkými prameny s vydatností v řádu desítek l/s a podzemní vodou nasycenou vůči kalcitu. Distální facie, přecházející z kolektoru Ca do izolátoru, lemuje tok Labe v dolních částech Liběchovky, Pšovky a Košáteckého potoka.

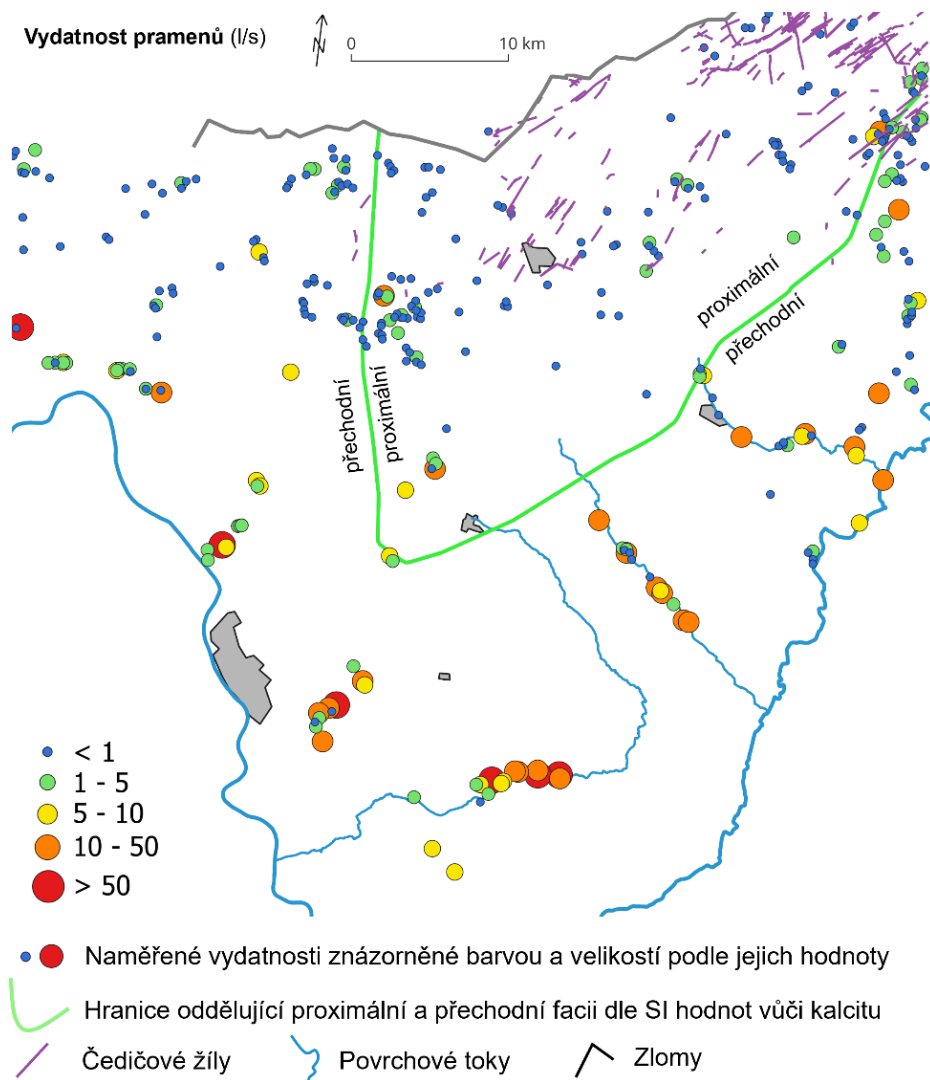
Pokud jde o kolektory Ca a Cb, stará složka podzemní vody (stáří 500–600 let) se vyskytuje výhradně v kolektoru Ca. S jednou možnou, avšak ne příliš pravděpodobnou výjimkou v jímacím území Řepín (vrt PŠ 2) výsledky jednoznačně ukazují, že nejde o přítok fosilní vody z cenomanského kolektoru A, což dokládají odlišné hladiny podzemní vody, ale především rozdílné hodnoty $\delta^{13}\text{C}$, ^{14}C a $\delta^{18}\text{O}$.

Stará podzemní voda má infiltrační oblast v okolí Bezdězu a následně se šíří vějířovitě, převážně směrem k jihozápadu a jihovýchodu. Směrem k severovýchodu proudění brání vyšší hladiny podzemní vody, zatímco na západ a severozápad je báze kolektoru Ca tektonicky vyzdvižena přibližně o 70–140 m v hrástvých strukturách a v podloží se nachází izolátor. Proudění podzemní vody v kolektoru Ca je tak těmito bariérami blokováno a podzemní voda je nucena bariéry obtékat, což účinně eliminuje proudění staré vody do povodí umístěných v západní části území (Liběchovka a Obrtka; **obr. 6**).

Většina staré podzemní vody je tak odváděna a následně jímána v jímacích územích Řepín (cca 220 l/s) a Bělá (cca 120 l/s) a odvodňována prameny v povodí Strenického potoka (cca 60–110 l/s) (**obr. 6**), jak vyplývá z výpočtů založených na střední době zdržení a podílu staré složky podzemní vody v jednotlivých objektech. Část této staré vody pravděpodobně pokračuje dále k erozní bázi na jihovýchodě, reprezentované Jizerou. Nedostatek vrtů a pramenů v této oblasti (mezi prameny Strenického potoka a Jizerou) však neumožňuje kvantifikaci tohoto odtoku.

Kolektor Ca místy obsahuje i mladou podzemní vodu. Nad ním se nachází kolektor Cb s hladinou podzemní vody o 30–100 m vyšší. Na jeho bázi se vyskytuje izolátor, který umožňuje vůbec existenci kolektoru Cb. V zaříznutých údolích je však mocnost izolátoru snížena erozí a jeho spojitost narušena zvětráváním, což umožňuje průsak vody z kolektoru Cb a přítok mladé vody do kolektoru Ca. Výskyt vysokého podílu staré složky je proto omezen na oblasti, kde nedochází k ředění mladší vodou z kolektoru Cb díky dostatečné

mocnosti izolátoru nebo kde podzemní voda stagnuje v hlubších částech kolektoru Ca (v severní části území). Příkladem objektů odvádějících mladou vodu z kolektoru Ca jsou prameny Loubí, Hlučov či Mariánský pramen.



Obr. 22. Mapa znázorňující vydatnost pramenů (l/s) v zájmové oblasti (dle Hrabánkové, 2009).

Kolektor Ca je tvořen převážně mocnými polohami křemenných pískovců s vysokou pórovitostí (25 % a více; Pátek, 2024). Naproti tomu kolektor Cb je, s výjimkou severní části, tvořen přechodní facii jemnozrnných

vápnitých pískovců a v menší míře písčitých vápenců s pórovitostí obvykle mezi 5 a 10 % (Kůrková et al., 2019). Menší objem pórů tak představuje menší objem vody, a tedy rychlejší proudění a nižší dobu zdržení.

Nejvyšší podíl staré složky podzemní vody se vyskytuje v severovýchodní části studovaného území, kde je pravděpodobně akumulována v hlubších partiích kolektoru Ca v křemenných pískovcích, s infiltračním územím ležícím severně od studované oblasti. Dle hydroizohyps tato voda proudí směrem k oblasti Bezdězu (převážně v proximální facii), kde se nachází relativně plochá hladina podzemní vody. Tato oblast představuje infiltrační území staré podzemní vody. Odtud se voda v kolektoru Ca šíří zejména směrem k jímacímu území Bělá (střední doba zdržení až 500 let), dolním částem Strenického potoka (prameny se střední dobou zdržení až 460 let) a jímacímu území Řepín (až 430, resp. 560 let). Celkový odtok této staré podzemní vody činí nejméně 450 l/s a představuje odvodnění probíhající výhradně v rámci přechodní facie. Je zřejmé, že vzhledem k postupnému přechodu proximální facie ze severní části do přechodní facie v jižních částech dochází k proměně facií v průběhu proudění této vody.

Podíl mladé a staré složky podzemní vody ve sledovaných objektech je řízen dvěma procesy: (i) vzestupným průsakem z kolektoru Ca přes izolátor do kolektoru Cb, což zvyšuje podíl staré složky v kolektoru Cb, a (ii) naopak sestupným průsakem přes lokálně porušený izolátor v zaříznutých údolích, což vede k přítoku mladé vody z kolektoru Cb do kolektoru Ca. Jasným příkladem mísení jsou velké prameny podél Košáteckého potoka, kde je poměr staré a mladé složky přibližně 1:1. Mladá voda z kolektoru Cb proudí pod zaříznutým údolím a je společně odváděna se starou vodou z kolektoru Ca.

Poněkud odlišný charakter má skupina pramenů v západní části území se střední dobou zdržení 60–140 let. Tyto prameny odvádějí mladou vodu z kolektoru Cb, případně se nacházejí v oblastech, kde kolektor Cb není vyvinut a infiltrující srážková voda tak přímo vstupuje do kolektoru Ca. Tato oblast nemůže být významně zásobována starou vodou infiltrovanou v oblasti Bezdězu, protože vyzdvižené bloky hornin zde fungují jako hydraulické bariéry a takové proudění znemožňují.

5.2. Ochrana a optimální využití významné akumulace kvalitních starých vod

5.2.1 Potřeba ochrany hydrogeologické struktury

Hydrogeologická struktura s výskytem podzemních vod s dlouhou dobou zdržení má strategický význam, z hlediska dlouhé časové odolnosti těchto podzemních vod vůči aktuálním stresům (dopady sucha, kontaminace, robustní zdravotní nezávadnost, odolnost vůči teroristickým či válečným aktům aj.) je tedy velmi vhodné zajistit ochranu této struktury, kterou lze standardně rozdělit na ochranu množství a ochranu kvality.

Ochrana kvality

Náchylnější na ohrožení jakosti starých vod jsou místa, kde je překryv nadložního kolektoru Cb (respektive izolátoru při bázi Cb) snížen nebo zcela chybí. Velikost mocnosti nadloží nad kolektorem Ca ukazuje jedna vrstva v mapové prohlížečce. Zvláště v rozsahu vymezeného infiltračního území je třeba se zabývat ochranou kvality infiltrovaných vod. I když při zdržení podzemní vody řádově ve stovkách let bude řada běžných kontaminantů procesy přirozené atenuace eliminována, existuje řada perzistentních kontaminantů, které ve vodě mohou přežívat velmi dlouhou dobu. Doporučujeme proto zajistit preventivní ochranu infiltrované vody před znečištěním z plošných i bodových zdrojů znečištění v celé ploše výskytu starých podzemních vod, kde je snížená mocnost nadloží Cb (především méně než 25 m), především v rozsahu vymezeného infiltračního území.

Konkrétní návrh kvalitativních ochranných opatření je záležitostí technického návrhu, v rozsahu požadavků vyhlášky č. 137/1999 Sb.

Ochrana množství

Protože bylo zjištěno, že původní představa o jednom turonském kolektoru C byla mylná a nachází se zde minimálně dva turonské kolektory (Ca a Cb), je potřeba toto brát v potaz při vrtání nových vrtů pro nejrůznější účely, zejména pro tepelná čerpadla, aby nedocházelo k propojování zvodní a tím potenciálně snižování jakosti staré vody ve spodním turonském kolektoru Ca. V mapové prohlížečce a v příložených geologických řezech je vykreslena přibližná hloubka báze kolektoru Cb, a tedy zhruba úroveň izolátoru oddávajícího kolektoru. Nicméně litologická podstata izolátoru není známá a bude třeba ji určit v dalších projektech. Tuto hloubku je třeba respektovat a v případě, že vrt bude tímto rozhraním procházet, musí být odpovídajícím způsobem technicky navržen a vystrojen, aby nezpůsobil propojení kolektorů.

K ochraně množství starých vod navrhujeme následující opatření:

- Aktivní podpora vsakování srážek v ploše vymezeného infiltračního území.
- Zákaz budování vrtů pro tepelná čerpadla v celé ploše výskytu starých vod (rizika porušení stropního izolátoru a propojení zvodní, riziko vzniku preferenčních vertikálních cest).
- Při plánování nových odběrů podzemních vod (zvláště drobné odběry) preferovat mělčí odběry podzemních vod (do hloubky odpovídající mocnosti stropního izolátoru kolektoru starých vod).
- Povolení zemních prací, které hrozí porušením nadložního izolátoru této struktury, je třeba vázat na souhlas odborně způsobilého hydrogeologa, který podrobně zná místní hydrostratigrafickou situaci a dodržení jím stanovených podmínek pro realizaci prací.
- Pokud se výjimečně povolí průzkumné či jímací vrty do chráněného kolektoru s výskytem starých vod, je třeba správné těsnění a konstrukce vrtů. Jejich návrh a realizace musí být řízena odborně způsobilým hydrogeologem, který podrobně zná místní hydrostratigrafickou situaci.

- Při opravách a náhradách jímacích objektů ve stávajících jímacích územích dbát na správnou technickou konstrukci jímacích vrtů, aby nepropojovaly kolektory Ca a Cb, ale naopak je účinně oddělovaly.

Je třeba uvést, že přirozenému míchání mladé vody z mělkého turonského kolektoru Cb se starou vodou z kolektoru Ca v zařízených údolích nelze zcela zamezit, takže v řadě případů jímacích objektů situovaných v těchto hluboce zařízených údolích a v mnoha pramenech bude nutně určitá směs staré a mladé vody. Při budování nových vodárenských vrtů se záměrem odběru staré vody existuje však již dnes dostatek hydrogeologických údajů k tomu, aby tyto vrty byly optimálně umístěny, technicky navrženy a správně vystrojeny tak, že budou jímat maximálně možné množství staré vody, co dané přírodní geologické poměry v konkrétním místě umožní.

Konkrétní návrh kvantitativních ochranných opatření je záležitostí technického návrhu, v rozsahu požadavků vyhlášky č. 137/1999 Sb.

5.2.2 Poznámky k jímací podzemních vod s dlouhou dobou zdržení v budoucnosti

Výše uvedená data ukázala, že obě velká jímací území Řepín a Bělá čerpají v naprosté většině starou složku podzemní vody, což dokládá, jak příhodně byla obě jímací území zbudována ve směru toku a drenáže této staré vody. Z hlediska vodárenského využití jsou tak tato stávající místa nejvhodnější. V jímané vodě je určitý podíl mladé složky z kolektoru Cb. Je tak pravděpodobné, že v jímaných vrtech částečně dochází k čerpání z obou vymezených turonských kolektorů Ca a Cb. Proto by nové vodárenské vrty k odběru starých vod v budoucnu měly být vystrojovány tak, že budou odtěsněny nad bází TUR5.

Je třeba doporučit důsledně dbát i na opatření opačného charakteru, tzn. při odběru z mělkého turonského kolektoru Cb nepřipustit hloubku vrtů tak, aby došlo k propojení s hlubším kolektorem Ca a byl tak zajištěn odběr jen mladých vod. Pro drobné místní odběry je množství mladé podzemní vody v kolektoru Cb dostatečné.

Pokud by byla potřeba zvýšit vodárenskou kapacitu, tak se dle zjištěných údajů velká část staré vody (60–110 l/s) nachází v pramenech na Strenickém potoce mezi Cetnem a Podkování. Tato voda v současné době není jímana. I v tomto případě by při budování vodárenských vrtů bylo třeba je odtěsnit nad bází TUR5. V případě realizace tohoto jímací lze ovšem předpokládat zánik či výrazné snížení vydatnosti těchto pramenů a tím pokles průtoku Strenického potoka na první jednotky l/s. To bude implikovat posouzení dopadů na minimální zůstatkové průtoky a místní směrodatné limity (pokud budou na daném toku vyhlášeny) a zachování ekologických funkcí toku.

Pakliže prameny Strenického potoka neodvodňují celou strukturu (což lze předpokládat, ale velmi těžko kvantifikovat), další možný tok nezachycené staré vody lze předpokládat zhruba od pramenů Strenického potoka směrem na JV k Jizeře. Nedostatek vhodných objektů (vrtů a pramenů) pro studium v této oblasti však neumožňuje kvantifikaci tohoto odtoku. Je to tedy námět na pokračování výzkumu v území mezi Strenickým potokem a Benátkami nad Jizerou.

6. Závěrečné zhodnocení

Tato souhrnná zpráva shrnuje výsledky rozsáhlých terénních a laboratorních měření a jejich interpretace. Podrobné výsledky jsou uvedeny v kapitolách 4 a 5, proto jsou v závěrečném hodnocení prezentována pouze klíčová zjištění vztahující se k naplnění cílů projektu.

V zájmovém území byla potvrzena existence významné akumulace kvalitních podzemních vod s dobou zdržení přesahující 300 let, které představují strategický zdroj pitné vody. V průběhu projektu došlo k podstatnému zpřesnění poznatků o těchto starých vodách. Byla vymezena jejich infiltrační oblast v okolí Bezdězu, odkud se podzemní voda šíří vějířovitě převážně směrem k jihu, jihozápadu a jihovýchodu. Stará voda je následně jímána v jímacích územích Řepín a Bělá a odvodňována prameny v povodí Strenického potoka. Část podzemní vody pravděpodobně pokračuje dále k jihovýchodu směrem k řece Jizeře. Byly vysvětleny příčiny směru proudění této vody (blokace proudění kvůli vyzvedlým hráštím a čedičovým žilám) a zároveň byl interpretován její chemismus ve vztahu k horninovému prostředí, jímž protéká.

V rámci projektu byly zpřesněny poznatky o hydrogeologické stavbě území. Byla nově prokázána existence tří kolektorů (A, Ca a Cb), čímž byl revidován dosavadní model se dvěma kolektory (A a C). Izotopové složení vod potvrzuje mísení mezi kolektory Ca a Cb a zároveň vylučuje, že zvýšené stáří sledovaných vod je způsobeno přítokem vod z kolektoru A.

Staré vody jsou vázány na kolektor Ca. Zranitelnost starých podzemních vod je výrazně vyšší v místech se sníženou mocností nadložního kolektoru Cb, resp. jeho bazálního izolátoru. V těchto oblastech, zejména v infiltrační zóně, je nezbytné zajistit důslednou ochranu kvality infiltrované vody, a to i s ohledem na možné šíření perzistentních kontaminantů. Současně je nutné při návrhu a realizaci vrtů důsledně respektovat existenci dvou oddělených turonských kolektorů a zabránit jejich hydraulickému propojení. To se týká zejména vrtů pro tepelná čerpadla a nových jímacích objektů a průzkumných vrtů, které musí být technicky řešeny tak, aby nedocházelo k narušení izolátoru a ke vzniku preferenčních vertikálních cest proudění tělesy vrtů.

Na základě těchto poznatků byla navržena opatření pro kvalitativní i kvantitativní ochranu podzemních vod a posouzeno jejich současné i potenciální využití. Výsledky potvrzují, že stávající jímací území Řepín a Bělá jsou situována velmi příznivě vzhledem k proudění staré podzemní vody a představují nejvhodnější lokality pro

její využívání. Nově vymezené oblasti proudění zároveň ukazují potenciální lokality pro využití dalších zdrojů podzemní vody, a to jak v oblasti pramenů Strenického potoka, tak i vody, která dosud skrytě odtéká do řeky Jizery v jv. směru. V případě realizace těchto odběrů je však nutné počítat s možným zánikem nebo výrazným snížením vydatnosti pramenů a výrazným poklesem průtoku Strenického potoka, což vyžaduje posouzení dopadů na minimální zůstatkové průtoky a zachování ekologických funkcí toku.

Studie současně zdůrazňuje význam komplexního přístupu kombinujícího hydrostratigrafická data, hladiny podzemní vody, měření vydatnosti objektů a využití environmentálních stopovačů. Tento přístup může sloužit jako metodické východisko pro obdobně zaměřené studie.

7. Seznam použitých zdrojů

Aeschbach-Hertig W., Solomon D. K., 2013. *Noble gas thermometry in groundwater hydrology*. Burnard P. (ed.), Springer, Berlin/Heidelberg, s. 81–122.

Bruthans J., Slavík M., Mareš J., Šabatová K., Kůrková I., Nol O., 2026. *Re-Evaluation of Groundwater Flow Systems in Sedimentary Basin Based on Wide Range of Environmental Tracers, Hydrostratigraphy, and Field Measurements*. *Water*, 18, 683.

Bruthans, J., Datel, J.V. et al., 2025. *Účelová mapa hydrogeologické struktury s výskytem podzemní vody s dlouhou dobou zdržení. Včetně textových vysvětlivek a návodu k použití*. VÚV TGM a PŘF UK.

Clark I., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press, Boca Raton, 456 stran.

Corcho Alvarado J. A., Leuenberger M., Kipfer R., Paces T., Purtschert R., 2011. *Reconstruction of past climate conditions over central Europe from groundwater data*. *Quat. Sci. Rev.*, 30, 3423–3429.

Čech S., Klein V., Kříž J., Valečka J., 1980. *Revision of the Upper Cretaceous Stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin*. *Věstník Ústředního ústavu geologického*, 55, 277–296.

Česká geologická služba, 2026a. *Podzemní voda – rajony, základní odtok a zranitelnost*. https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/ [cit. 2026-03-20].

Česká geologická služba, 2026b. *Geologická mapa 1:50 000*. <https://mapy.geology.cz/geo> [cit. 2026-03-20].

Dupalová, T., Sracek, O., Vencelides, Z., Žák, K., 2012. *The origin of thermal waters in the northeastern part of the Eger Rift, Czech Republic*. *Appl. Geochem.*, 27, 689–702.

Geofond, 2026. *Databáze archivu zpráv a posudků (ASGI)*. Česká geologická služba. <https://app.geology.cz/asgi/> [cit. 2026-03-20].



Gu, J.-Q., Tong, A. L., Yang, G.-M., Hu, S.-M., Jiang, W., Lu, Z.-T., Purtschert, R., Ritterbusch, F., 2021. Reconstruction of the atmospheric $^{39}\text{Ar}/\text{Ar}$ history. *Chem. Geol.*, 583, 120480.

Hammer, Ø., Harper, D. A., 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.*, 4, 1.

Herčík, F., Herrmann, Z., Valečka, J., 1999. *Hydrogeologie české křídové pánve*. Český geologický ústav, Praha, 115 stran.

Hrabánková, A. (ed.), 2009. *Podzemní vody a prameny na územních listech speciální mapy 1:75 000: možnost využití reedice pro hodnocení současné globální klimatické změny*. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, Praha.

Hunt, A. G., 2015. *U.S. Geological Survey Noble Gas Laboratory's Standard Operating Procedures for the Measurement of Dissolved Gas in Water Samples (USGS Techniques and Methods 5-A11)*. U.S. Geological Survey, Reston.

Hynie, O., 1961. *Hydrogeologie ČSSR I. Prosté vody*. Nakladatelství československé akademie věd, 562 str.

IAEA, 2006. *Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A Guidebook*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Volume 8, 277p.

IAEA/WMO, 2018. *Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)*. Dostupné online: <https://www.iaea.org/services/networks/gnip> [cit. 2026-02-16].

Jiráková, H., Huneau, F., Hrkal, Z., Celle-Jeanton, H., Le Coustumer, P., 2010. Carbon isotopes to constrain the origin and circulation pattern of groundwater in the north-western part of the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic). *Appl. Geochem.*, 25, 1265–1279.

Jurgens, B. C., Böhlke, J. K., Eberts, S. M., 2012. *TracerLPM (Version 1): An Excel® Workbook for Interpreting Groundwater Age Distributions from Environmental Tracer Data*. *Techniques and Methods 2012*, 4-F3. U.S. Geological Survey, Reston, 60 s.

Klein, V., 1966. *Stratigrafie a litologie svrchní křídý mezi Jizerou a Labem*. *Sbor. geol. Věd, geol.*, G, 11, 49–76.

Krásný, J., 1993. *Classification of Transmissivity Magnitude and Variation*. *Ground Water*, 31, 2.

Kůrková, I. et al., 2016a. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva, Příloha č. 2/31, Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4410 – Jizerská křída pravobřežní*. Česká geologická služba.

Kůrková, I., Burda, J. et al., 2016b. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva, Příloha č. 2/35, Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4522 – Křída Liběchovky a Pšovky*. Česká geologická služba, Praha.

Kůrková, I., Bruthans, J., Balák, F., Slavík, M., Schweigstilllová, J., Bruthansová, J., Mikuš, P., Vojtíšek, J., Grundloch, J., 2019. Factors controlling evolution of karst conduits in sandy limestone and calcareous sandstone (Turnov area, Czech Republic). *Journal of Hydrology*, 574, 1062–1073.

DMR 5G, 2026. Geoprohlížeč, Zeměměřičský úřad. Dostupné online: <https://ags.cuzk.gov.cz/geoprohlizec/> [cit. 2026-02-16].

Musy, S. L., Hinsby, K., Wachs, D., Sültenfuss, J., Trolborg, L., Aeschbach, W., Schilling, O. S., Purtschert, R., 2025. Bridging the 39Ar–14C groundwater dating gap: A dual-permeability transport perspective based on numerical modeling and field data. *Water Resour. Res.*, 61, e2025WR040370.

Pačes, T., Corcho Alvarado, J. A., Herrmann, Z., Kodeš, V., Mužák, J., Novák, R., Purtschert, R., Remenarová, D., Valečka, J., 2008. The Cenomanian and Turonian aquifers of the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. In Edmunds, W. M., Shand, P. (ed.), *Natural Groundwater Quality*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford.

Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC Version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. In *US Geological Survey Techniques and Methods; Book 6, Chapter A43*. Geological Survey, Reston, 497 s.

Pátek, K., 2024. Možnost tvorby krasových kanálů v oblasti mezi povodími Úštěckého a Košáteckého potoka a vymezení povodí hlavních skupin pramenů. Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 102 s.

Starý, J., Bruthans, J., Schweigstilllová, J., Mareš, J., Procházka, M., 2024. Origin of Fracture-Controlled Conduits in Calcite-Rich Highly Productive Aquifers Impregnated with Diagenetic Silica. *Water*, 16, 687.

Svoboda, J., 1964. Regionální geologie ČSSR. Díl I Český masiv. Svazek 2. Algonkium – kvartér. Ústřední ústav geologický, Praha.

Uličný, D., 2001. Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip setting: The Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology*, 48, 599–628.

Uličný, D., Laurin, J., Čech, S., 2009. Controls on clastic sequence geometries in a shallow marine, transtensional basin: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology*, 56, 1077–1114.

Valečka, J., 1979. Paleogeografie a litofaciální vývoj severozápadní části české křídové pánve. *Sbor. geol. Věd, Geol.*, 33, 47–81.

Poděkování

Velké poděkování patří dr. D. Uličnému a dr. L. Špičákové (Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i.) za poskytnutí aktualizovaného datasetu genetických sekvencí CEN, TUR1–5 pro zájmovou oblast, které umožnilo vyčlenit kolektory Ca a Cb. Velké poděkování patří též Mgr. J. Bohadlovi (Česká geologická služba) za zpracování výše uvedených dat. Za poskytnutí těchto klíčových dat pro hydrostratigrafii české křídové pánve v zájmovém území autoři vyjadřují upřímnou vděčnost. Autoři dále děkují Ing. L. Kozlové, Bc. V. Jáskovi, Ing. F. Kloučkovi, Ing. J. Průšovi a dalším pracovníkům společností Vodárny Kladno–Mělník, a.s., Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a.s. a Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., dále Mgr. V. Ekertovi, Ing. B. Cervantesovi a J. Bendovi ze společnosti DIAMO, s.p. za spolupráci a umožnění přístupu k jímacím a monitorovacím vrtům. Poděkování patří rovněž dr. T. Weissovi, MSc. M. M. Finsovi, Bc. S. Fataciune (Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova) a dr. J. Nedvědovi (GeoHamry, s.r.o.) za pomoc při terénních pracích.