

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics

and

University Bordeaux 1



Doktorský studijní program: Hydrogeologie

Ph.D. study program: Hydrogeology

Autoreferát disertační práce

Summary of the Ph.D. Thesis

Paleohydrogeologie a karotážní metody k objasnění původu, udržitelnosti a vlastnosti proudění podzemní vody: Česká křídová pánev a Akvitánská pánev

Isotope hydrogeology and geothermal applications to clarify the origin, the sustainability and the character of groundwater flow: Bohemian and Aquitaine sedimentary basins

Mgr. Hana Jiráková

Školitelé/Supervisors

Doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CSc., Charles University, Prague

Dr. Philippe Le Coustumer, University Bordeaux-1

Dr. Frédéric Huneau, University Bordeaux-1

Prague, 2011

Školitelé - Supervisors

Doc. RNDr. HRKAL Zbyněk, CSc.
Dr. LE COUSTUMER Philippe
Dr. HUNEAU Frédéric

Charles University in Prague, Czech Republic
University Bordeaux-1, France
University Bordeaux-1, France

Oponenti - Reviewers

Dr. MICHELOT Jean-Luc
Doc. Ing. RAPANTOVÁ Nad'a, CSc

CNRS, University Paris-11, Orsay, France
University of Ostrava, Czech Republic

Další členové komise – Other committee members

RNDr. ZEMAN Josef, CSc.
RNDr. DATEL Josef, Ph.D.
Dr. CELLE-JEANTON Hélène

Masaryk University, Brno, Czech Republic
Water Research Institute, Prague, Czech Republic
Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France

Shrnutí

Kombinace metod izotopové hydrogeologie a geotermiky je významným nástrojem pro průzkum podzemních zdrojů k získávání pitné vody i geotermální energie. Tento postup byl v předkládané práci použit pro splnění hlavního cíle - zpřesnění a obohacení dosavadních znalostí o procesech napájení hluboko uložených kolektorů v Akvitánské pánvi (Francie) a o infiltračních a geotermálních dějích v České křídové pánvi (ČR) s využitím přírodních a radioaktivních izotopů a teplotních údajů.

Stabilní izotopy (^{18}O , ^2H , ^{13}C) se spolu s radioizotopy (^{14}C , ^3H) používají k odhadům střední doby zdržení podzemní vody a k objasnění klimatických podmínek v době infiltrace v časovém úseku od konce Pleistocénu do dnešní doby. Pro vytvoření věrohodných hydrogeologických modelů rozsáhlých kolektorových systémů je nezbytné správné pochopení režimu proudění podzemních vod a charakteru doplňování podzemních zdrojů. V Evropě byly rozpoznány tři způsoby dotace srážkových vod do kolektorů – (i) průběžné doplňování, (ii) přerušené doplňování během posledního glaciálního maxima a (iii) doplňování kolektorů podléhajících specifickým podmínkám.

Rozdílné geografické a klimatické podmínky ve Francii a České republice vedou k odlišnému charakteru napájení kolektorů podzemních vod. V jižní Francii, kde panují relativně mírné klimatické podmínky, nedošlo za posledních 40 tisíc let k významnějšímu přerušení napájení kolektorů. V České křídové pánvi byly z důvodu blízkosti severoevropského ledovce podmínky infiltrace komplikovanější. Maximální doba zdržení podzemních vod zde dosahuje 11 tisíc let. Tento odhad doby zdržení se však vztahuje k době infiltrace do horninového prostředí a nikoliv k období, ve kterém došlo ke srážkové činnosti. Nízký obsah stabilních izotopů totiž naznačuje, že infiltrovaná voda pochází z tání ledovců pokrývajících severní Evropu, ke kterému došlo po posledním glaciálním maximu, před 18 – 20 tisíci lety. Studium izotopů uhlíku obsažených v podzemních vodách České křídové pánve pomohlo popsat probíhající chemické procesy v kolektorech, a tím přispět k objasnění původu rozpuštěného uhlíku v podzemních vodách.

V České křídové pánvi bylo kromě geochemických dat vyhodnoceno více než sto teplotních záznamů z karotážních měření, které byly využity k výpočtu geotermálního gradientu. Teplotní pole je v této geotermálně významné oblasti narušeno vertikálním prouděním podzemních vod, různorodou petrografií a topografií. To vede ke složitému plošnému rozložení tepelného toku řízeného prouděním podzemních vod, které odráží tektonickou stavbu území a četnost výskytu vulkanitů. Popsaný výzkum přinesl nové informace o geotermálním poli, ale také údaje důležité pro konstrukci realistických hydrogeologických modelů.

Abstract

Isotopic investigations combined with geothermal applications represent powerful tools for the exploration of groundwater potential as a drinking or geothermal resource. This Ph.D. thesis combines both approaches in order to enrich and update the knowledge concerning the aquifer recharge processes in the Aquitaine Basin (France) and the aquifer recharge processes and geothermal potential in the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic).

Stable isotopes (^{18}O , ^2H , ^{13}C) combined with radioisotope data (^{14}C , ^3H) are used to estimate the recharge timing and climatic conditions prevailing during the infiltration from the Late Pleistocene up to modern time. The character of groundwater recharge and regime are necessary to generate relevant source data for the accurate modelling of complex groundwater systems. Three groups of groundwater recharge types can be distinguished throughout Europe – (i) continuous recharge and (ii) interrupted recharge during Last Glacial Maximum and (iii) a group corresponding to particular recharge conditions.

The contrasted geographic and climate conditions at both study sites in France and Czech Republic have entailed a great heterogeneity of the recharge conditions and processes. Southern France, with generally mild climatic conditions during the last 40 ka BP, did not experienced considerable hiatus in groundwater recharge. The residence time of groundwater in the Bohemian aquifers is estimated about 11 ka BP at the maximum but the depletion in the stable isotopes suggests that this groundwater originates in the melting of the north European ice sheets after the Last Glacial Maximum period, i.e. 18-20 ka BP. Further isotopic investigations indicated numerous geochemical processes within the Bohemian aquifers.

Information on groundwater geochemistry was supplemented in the Czech case study by geothermal data in order to improve our knowledge of groundwater flow and dynamics. More than a hundred of temperature records from well-logging measurements were used to assess the geothermal gradient in the Bohemian Cretaceous Basin. Many phenomena can affect the thermal field in the region. Vertical groundwater flow and variations in the lithology and the topography lead to a complicated areal distribution of the geothermal gradient and the heat flux which is dominantly controlled by groundwater. Shallow tectonic structures and numerous volcanic rocks exercise an influence on groundwater flow and therefore exert a secondary effect on the thermal field. The geothermal investigation provided useful information on the geothermal resources within the region but also represents an important tool for understanding groundwater flow, and for constructing realistic hydrogeological models in such a complex geological, tectonic and geothermal context.

Obsah

Shrnutí	iii
Seznam obrázků a tabulek	viii
Seznam zkratk	ix
1 Úvod	2
2 Cíle práce	3
3 Materiál a metodika	4
3.1 Metody izotopové hydrogeologie	5
3.2 Geotermální metody	7
4 Výsledky a diskuze	8
4.1 Pleistocénní napájení hluboko uložených zvodní v severní části Akvitánské pánve (Francie)	8
4.1.1 Geochemie	8
4.1.2 Stabilní izotopy	8
4.1.3 Izotopy uhlíku a střední doba zdržení podzemních vod	9
4.2 Stanovení původu rozpuštěného uhlíku a střední doby zdržení podzemních vod v České křídové pánvi pomocí izotopů uhlíku	10
4.2.1 Geochemie	10
4.2.2 Stabilní izotopy	10
4.2.3 Původ uhlíku v podzemních vodách ČKP a radiouhlíkové datování	11
4.3 Stanovení charakteru pleistocénního napájení hlubokých sedimentárních struktur v Evropě	12
4.3.1 Paleoklima v Evropě a stabilní izotopy	12
4.3.2 Charakter napájení kolektorů v Evropě	12
4.4 Geotermální hodnocení severozápadní části České křídové pánve	13
4.4.1 Litologické vlastnosti hornin ČKP a stanovení koeficientu tepelné vodivosti	13
4.4.2 Stanovení geotermálního gradientu	13
4.4.3 Rozložení tepelného toku	14
5 Závěry	15
6 Použitá literatura	16
Životopis	33
Seznam publikací	37
Seznam konferencí	38

Table of content

Abstract	v
Figure and table list.....	viii
Abbreviation list.....	ix
1 Introduction.....	18
2 Aims of the study	19
3 Material and methods.....	20
3.1 Isotopic approach	21
3.2 Geothermal approach	23
4 Results and discussion	24
4.1 Palaeorecharge conditions of the deep aquifers of the Northern Aquitaine region (France)	24
4.1.1 Geochemistry	24
4.1.2 Stable isotope composition	24
4.1.3 Carbon isotopes and mean residence time of groundwaters	25
4.2 Carbon isotopes to constrain the origin and residence time of groundwater in the Cretaceous Basin of Bohemia (Czech Republic)	26
4.2.1 Geochemistry	26
4.2.2 Stable isotope composition	26
4.2.3 Carbon origin in the BCB groundwaters and radiocarbon dating.....	27
4.3 Insight into palaeorecharge conditions of European deep aquifers.....	28
4.3.1 Palaeoclimatic conditions in Europe and stable isotopes.....	28
4.3.2 Recharge conditions in Europe	28
4.4 Geothermal assessment of the deep aquifers of the north western part of the Bohemian Basin, Czech Republic	29
4.4.1 Lithological properties of the BCB rocks and thermal conductivity	29
4.4.2 Geothermal gradient determination.....	29
4.4.3 Heat flux distribution	30
5 Conclusion	31
6 Reference list.....	32
Curriculum vitae.....	35
Publication list.....	37
Conference list	38

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1. Vymezení Akvitánské pánve (AP), České křídové pánve (ČKP) a zájmových oblastí.....	3
Obr. 2. Zobrazení zastoupení stabilních izotopů v zájmové oblasti AP s lokální meteorickou přímkou. (BRGM, 1999, 2004; Petelet-Giraud et al., 2005).	8
Obr. 3. Kolísání obsahu kyslíku-18 v závislosti na střední době zdržení podzemních vod stanovené modelem Fontes&Garnier (1979)	9
Obr. 4. Obsahy izotopů uhlíku v podzemních vodách ČKP.	11
Obr. 5. Prostorové rozložení tepelného toku v oblasti Benešovsko-Ústeckého zvodněného systému.....	14
Tab. 1. Přehled použitých dat pro jednotlivé studie v AP, ČKP a na vybraných evropských lokalitách.	5

Figure and table list

Fig. 1. Delineation of the Aquitaine Basin (AB, France) and Bohemian Cretaceous Basins (BCB, Czech Republic) and the study areas.	19
Fig. 2. Stable isotope composition of waters in the Aquitaine Basin aquifer system with plot of the Local Meteoric Water Line (BRGM, 1999, 2004; Petelet-Giraud et al., 2005).....	25
Fig. 3. Evolution of oxygen-18 in relation to the groundwater ages with error bars corrected by the F&G model (1979). Waters containing nitrate are highlighted in grey colour.	26
Fig. 4. Evolution of C isotopes in BCB groundwaters.	27
Fig. 5. Heat flux distribution in the Benešov – Ústí aquifer system.	30
Tab 1. Comparison of data character AB, BCB and selected European aquifers.	21

Seznam zkratek – Abbreviation list

AP / AB	Akvitánská pánev / Aquitaine Basin
ČKP / BCB	Česká křídová pánev / Bohemian Cretaceous Basin
BUAS	Benešovsko-Ústecký zvodněný systém / Benešov-Ústí aquifer system
LGM	Poslední Glaciální maximum / Last Glacial Maximum
pmC	Procento moderního uhlíku / percent of modern Carbon

ČESKÁ ČÁST

1 Úvod

Udržitelný rozvoj je v oblasti vodního hospodářství a průmyslu aktuálně velmi diskutované téma. Ale podobně jako v mnoha světových zemích je udržitelnost podzemních zdrojů také ve Francii a v České republice zásadně ohrožena.

Zdroje podzemní vody jsou součástí mělkých nebo hlubokých zvodněných systémů. Mělké zvodně jsou dostupnější a proto technicky a ekonomicky snadněji dosažitelné. Jejich nevýhodou je však vysoká zranitelnost vůči mnohým povrchovým jevům a klimatickým změnám a proto mohou často být jen dočasným zdrojem kvalitní pitné vody. Z tohoto důvodu jsou zdroje mělkých zvodní a/nebo přípovrchových krystalinických hornin čím dál více nahrazovány hluboko uloženými zdroji podzemních vod. Nejčastěji se jedná o zvodně napjaté, které jsou nadložními nepropustnými horninami izolovány od povrchových projevů. Výhody plynoucí z využití hlubokých zvodní vedly v posledních desetiletích k jejich intenzivnímu čerpání jehož vlivem došlo k poklesům úrovní hladiny podzemní vody a také ke změně některých chemických parametrů. Správa vodního hospodářství by proto měla na stávající stav optimálně reagovat stanovením vhodných a nevhodných oblastí k čerpání a jeho regulováním. Toho lze dosáhnout pouze pokud je o zvodněných systémech dostatek známých informací, především o způsobu jejich doplňování během celého pozdního pleistocénu a o režimních změnách. Ke zlepšení současného stavu znalostí může posloužit kombinace dvou metod – izotopové hydrogeologie a geotermiky – vedoucích k objasnění geochemických procesů probíhajících v kolektorových strukturách, režimu podzemních vod nebo toho, jestli docházelo k napájení kolektorů i během velmi chladných období během posledního glaciálního maxima (LGM).

Stabilní izotopy kyslíku-18, deuteria a uhlíku-13, stejně jako radioaktivní izotopy tritia a uhlíku-14 nabízí širokou škálu možností pro zkoumání procesů v rámci koloběhu vody (Clark a Fritz, 1999) a pro posouzení střední doby zdržení podzemních vod včetně studia klimatických podmínek v době infiltrace (Rozanski et al., 1992). Přesto je třeba mít na zřeteli, že řada procesů v rámci kolektorů může natolik změnit původní izotopové složení, že celý výzkum výrazně zkomplikuje. Do hydrogeologických modelů bývá z tohoto důvodu vnesena velká nejistota týkající se rovnoměrnosti dotace kolektorových systémů během posledního glaciálu a také dynamiky proudění vzhledem k její velké časové i prostorové proměnlivosti. Mnoho informací o chronologii dotace významných evropských kolektorových systémů je nepřesných, případně zcela chybí. Pro vytvoření věrohodných numerických hydrogeologických modelů je nutné uvažovat konkrétní geologickou i geochemickou situaci a v případě akumulací termálních vod také přenos tepla prouděním. Geofyzikální měření, především ta termometrická, jsou při studiu

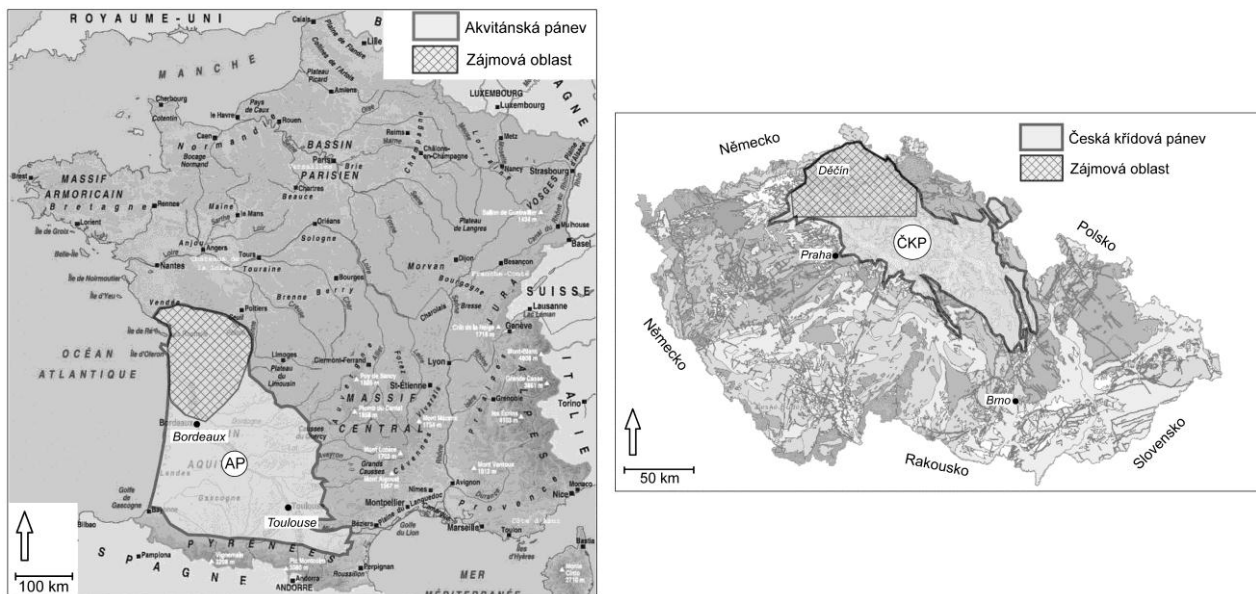
dynamiky proudění velmi užitečná. Díky teplotním profilům ve vrtech je možné posoudit vertikální přenos kapaliny a s ní také tepla. Geotermální studie bývají však komplikovány mnohými faktory narušující přírodní geotermální gradient a tepelný tok.

2 Cíle práce

Trvalá udržitelnost zdrojů pitných a termálních vod stojí na pozadí celého Ph.D. studia. Předkládaná práce se zaměřila na dva hydrogeologicky významné evropské kolektorové systémy křídového stáří (Obr. 1), a to:

- Českou křídovou pánev, Česká republika (ČKP)
- Akvitánskou pánev, Francie (AP)

Obě sedimentární pánve vytváří systém několika nad sebou uložených kolektorů, které jsou intenzivně vodohospodářsky využívány. Přestože ani jeden systém není v současnosti existenčně ohrožen, změna kvality vody a pokles hladin podzemních vod byli zaznamenány již na mnoha místech. Pro každou lokalitu byla zvolena taková metoda, ke které bylo dostatek dostupných dat. Zatímco metody izotopové hydrogeologie byly testovány na obou lokalitách, geotermální výzkum mohl být proveden pouze v ČKP. Celá práce je rozdělena do několika částí, ve kterých je odkazováno na samostatné studie vedených buď v Čechách nebo ve Francii.



Obr. 1. Vymezení Akvitánské pánve (AP), České křídové pánve (ČKP) a zájmových oblastí. (šrafované).

První část práce tvoří tři případové studie v ČKP a AP zaměřené na metody izotopové hydrogeologie, tj. metody izotopů vodíku, kyslíku a uhlíku umožňující objasnit jakým způsobem docházelo k doplňování zásob podzemních vod a jaký vliv na to měly klimatické změny a lidská činnost. V ČKP byl navíc kladen důraz na výzkum izotopů uhlíku, které umožňují vysledovat původ rozpuštěného uhlíku v podzemních vodách. Dílčí výsledky z obou studií byly dále konfrontovány s podobnými studii v různých evropských sedimentárních hydrogeologických strukturách. Toto srovnání má za cíl popsat různorodý charakter a chronologii doplňování zdrojů podzemních vod v závislosti na odlišné geografické pozici sedimentárních struktur a klimatických výkyvů během pozdního pleistocénu.

Druhá část je zaměřena na geotermální výzkum ČKP. Součástí této pánevní struktury se v její severozápadní části nachází nejrozsáhlejší akumulace termálních vod v zemi, tzv. Benešovsko-Ústecký zvodněný systém (BUAS), který se právem jeví jako nejslibnější oblast pro geotermální rozvoj v České republice. Karotážní profily umožňují popsat geotermální gradient a dynamiku proudění podzemních vod, která hraje při přenosu tepla významnou roli. V sedimentech konvekční proudění často převažuje nad kondukcí a proto se k určení přirozeného tepelného toku musí přistupovat s velkou obezřetností.

Ačkoli se jednotlivé studie v rámci Ph.D. výzkumu týkají zdánlivě odlišných témat, hlavním cílem celého výzkumu zůstává, za pomoci různých metod, objasnění režimu proudění podzemních vod ve dvou vodohospodářsky významných lokalitách v České republice a ve Francii s ohledem na trvale udržitelný rozvoj podzemních zdrojů.

3 Materiál a metodika

Režim proudění podzemních vod a jakým způsobem a kdy docházelo k doplňování podzemních zdrojů srážkovou vodou byli studovány pomocí metod izotopové hydrogeologie a geofyziky, konkrétně:

- (i) interpretace a vyhodnocení izotopových dat jsou velmi užitečné pro určení charakteru dotace, proudění a jeho vztahu ke klimatickým změnám a lidským faktorům
- (ii) geotermální data získaná z hlubokých vrtů odrážejí skutečné teplotní podmínky v sedimentární formaci a umožňují studium geotermálního potenciálu a tepelného toku

Studium bylo rozděleno do několika samostatných výzkumů:

- (i) studium pleistocénního doplňování kolektorů, AP
- (ii) studium původu uhlíku v podzemních vodách, ČKP
- (iii) charakter doplňování kolektorových formací v Evropě
- (iv) geotermální potenciál v ČKP

Charakter dat použitých pro studie (i)-(iv) je uveden v přehledu Tab. 1. Jednotlivé databáze byly sestaveny na základě rozsáhlé rešerše dostupných materiálů shromážděných během posledních desetiletí. Tato data jsou platná, ale musí být vyhodnocena znovu a případně s využitím novějších poznatků a zkušeností v oblasti izotopové hydrogeologie a karotážních měření. Zatímco ke studiu izotopů nebylo třeba žádných nových analýz, geotermální výzkum ČKP se kromě archivních dat opíral o data nově naměřená v rámci projektu GAČR 205/07/0691. Veškeré převzatá data z literatury jsou řádně citována.

Tab. 1. Přehled použitých dat pro jednotlivé studie v AP, ČKP a na vybraných evropských lokalitách.

	AP	ČKP	evropské kolektory
zeměpisné souřadnice	x	x	-
stratigrafie	x	x	x
teplota v dané hloubce	x	x	-
chemismus hlavních kationtů (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^-)	x	x	-
pH	x	x	-
^3H	x	x	-
$\delta^{18}\text{O}$	x	x	x
$\delta^2\text{H}$	x	x	x
$\Delta^{14}\text{C}$	x	x	x
$\delta^{13}\text{C}$	x	x	x
teplotní profily z karotáže	-	x	-

3.1 Metody izotopové hydrogeologie

Ačkoli na území ČKP a AP bylo již v minulosti provedeno relativně hodně izotopových výzkumů, stále mnoho nejasností zůstává kolem chronologie doplňování kolektorů. V prvním kroce byl za pomoci Piperova grafu určen geochemický typ podzemní vody. Obsah stabilních izotopů ^{18}O a ^2H byl zhodnocen na základě světové meteorické přímky. Poloha vzorků vody vůči této přímce značí, jestli k infiltraci došlo v současnosti nebo v období s výrazně odlišnými klimatickými podmínkami. Změny teplot v atmosféře, kde dochází ke vzniku srážek se totiž projevují v zastoupení těžkých a lehkých izotopů v molekule vody ($\delta^{18}\text{O}$ a $\delta^2\text{H}$). Izotopově lehlé vody jsou proto důkazem infiltrace během chladného období, pravděpodobně v pozdním pleistocénu.

Jakmile se vyčlení skupina vod naznačující infiltraci v tomto období, může být tato hypotéza ověřena metodou stanovení střední doby zdržení. Obě zkoumané pánevní struktury musí být však

testovány s individuálním přístupem, neboť se odlišují jak v geologii tak geochemickém složení. AP je tvořena především karbonáty zatímco v ČKP dominují horniny s vyšším obsahem písku. Litologii je třeba vzít v úvahu v rámci výběru vhodného modelu pro datování. Geochemické složení podzemní vody, určené v prvním kroku, nyní pomůže objasnit, k jakým geochemickým procesům uvnitř kolektorů může docházet. Kromě přirozených procesů může být chemické složení vod ovlivněno antropogenní činností, na kterou upozorní zvýšený obsah tritia nebo dusičnanů. Dalším zkoumaným izotopem je ^{13}C , kterého lze využít jednak při určování uzavřenosti systému vůči atmosferickému CO_2 , jednak v kombinaci s ^{14}C k identifikaci zdroje obsaženého uhlíku. Oba izotopy uhlíku jsou výbornými stopovači izotopové výměny a různých interakčních procesů. Pro stanovení střední doby zdržení byly testovány různé metody, z nichž v AP se jeví nejvhodnější model Fontes & Garnier (Fontes a Garnier, 1979) uvažující hmotnostní i izotopovou rovnováhu. V ČKP byla pro stanovení stáří podzemní vody zvolena metoda ředění (dilution model), protože složitá geologická a tektonická stavba území a interakční procesy nedovolují použití jiných metod. Před samotným datováním je zde nutno jednotlivé geochemické procesy nejdříve rozpoznat a popsat, aby mohla být metoda správně použita.

Výpočet střední doby zdržení byl proveden radiouhlíkovou metodou podle rovnice:

$$t = -8267 \cdot \ln(a^{14}\text{C}_{\text{DIC}}/q \cdot a_0^{14}\text{C}),$$

kde $a^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$ je naměřená aktivita ^{14}C , $a_0^{14}\text{C}$ odpovídá obsahu ^{14}C v moderních srážkách (100 pmC), q je faktor ředění stanovený podle toho, jaká chemická reakce se podílí na výsledném izotopovém složení, např.

$$q_{\text{CO}_2(\text{q})} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC měřený}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2(\text{q})}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{infiltrace}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2(\text{q})})$$

$$q_{\text{kalcit}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC měřený}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{kalcit}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{infiltrace}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{kalcit}}),$$

kde $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC měřený}}$ představuje množství ^{13}C naměřené ve vzorcích podzemních vod; $\delta^{13}\text{C}_{\text{infiltrace}}$ představuje množství ^{13}C v infiltrující vodě, které pro pozorované rozmezí hodnot pH odpovídá půdnímu obsahu ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}_{\text{infiltrace}} \sim \delta^{13}\text{C}_{\text{půda}} - 23 \text{ ‰}$, Clark a Fritz, 1999), $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2(\text{q})}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{kalcit}}$ jsou průměrné hodnoty pozorované v zemském plášti a karbonátových horninách.

Na základě znalosti průměrné doby zdržení podzemních vod lze odhadnout, kdy došlo k infiltraci a tím lze tedy určit, jestli i v období posledního glaciálního maxima (LGM), tj. před 18-20 tisíci lety, byly podmínky k infiltraci příznivé či nikoliv.

V posledním kroku je přistoupeno k interpretaci naměřených hodnot stabilních izotopů spolu s výsledky z radiouhlíkového datování umožňující diskuzi o palaeoklimatických podmínkách.

Na závěr posloužily veškeré výsledky z AP a ČKP pro souhrnou studii evropských zvodněných systémů zaměřenou na rozpoznání rozdílného charakteru doplňování kolektorů v různých zeměpisných šířkách. K tomuto účelu bylo nutné vycházet z nejnovějších poznatků o pleistocénním klimatu, rozšíření ledovců a permafrostu.

3.2 Geotermální metody

Geotermální výzkum ČKP má aktualizovat a zpřesnit dosavadní znalosti o režimu proudění podzemních vod. Vzhledem k dlouhodobému čerpání termálních vod v BUAS, existuje velké množství teplotních dat z různých projektových studií. Teplotní záznam měřený kontinuálně ve vertikálním vrtu přináší cenné informace pro hydrogeology, především o charakteru vertikálního proudění mezi kolektory (Beck, 1982). Nová měření, která byla v této studii zahrnuta do hodnocení tepelného potenciálu oblasti vůbec poprvé, byla provedena za ustálených teplotních i hydraulických podmínek. Teplota byla měřena nepřetržitě při postupném zapouštění vysoce citlivostního termometru do vrtu.

Tepelný tok se vypočítá podle rovnice:

$$q = G * \lambda,$$

kde q je tepelný tok (W/m^2), G je geotermální gradient (K/m) a λ je součinitel tepelné vodivosti (W/mK).

Geotermální gradient byl určen přímo z teplotní křivky každého vrtu s ohledem na vertikální proudění. Aby se vyloučil jeho rušivý vliv na přirozený geotermální gradient, byly uvažovány pouze úseky nad a pod přítokem podzemní vody do vrtu. Kromě vertikálního proudění je gradient také významně ovlivněn litologickými vlastnostmi hornin. Při určení gradientu je také důležité odstranit rušivý vliv topografie. Tato oprava byla provedena v Geofyzikálním ústavu AVČR s využitím softwaru COMSOL umožňující kvantifikaci odchylek gradientu způsobených topografií.

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven na základě podrobného studia litologických profilů vybraných vrtů. Výsledky litologické studie spolu s dřívějšími měřeními na stanovených horninových typech (Čermák a Jetel, 1985; Štulc, 1994) umožnily stanovit teplenou vodivost.

4 Výsledky a diskuze

Všechny výsledky získané během Ph.D. studia byly postupně předloženy k publikaci. Hlavní část práce je tudíž tvořena čtyřmi impaktivními články. V následujících kapitolách nesoucí názvy publikovaných článků budou stručně uvedeny nejdůležitější výsledky.

4.1 Pleistocénní napájení hluboko uložených zvodní v severní části Akvitánské pánve (Francie)

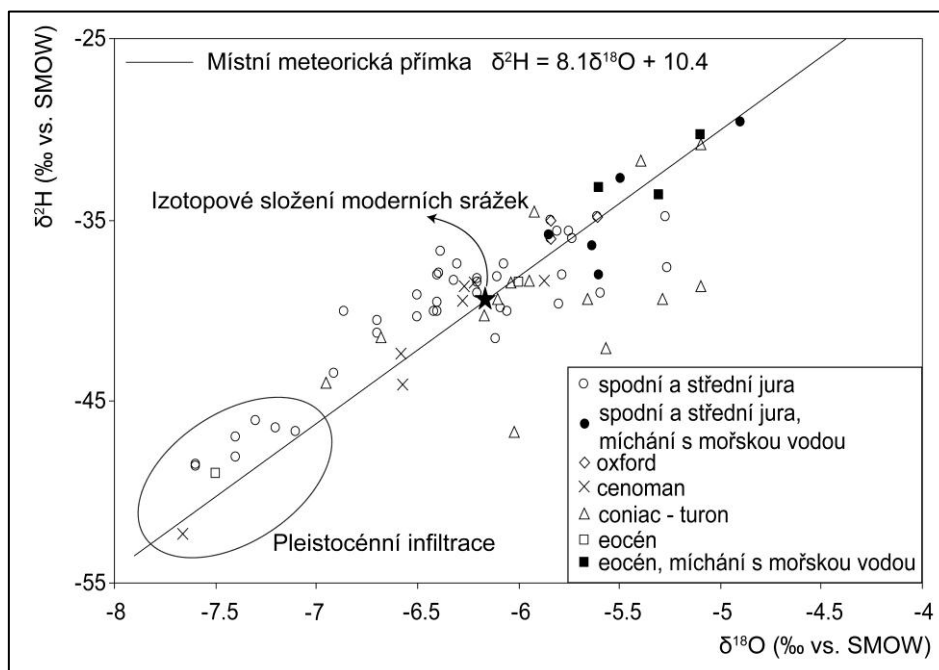
Journal of Hydrology

4.1.1 Geochemie

V severní části AP byly rozpoznány čtyři hlavní geochemické typy podzemních vod s převahou Ca-HCO₃ typu, poukazující na karbonátovou povahu horninového prostředí. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že mezi horninou a podzemní vodou probíhá intenzivní izotopová výměna. Několik vzorků potvrdilo zvýšený obsah dusičnanů, který spolu s tritiem potvrzuje míchání s moderní příměsí. Vzorky z pobřežní zóny Atlantiku jsou nabohaceny Na-Cl.

4.1.2 Stabilní izotopy

Zastoupení stabilních izotopů v podzemní vodě ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) poukazuje na povahu zvodněného systému a různý charakter dotace srážkových vod (Obr. 2).

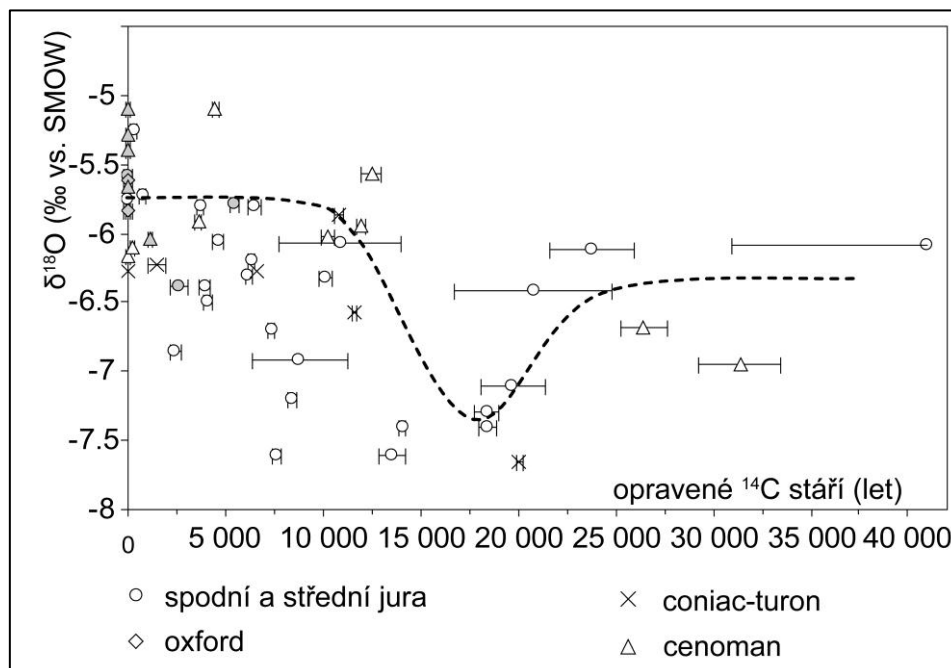


Obr. 2. Zobrazení zastoupení stabilních izotopů v zájmové oblasti AP s lokální meteorickou přímkou. (BRGM, 1999, 2004; Petelet-Giraud et al., 2005).

Na Obr. 2. je zobrazena lokální meteorická přímka s rovnicí $\delta^2\text{H} = 8.1\delta^{18}\text{O} + 10.4$ ($r^2 = 0,97$), která téměř přesně odpovídá meteorické přímce určené Craigovou rovnicí (Craig, 1961). Hodnoty současných srážek se pohybují okolo 6,2‰ pro $\delta^{18}\text{O}$ a - 39,2‰ pro $\delta^2\text{H}$. Všechny studované vzorky se pohybují v rozsahu od - 7,7‰ do - 4,9‰ pro $\delta^{18}\text{O}$ a od - 52,3‰ do - 29,6‰, pro $\delta^2\text{H}$. Nejnižší hodnoty naznačují, že k infiltraci došlo za chladnějších klimatických podmínek, než které panují v současnosti, tedy pravděpodobně v průběhu chladných období pozdního pleistocénu.

4.1.3 Izotopy uhlíku a střední doba zdržení podzemních vod

Aktivita radiouhlíku je v celém území značně různorodá. Místy je téměř nulová, což může svědčit o relativně vysokém stáří podzemních vod. Ukázalo se, že s klesající aktivitou ^{14}C exponenciálně vzrůstá $\delta^{13}\text{C}$. Vzrůstání $\delta^{13}\text{C}$ je důsledek rozpouštění karbonátových hornin, které mají vzhledem ke svému stáří vesměs nulový obsah radiouhlíku. Nízký obsah radiouhlíku ve vodách může být tedy způsoben izotopovou výměnou mezi vodou a horninou a ne pouze dlouhou dobou zdržení podzemní vody v kolektoru.



Obr. 3. Kolísání obsahu kyslíku-18 v závislosti na střední době zdržení podzemních vod stanovené modelem Fontes & Garnier (1979). Šedou barvou jsou označeny vody s obsahem dusičnanů.

Pro datování je nezbytné určit aktivitu radiouhlíku v době infiltrace, k čemuž se používá různých modelů. Srovnání výsledků datování podzemních vod podle modelu Fontes & Garnier spolu s obsahem stabilních izotopů je zobrazeno na Obr. 3., na kterém lze vyčlenit tři skupiny

podzemních vod: (i) holocénní infiltrace za posledních 10 tisíc let – izotopově těžké vody, (ii) LGM infiltrace před 20 - 15 tisíci lety – izotopově lehké vody a (iii) infiltrace před LGM. Jak je patrné z Obr. 3., datovací výsledky ukazují, že k infiltraci docházelo kontinuálně bez výrazného přerušení vlivem méně příznivých podmínek v době LGM, jak je často mezi různými autory diskutováno.

4.2 Stanovení původu rozpuštěného uhlíku a střední doby zdržení podzemních vod v České křídové pánvi pomocí izotopů uhlíku

Applied Geochemistry

4.2.1 Geochemie

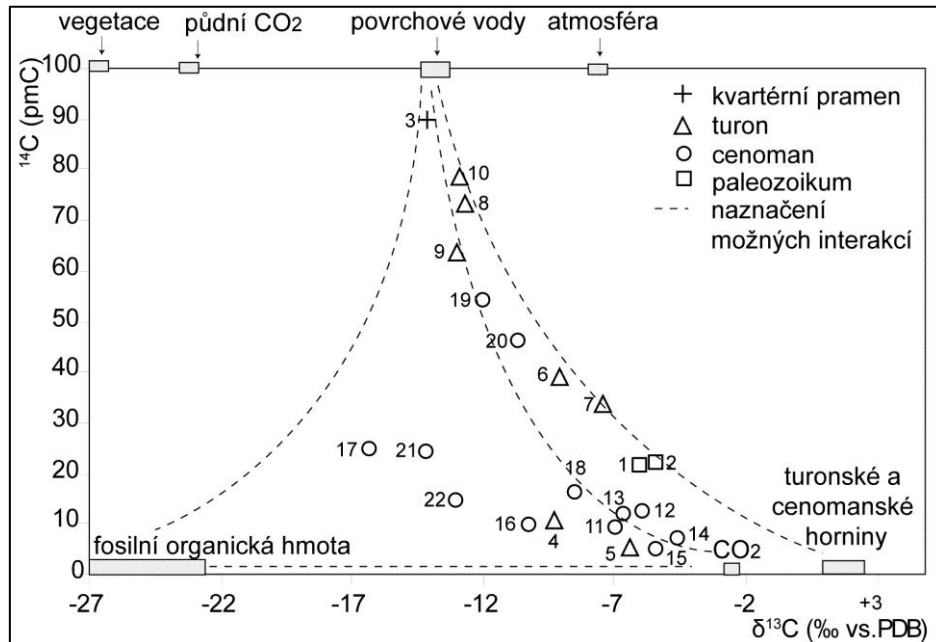
Turonské i cenomanské vody jsou vesměs Ca-HCO₃ typu. Jelikož zde horniny nejsou dominantně tvořeny karbonáty (Herčík et al., 1999), za zvýšený obsah Ca²⁺ a HCO₃⁻ iontů zřejmě může rozpouštění cementového tmelu v pískovcích. Místy byly zjištěny zvýšené koncentrace iontů SO₄²⁻ a Cl⁻, které pochází pravděpodobně z permokarbonských sedimentů uložených pod cenomanskou zvodní. Vody typu Ca-HCO₃ se pozvolně mění na Na-Ca-HCO₃. Důvod tohoto procesu je pravděpodobně postupné míchání podzemní vody s vodou s charakterem solanky, která může být v malých množstvích uzavřena v pórech hornin. Tento jev se v literatuře označuje jako „aquifer freshening“ a byl již posán ve mnoha sedimentárních strukturách (Appelo a Postma, 2005).

4.2.2 Stabilní izotopy

Podzemní vody jsou v Českém masivu vesměs meteorického původu. Ve studované oblasti bylo k dispozici jen velmi omezené množství měřených dat. Hodnoty δ¹⁸O se pohybují od - 11.2‰ do - 8.6‰. Cenomanské vody se vyznačují nízkými hodnotami δ¹⁸O. To může být způsobeno buď pozicí infiltrační oblasti ve vyšších nadmořských výškách nebo tím, že infiltrovaná voda vznikla v období glaciálu. Někteří autoři jsou přesvědčeni, že v těchto zeměpisných šířkách nemohla být během LGM voda infiltrována vzhledem k přítomnosti permafrostu a severoevropského ledovcového štítu.

4.2.3 Původ uhlíku v podzemních vodách ČKP a radiouhlíkové datování

Studium izotopů uhlíku (^{13}C and ^{14}C) je účelné nejen pro datování, ale také k diskuzím o původu uhlíku v podzemních vodách. Sledované vzorky podzemní vody s odpovídajícím izotopovým složením jsou znázorněny na Obr. 4.



Obr. 4. Obsahy izotopů uhlíku v podzemních vodách ČKP.

Z Obr. 4. je patrné velké rozpětí hodnot obou izotopů, z kterého lze usoudit na míchání uhlíku z různých zdrojů. Konkrétně lze vysledovat následující interakce: i) podzemní voda – plynný CO₂ ze svrchního pláště, (ii) podzemní voda – hornina, (iii) podzemní voda – fosilní organický materiál a (iv) podzemní voda – povrchová voda.

Na základě těchto zjištění byl pro datování zvolen model ředění (dilution model), který při výpočtu uvažuje výše zmíněné procesy. Výsledky potvrzují existenci moderních srážkových vod v podzemních systémech, ale vody starých, izotopově lehčích. Nejdelší střední doba zdržení byla odhadnuta na 11 tisíc let, což neodpovídá nejchladnějšímu období LGM. Z toho vyplývá, že v době LGM nemohla voda infiltrovat pod zemský povrch a tak zůstala akumulována v podobě sněhu a ledu. Do kolektorů ČKP se mohla infiltrovat až po roztátí severoevropského ledovce, vysvětlující tak absenci starších vod.

4.3 Stanovení charakteru pleistocénního napájení hlubokých sedimentárních struktur v Evropě

Hydrogeology Journal

4.3.1 *Paleoklima v Evropě a stabilní izotopy*

Klimatické podmínky se výrazně podepisují na charakteru napájení kolektorů. Pro studium pleistocénního napájení je proto nutné porozumět tehdejšímu klimatickým výkyvům na evropském kontinentě. Pro studium byly vybrány některé významné hydrogeologické sedimentární struktury v různých zeměpisných šířkách od Portugalska až po Estonsko. Zvodněné systémy tvoří dokonalý archiv paleoklimatických podmínek. Během chladných dob, především na severu Evropy, nemohly srážky snadno infiltrovat a tak se v oblastech pokrytých permafrostem hromadily jako led a sníh. K infiltraci mohlo dojít až po odstupu permafrostu a ledovců.

Stabilní izotopy umožnily stanovit povahu klimatu v době vzniku srážky, ale časový úsek od její infiltrace je nutno konzultovat s výsledky datovacích metod. Odlišnost zeměpisných poloh studovaných kolektorů a klimatických podmínek vysvětluje široké rozpětí hodnot $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$. Izotopově nejtěžší vody byly zjištěny ve Španělsku a Portugalsku, zatímco izotopově nejlehčí se nachází v severoevropských zemích. I přes velmi odlišné absolutní hodnoty lze vysledovat absolutní odchylku hodnot mezi moderními srážkami a srážkami v době LGM., tj. od 1.2‰ do 2.7‰ pro $\delta^{18}\text{O}$ a od 8.2‰ do 20‰ pro $\delta^2\text{H}$.

4.3.2 *Charakter napájení kolektorů v Evropě*

Jak bylo řečeno již dříve, podzemní voda v sobě uchovává informaci o panujících klimatických podmínkách v době jejího vzniku. Hlavním cílem této studie bylo zjistit, jakým způsobem se v různých klimatických pásmech projevilo na napájení kolektorů chladné pleistocénní klima, především během LGM. Podobná diskuze byla již součástí práce Darlinga (2004), který popsal přerušování napájení na několika evropských pískovcových systémech. Nicméně stále je obtížné s jistotou stanovit absolutní absenci napájení v době LGM a mnozí autoři jsou přesvědčeni o existenci průběžného napájení po dobu celého pozdního pleistocénu – holocénu. Naše zjištění potvrzuje značné odlišnosti v napájení evropských kolektorů a byly tak vytvořeny tři skupiny podle charakteru napájení:

- (i) *Průběžné napájení*: Tato skupina zahrnuje kolektory, které byly napájeny kontinuálně během celého pozdního pleistocénu včetně nejchladnějšího období LGM. Do této skupiny náleží vody, jejichž střední doba zdržení může být až 40 tisíc let odpovídající limitu

radiouhlíkového datování (např. Portugalsko, Španělsko, jižní Francie, východní Rumunsko).

(ii) *Přerušené napájení během LGM*: Tato skupina zahrnuje kolektory, které nemohly být v době LGM napájeny z důvodu přítomnosti permafrostu nebo ledovců. Většinou je zaznamenána střední doba zdržení až 40 tisíc let (s přerušením okolo LGM), ale v některých kolektorech však nejsou ani záznamy o infiltraci před LGM. Bylo by však nesprávné tvrdit, že infiltrace neexistovala, neboť absence může být způsobeno pouze nedostatkem posuzovaných vzorků (např. Severní Francie, Švýcarsko, Maďarsko, Belgie, Velká Británie, Polsko).

(iii) *Speciální případy*: Tato třetí skupina obsahuje doposud nezařazené kolektory, ve kterých byl rozpoznán speciální způsob napájení. Mohlo se jednat buď o infiltraci skrz kanály utvořené v ledovcích nebo infiltraci roztáté vody z pleistocénního zalednění (např. Dánsko, Česká republika, Estonsko).

4.4 Geotermální hodnocení severozápadní části České křídové pánve

Geothermics

4.4.1 Litologické vlastnosti hornin ČKP a stanovení koeficientu tepelné vodivosti

Vybrané vrty, u kterých byla určena litologie po celém profilu, byly rozděleny do pěti skupin podle celkového zastoupení písku. V zájmové oblasti se jeví pozvolný ale velice zřetelný přechod od téměř čistých pískovců v severovýchodní části k horninám s převahou jílových sedimentů na jihozápadě. Skupiny jsou odstupňované po 20% písčitosti a každé z těchto skupin byla přiřazena reprezentativní hodnota koeficientu tepelné vodivosti: (i) písčitost 0 – 20%: 1.8 W/m.K, (ii) 20 – 40%: 2.1 W/m.K, (iii) 40 – 60%: 2.4 W/m.K, (iv) 60 – 80%: 2.7 W/m.K and (v) 80 – 100%: 3 W/m.K.

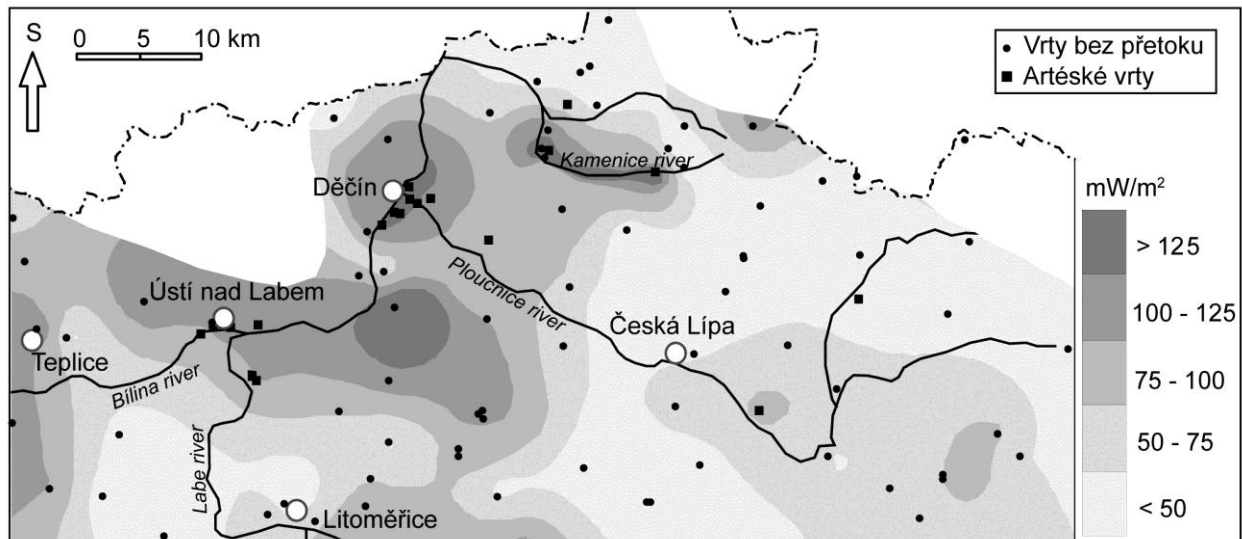
4.4.2 Stanovení geotermálního gradientu

Geotermální gradient byl stanoven na základě odečtu teplot z teplotních křivek naměřených karotážní termometrií. S opatrností bylo nutno přistupovat v případě zjištěného vertikálního proudění. Geotermální gradienty byly opraveny také na topografii terénu a výsledné hodnoty vystihují průměrnou hodnotu v celém vrtu. Pískovce středního turonu se vyznačují obecně nižšími gradienty kolem 3 K/100 m. S přibývajícím jílovitou, případně vápenitou složkou, mohou gradienty vzrůst až na 5 – 6 K/100 m. Nejnižší hodnota gradientu 0.5 K/100m byla zjištěna v hornatém terénu na východě zájmové oblasti. Tato nízká hodnota gradientu je v souladu s pozicí daného vrtu v infiltrační oblasti. Nejvyšší hodnota gradientu 7.6 K/100m odpovídá oblasti

nedaleko Ústí nad Labem, která je naopak drenážní oblastí. Vysoké hodnoty gradientu v drenážních oblastech jsou způsobeny výstupem termálních vod z hlubokých horizontů směrem k povrchu až do místa drenáže.

4.4.3 Rozložení tepelného toku

Teplý tok je v rámci studované oblasti značně variabilní, jeho prostorové rozložení je zobrazeno na Obr. 5.



Obr. 5. Prostorové rozložení tepelného toku v oblasti Benešovsko-Ústeckého zvodněného systému.

Oblasti zvýšeného tepelného toku jsou rozloženy v ZV směru ve dvou přibližně podélných pruzích (Obr. 5.). První pruh vychází z oblasti v okolí Ústí nad Labem s nejvyšším potenciálem u Těchlovic. Druhý pruh je dobře rozeznatelný okolo Děčína a pokračuje dále na severozápad směrem k toku Kamenice. Podél této řeky byl zjištěn úzký pruh vyšších hodnot tepelného toku, který je způsobený výstupem ohřáté vody z horninového prostředí směrem k drenážní bázi řeky. Podobně je tomu v údolí u Děčína, kde jsou vysoké hodnoty tepelného toku zjištěny pouze na pravém břehu řeky Labe. Důvodem je zřejmě tektonické založení terénu. Voda přítékající z infiltrační oblasti na severovýchodě je v oblasti Děčína drénována podél zlomových struktur, za které se voda již nedostane.

Jak již bylo zmíněno výše, pole tepelného toku je výrazně ovlivněno prouděním podzemní vody. Dynamika podzemních vod hraje proto důležitou roli při studiu přenosu tepla v sedimentárních strukturách. V zájmové oblasti se navíc ukázalo, že přenos tepla je také určován hlubokou tektonikou, jako je Oherský rift, podél kterého dochází k aktivnímu ohřevu podzemní vody. Vzájemný vztah mezi vyššími teplotami podzemních vod a riftovou zónou potvrzuje také přítomnost rozpuštěného CO_2 , která byla potvrzena v podzemních vodách u Ústí nad Labem,

Děčína a kolem řeky Kamenice (Jiráková et al., 2010). Nicméně přímou souvislost mezi tepelnými anomáliemi a přítomností CO₂ nelze na základě našich výsledků s jistotou potvrdit a měla by být předmětem dalšího výzkumu.

5 Závěry

V současné době se vodohospodářské subjekty snaží získat maximum znalostí o režimu proudění podzemních vod ve zvodněných systémech využívaných pro pitné i geotermální účely. Ke studiu charakteru proudění byly v ČKP v České republice a v AP ve Francii použity dva odlišné přístupy – izotopové a geotermální metody. Metody izotopové hydrogeologie umožnily popsat charakter doplňování kolektorových struktur v obou strukturách. Geotermální výzkum ČKP navíc umožnil objasnit charakter proudění a jeho dynamiku pomocí teplotních profilů.

Předložená práce se zabývá dosud nevyjasněnými otázkami týkajícími se chronologie doplňování kolektorů během pozdního pleistocénu nejdříve ve studovaných oblastech, posléze byl záměr rozšířen na další významné hydrogeologické struktury v Evropě. V České republice byly výsledky z izotopové studie doplňovány a ověřovány geotermálním výzkumem.

V každé z uvedených studií bylo nutno přistupovat k danému problému individuálně a to především kvůli komplikacím různého charakteru. Například, v AP intenzivní rozpouštění karbonátů komplikovalo věrohodné určení střední doby zdržení podzemní vody v kolektorech, v ČKP je izotopové složení zkresleno mnohými interakčními procesy, geotermální pole narušeno vertikálním prouděním, atp. Zmíněné a i další komplikace byly odstraněny zavedením různých oprav a použitím specifických metod a tak tato práce nabízí mnoho nových informací o režimu proudění a charakteru napájení. Závěry je možné dále využít při konstrukci věrohodných koncepčních a numerických hydrogeologických modelů pro optimalizaci využití hydrogeologických struktur.

6 Použitá literatura

- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema Publishers, Leiden.
- Beck, A.E., 1982. Precision logging of temperature gradients and the extraction of past climate. *Tectonophysics* 83 (1-2), 1-11.
- BRGM, 1999. *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine, Année 3. Opération sectorielle, Relation entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Eocène*. R-40729, 122 p.
- BRGM, 2004. *Projet de mise en place d'une banque de données isotopiques. Etat d'avancement année 2003*. RP-51092-FR, 68 p.
- Clark, I.D., Fritz, P., 1999. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton. 311 p.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133, 1702–1703.
- Čermák, V., Jetel, J., 1985. Heat flow and ground water movement in the Bohemian Cretaceous Basin (Czechoslovakia). *Journal of Geodynamics* 4, 285-303.
- Darling, W.G., 2004. Hydrological factors in the interpretation of stable isotopic proxy data present and past: a European perspective. *Quaternary Science Reviews* 23, 743–770. doi:10.1016/j.quascirev.2003.06.016.
- Fontes, J.C., Garnier, J.M., 1979. Determination of the ^{14}C initial activity of TDC: a review of the existing models and a new approach. *Water Resources Research* 15, 399–413.
- Herčík, F., Hermann, Z., Valečka, J., 1999. *Hydrogeologie České křídové pánve*. Český geologický ústav. Praha. Česká republika, 116 pp.
- 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). *Applied Geochemistry* 25, 1265-1279. doi:10.1016/j.apgeochem.2010.05.012.
- Petelet-Giraud, E., Casanova, J., Chery, L., Négrel, P., Bushaert, S., 2005. Attempt of isotopic characterisation (d18O and d2H) of present rainwater signature using lakes and reservoirs. Application to south-western France. *La Houille Blanche* 2, 57–62.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R., 1992. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climates. *Science* 258, 981–984.
- Štulc, P., 1994. *Konvektivní přenos tepla v České křídové pánvi*. Ph.D. Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha. 107 pp.

ENGLISH SECTION

1 Introduction

The quest for a sustainable development is a key concept in water resource management and is the strongest driving force of the water industry. In France, in the Czech Republic and everywhere in Europe, the sustainability of groundwater resources is endangered.

Shallow aquifers vulnerable to surface processes and climatic changes represent only temporal high quality groundwater source. For that reason, the conventional water supply from shallow reservoirs and/or from crystalline rocks has been at many places replaced by the exploitation of deep confined aquifers that are better protected from surface phenomena. It is not surprising, that the exploitation of deep aquifers has significantly increased during the recent decades but warnings of a groundwater crisis with falling groundwater tables and polluted aquifers in many areas have led to calls for urgent management responses. However, the adequate management solution for a sustainable development needs to consider the factor of groundwater recharge variability and oscillations since the Late Pleistocene on the one hand and the changeable groundwater dynamics on the other hand. These phenomena might be clarified using the combination of the isotopic hydrogeology and geothermal applications which offer a great variety of methods leading to the improvement of the current knowledge, .e.g. concerning the recharge existence during Last Glacial Maximal (LGM), occurring geochemical processes in the aquifers and the groundwater regime.

The stable isotopes oxygen-18, deuterium, carbon-13 as well as the radioactive isotopes tritium and carbon-14 offer a broad range of possibilities for studying processes within the water cycle (Clark and Fritz, 1999), and the assessment of mean residence time providing significant insights into palaeoclimatic conditions (Rozanski et al., 1992). Yet, it has to be kept in mind that numerous processes occurring in aquifers tend to modify the original isotopic composition which has to be taken into account during the groundwater dating. Hydrogeological models are often confronted to a strong uncertainty about the continuous or interrupted recharge of aquifers, especially during the transition from Pleistocene to Holocene. Detailed chronology of groundwater recharge in Europe is often somewhat missing or not fully understood. The whole range of various dating models for groundwater has been developed, but often need to be adapted for the particular geological and geochemical environment.

In the areas with an extensive accumulation of thermal water, the numerical hydrogeological models need to be upgraded for the heat transfer between the aquifers. The groundwater dynamics is a difficult parameter to be involved in such models as can be very variable both in

time and space. Nevertheless, geophysical measurements, notably thermometry, appears to be useful in groundwater regime studies by providing temperature logs in a well profile and therefore offers valuable information on the groundwater flow between permeable layers. Also, in geothermal studies may appear various factors that can negatively affect the accuracy and the reliability of heat flux quantification, as already shown in the BCB (Čermák and Jetel, 1985). The groundwater flow has probably the most decisive effect on the geothermal gradient and consequently on the heat flux distribution.

2 Aims of the study

The sustainability of potable and thermal water resources is the main challenging issue in this Ph.D. thesis. The work focused on two European hydrogeologically significant and strategic aquifer systems both dating from the Cretaceous (**Error! Reference source not found.**):

- The Bohemian Cretaceous Basin in the Czech Republic (BCB)
- The Aquitaine Basin in France (AB)

They both represent a multi-layered aquifer system suffering from intense groundwater exploitation. Although there is not currently any catastrophic situation concerning the water supply in neither of the studied areas, the water quality deterioration and the drop of the groundwater levels has been already registered at many places.

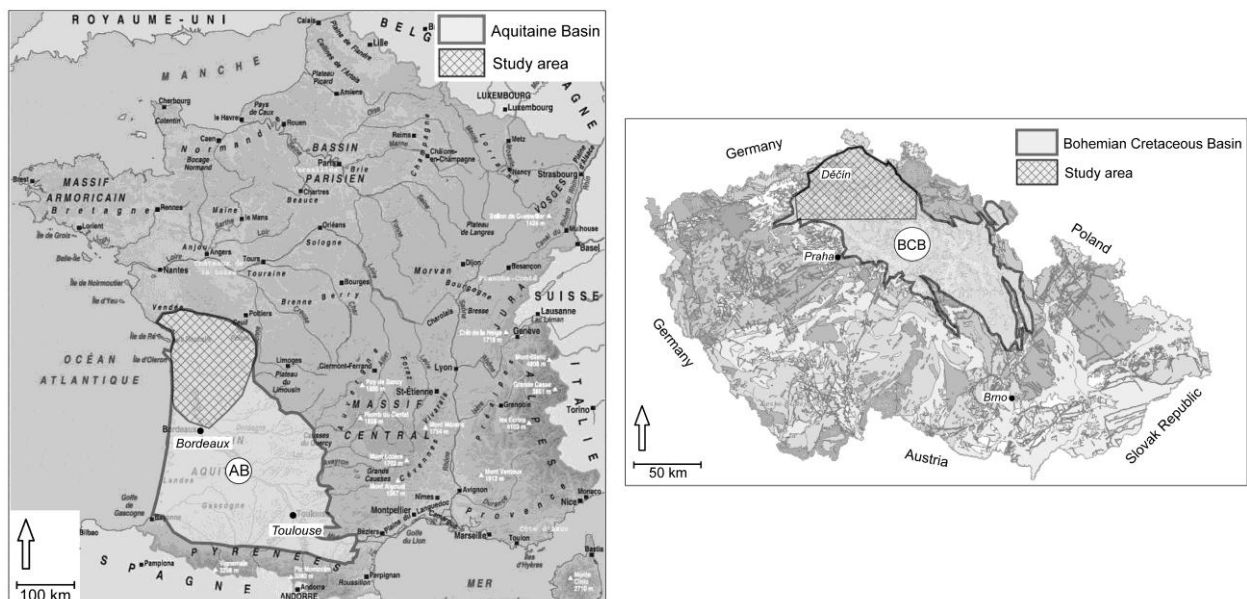


Fig. 1. Delineation of the Aquitaine Basin (AB, France) and Bohemian Cretaceous Basins (BCB, Czech Republic) and the study areas.

Applied methodology at each site was selected according to the reconnaissance level and the data density. The isotopic hydrogeology methods were applied in both the BCB and the AB while the investigation on the geothermal sustainability was performed in the BCB only. The work is divided into several parts referring to separate case studies either in France or in the Czech Republic, dealing with isotopes and geothermal gradient.

The first part of the thesis comprising three case studies focuses on the isotopic hydrogeology, i.e. determining the groundwater recharge pattern and its relation to climatic changes and human activities in the BCB and the AB using isotopes of hydrogen, oxygen and carbon. Carbon isotopes were especially useful during the study in the BCB which was studied also for the assessment of the origin of carbon in groundwater. The results from France and the Czech Republic were included in the European context focusing on the recharge heterogeneity within the European continent as a consequence of a climatic instability during the Late Pleistocene period.

The second part deals with geothermal data from the BCB which is, apart from being the important drinking water supply reservoir, the most extensive accumulation of thermal water in the country. The Benešov-Ústí aquifer system (BUAS) is the most promising area for geothermal development in the Czech Republic. The well logs represent an excellent tool for illustrating the effect of groundwater dynamics on the geothermal gradients and consequently the heat transfer. In sedimentary formations, convective heat transfer often dominates over the conductive and many actions have to be undertaken to obtain accurate heat flux values.

Although each case study focused on various topics such as palaeorecharge, carbon origin, groundwater dating, assessment of geothermal gradient or heat fluxes, the main purpose of this Ph.D. study is to combine interpretations and results from all case studies, whether isotopic or geothermal, in order to clarify the general groundwater regime with respect to the sustainable groundwater development in two important European sedimentary formations in France and in the Czech Republic.

3 Material and methods

The character of the groundwater recharge and regime was studied using various approaches from the field of isotopic hydrogeology and geophysics, particularly:

- (i) Interpretation and valorisation of isotopic data is very useful to determine the groundwater recharge pattern, its relation to climatic changes and human activities.
- (ii) Geothermal data acquired from boreholes and reflecting true thermal conditions contribute to assess the geothermal potential of aquifers and consequently the flow conditions.

According to the available data (Tab 1.), the study comprises of several case studies on:

- (i) palaeorecharge conditions, AB
- (ii) carbon origin in groundwater, BCB
- (iii) typology of recharge processes in Europe
- (iv) geothermal potential of the BCB

Datasets for each case study were created from the broad bibliography search. These data acquired within last decades were re-interpreted and re-evaluated using the most recent knowledge and experiences in the isotopic hydrogeology and thermal well-logging. Water sampling, analysing and numerous geothermal measurements were not included in the framework of the thesis. The exception concerns the most recent well-logging data in the BCB which have been acquired within the project GACR 205/07/0691 also supporting the current work. Used data are all properly cited and referenced.

Tab 1. Comparison of data character AB, BCB and selected European aquifers.

	AB	BCB	European aquifers
geographical coordinates	x	x	-
stratigraphy	x	x	x
temperature from sampling depth	x	x	-
major chemistry (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^-)	x	x	-
pH	x	x	-
^3H	x	x	-
$\delta^{18}\text{O}$	x	x	x
$\delta^2\text{H}$	x	x	x
$\Delta^{14}\text{C}$	x	x	x
$\delta^{13}\text{C}$	x	x	x
temperature records in the well profiles	-	x	-

3.1 Isotopic approach

Although aquifers in the AB and the BCB have been intensely explored and many isotopic measurements were previously carried out, there are still some gaps in knowledge about the continuity of groundwater recharge. The initial step was the study on chemical properties of the given aquifer and the consequent evaluation of the water chemical type using Piper diagram. The content of stable isotopes ^{18}O and ^2H was compared with the global meteoric water line

indicating the ratio of palaeowaters and modern waters. The gradients of temperature induce gradients in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$. Consequently, groundwaters with depleted isotopic content likely indicate recharge during colder periods of the Late Pleistocene.

In the next step, this hypothesis has to be confirmed by the groundwater dating. It is not surprising, that the AB and the BCB has to be investigated with individual approach as the geological and geochemical approaches are entirely different. The AB is composed of carbonate rocks mainly while in the BCB sandstones dominate. This has to be taken into account within the choice of the appropriate dating model. That is why we analysed geochemistry of groundwaters to identify geochemical processes within aquifers. Apart from this, the information on modern water indicators was in some locations provided by the ^3H measurements. The ^{13}C content is treated so as to establish the degree of openness of the aquifer system to atmospheric CO_2 , which together with ^{14}C activity helps to determine the intensity of isotopic exchange between different phases. Divers dating models were tested. The Fontes & Garnier model (Fontes and Garnier, 1979) considering both mass and isotopic balance seems to best fit the geochemical conditions in the AB. In the Czech Republic, complex geology, tectonics and many interaction processes complicates the application of common approaches. This requires the application of the dilution model considering numerous chemical processes. The chemical reactions need to be first recognized and quantified which is possible by using carbon isotopes. The dating results are then acquired using the equation for the calculation of the mean residence time:

$$t = -8267 \cdot \ln(a^{14}\text{C}_{\text{DIC}}/q \cdot a_0^{14}\text{C})$$

where $a^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$ is the measured activity of ^{14}C , $a_0^{14}\text{C}$ corresponds to the ^{14}C activity of modern recharge waters (100 pmC), q is the dilution factor determined according the type of dilution, e.g.

$$q_{\text{CO}_2(\text{q})} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC measured}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2(\text{q})}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{recharge}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2(\text{q})})$$

$$q_{\text{calcite}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC measured}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{calcite}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{recharge}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{calcite}})$$

where $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC measured}}$ represents the ^{13}C content measured in groundwater samples; $\delta^{13}\text{C}_{\text{recharge}}$ represents the ^{13}C content in recharged waters, which for the observed range of pH values corresponds to the ^{13}C content in soil ($\delta^{13}\text{C}_{\text{recharge}} \sim \delta^{13}\text{C}_{\text{soil}} \sim -23\text{‰}$; Clark and Fritz, 1999), $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2(\text{q})}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{calcite}}$ are the average values determined for $\text{CO}_2(\text{g})$ of the mantle origin and calcite, respectively. Each sample of the dataset has been considered individually.

The mean residence time of groundwaters estimates the period of recharge into aquifers and therefore clarifies the ambiguity about the recharge during Last Glacial Maximum (LGM), i.e. 18-20 ka BP. The combination of these results with stable isotopic content enables the discussion on palaeoclimatic conditions.

Moreover, findings from isotopic investigations in France and in the Czech Republic were inspiring to carry out the review study throughout European sedimentary aquifers and compare the recharge conditions in Europe. In order to include as much relevant information as possible, it was necessary to consider palaeoclimatic conditions during the Late Pleistocene and their impact on the groundwater recharge. Such information on palaeoclimate, ice-sheet and permafrost extensions was generally acquired from commonly accepted hypothesis or recent studies.

3.2 Geothermal approach

The geothermal investigation was carried out in the BCB in order to update the current knowledge on the regime of groundwaters. The long tradition of well logging measurements in the former Czechoslovakia enabled the access to a large dataset of geophysical parameters.

Continuous temperature logging generally provides a detailed temperature profile with a good possibility of detecting perturbing phenomena (Beck, 1982). Temperature-profile measurements were made continuously in thermal and hydraulic equilibrium from the surface towards the well bottom using highly sensitive thermometer. Using the temperature data, the heat flux is calculated with the following formula:

$$q = G * \lambda$$

where q is the heat flux (W/m^2), G is geothermal gradient (K/m) and λ is thermal conductivity (W/mK).

To calculate the appropriate geothermal gradients in the area, the temperature profiles were analyzed considering the vertical flow where applicable. Geothermal gradients, determined directly from the temperature profile, reflect variations in the lithology. The correction for the vertical flow has been carried out for wells with the downward/upward vertical flow, where only data beyond (below and/or above) the interval of vertical groundwater flow enter the calculation.

Another correction was carried out for the effect of topography as many boreholes occur in hilly areas and which can therefore modify the heat flux distribution. A 3D model of the study area was compiled in the Geophysical Institute, Academy of Sciences using the commercially available COMSOL software allowing us to quantify the temperature gradients disturbances caused by variable topography. The last necessity for the heat flux determination is the assessment of thermal conductivity coefficient. This was done by analysing the lithological properties throughout the whole area combining them with conductivity measurements on different rock types acquired by Čermák and Jetel (1985) and Štulc (1994).

4 Results and discussion

All findings from presented four case studies acquired during the Ph.D. were compiled into four publications forming the main body of the Ph.D. thesis. The main results of particular publications are summarized here below.

4.1 Palaeorecharge conditions of the deep aquifers of the Northern Aquitaine region (France)

Journal of Hydrology

4.1.1 Geochemistry

Geochemical study identified four major geochemical types of groundwater with dominating Ca-HCO₃ type which conforms to the carbonate rock environment, and therefore indicates the existence of isotope exchanges between rock matrix and groundwaters.

The elevated nitrate concentration which was detected at a few sampling sites together with the tritium generally suggests the modern water contribution in the studied aquifers. Samples in the coastal zone were enriched by Na–Cl content resulting from intrusion of the sea water.

4.1.2 Stable isotope composition

The isotopic characteristics of water ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) show an evolution in the aquifer system and the heterogeneity of the recharge conditions (Fig. 2.).

The Fig. 2. shows the Local Meteoric Water Line with the equation $\delta^2\text{H} = 8.1\delta^{18}\text{O} + 10.4$ ($r^2 = 0.97$) which almost precisely fits the Craig's equation (Craig, 1961). The modern recharge is characterised by values of - 6.2‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and - 39.2‰ for $\delta^2\text{H}$. The entire ranges of stable isotope values are from - 7.7‰ to - 4.9‰ and from - 52.3‰ to - 29.6‰, respectively, for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$.). Low values in several samples indicating lower temperatures during the recharge period suggest the palaeorecharge under cold climatic conditions during the late Pleistocene period.

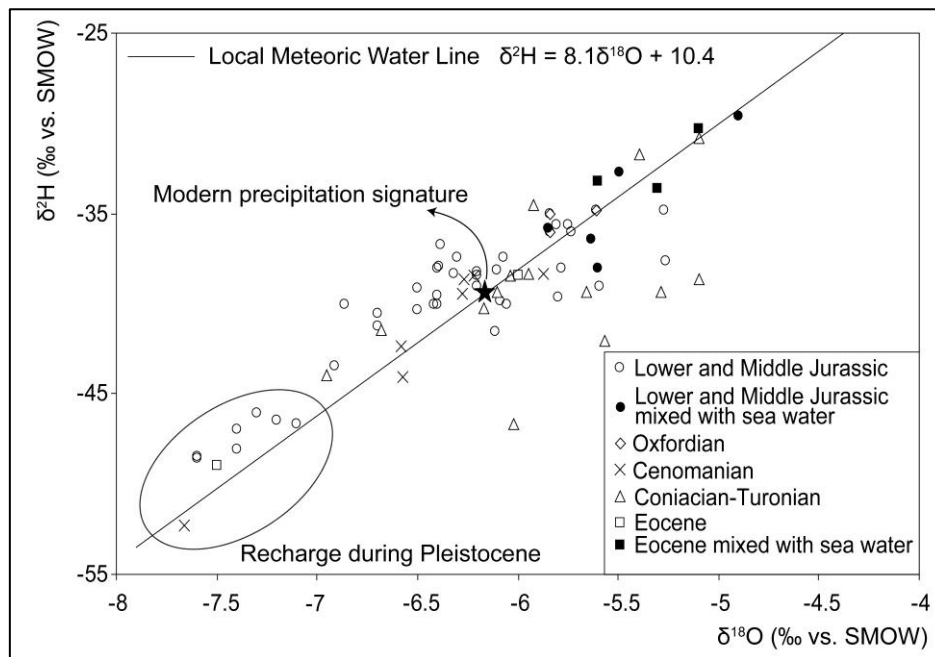


Fig. 2. Stable isotope composition of waters in the Aquitaine Basin aquifer system with plot of the Local Meteoric Water Line (BRGM, 1999, 2004; Petelet-Giraud et al., 2005).

4.1.3 Carbon isotopes and mean residence time of groundwaters

Activities of ^{14}C vary widely and, in some areas, are very close to 0 pmc, suggesting a very long residence time within the aquifer. The inverse evolution of ^{14}C and $\delta^{13}\text{C}$ downgradient demonstrates that an important loss of ^{14}C is caused by the geochemical reactions with carbonates in the aquifers. The carbonate dissolution during the infiltration processes increases DIC and enriches the $\delta^{13}\text{C}$ value. This helps us to identify the origin of carbon and the recharge conditions. Complications are met during the identification of the initial ^{14}C content in recharged water required for radiocarbon dating method. Considering the whole geochemistry of the aquifers, the correction introduced in the Fontes&Garnier model seems to match well the geochemical conditions of carbonate aquifers.

The results of groundwater dating confronted with stable isotopic content is displayed in Fig. 3. displaying three principle groups of groundwaters: (i) the first group correlated with the radiocarbon ages from 10 ka B.P. up to the present corresponds to Holocene waters with the most enriched isotopic values, (ii) the second group ranging between 20 and 15 ka B.P. and representing the cold recharge of the LGM at the end of the Pleistocene and (iii) the third group of samples dated prior to the LGM. The recharge chronology does not therefore confirm a significant hiatus during the LGM as often discussed by many authors. This information maybe useful for future hydrogeological investigation in the AB and elsewhere in southern Europe with similar climatic conditions.

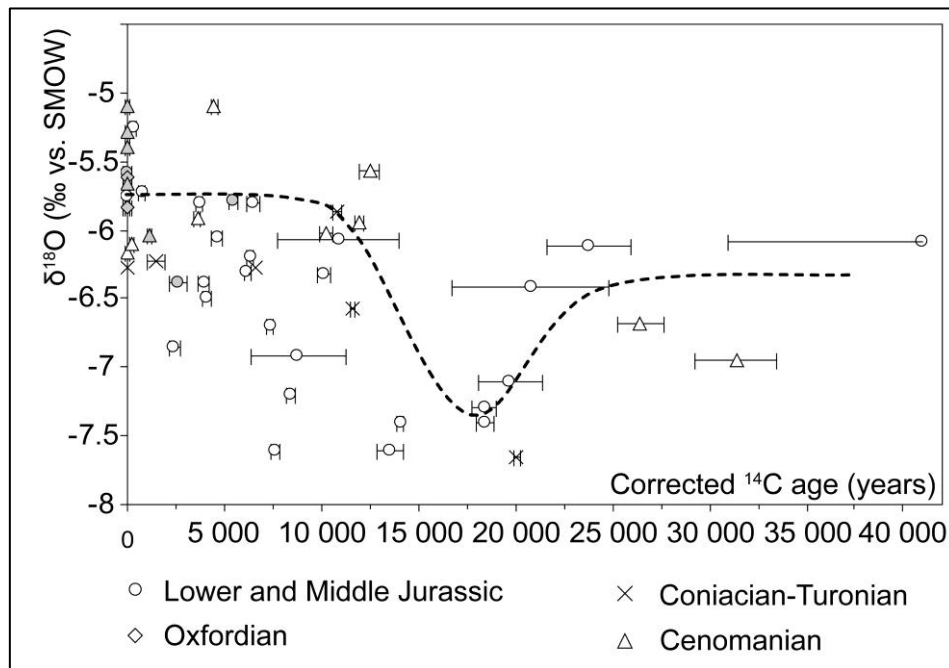


Fig. 3. Evolution of oxygen-18 in relation to the groundwater ages with error bars corrected by the F&G model (1979). Waters containing nitrate are highlighted in grey colour.

4.2 Carbon isotopes to constrain the origin and residence time of groundwater in the Cretaceous Basin of Bohemia (Czech Republic)

Applied Geochemistry

4.2.1 Geochemistry

The majority of the Turonian and Cenomanian samples are of Ca-HCO₃ type. Although the aquifers do not generally contain carbonate rocks (Herčík et al., 1999), the Ca²⁺ and HCO₃⁻ ions might be produced by the hydrolysis of the calcite cement in sandstones. The eventual enrichment in SO₄⁻ and Cl⁻ originates probably Permo-Carboniferous sediments underlying the Cenomanian aquifer. Ca-HCO₃ water type gradually transforms towards Na-Ca-HCO₃ water type. This tendency suggests the aquifer freshening theory as already observed by several authors in such a sedimentary context (Appelo and Postma, 2005).

4.2.2 Stable isotope composition

The groundwater in the Czech Massif is of meteoric origin. Only few analysis were available, δ¹⁸O values range from - 11.2‰ to - 8.6‰. The Cenomanian samples are often depleted which may be explained either by the position of the infiltration area in the mountainous zone or by the recharge of depleted water originating from the north European ice sheet extending closely to the

Czech borders. Nevertheless, several authors have shown, that the periglacial and permafrost conditions were adverse for the recharge events during the LGM in the Czech territory.

4.2.3 Carbon origin in the BCB groundwaters and radiocarbon dating

The study of carbon isotopes (^{13}C and ^{14}C) is useful not only for the residence time assessment but also for discussion on the C origin. The investigated water samples are reported in a graph showing ^{13}C and ^{14}C evolution (Fig. 4.).

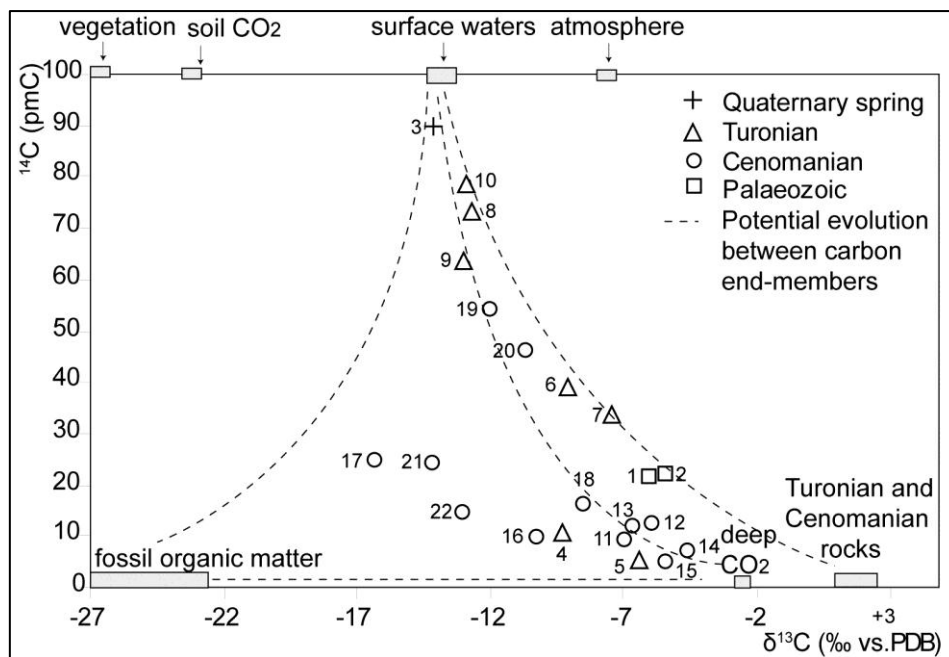


Fig. 4. Evolution of C isotopes in BCB groundwaters.

The Fig. 4. displays heterogeneity in carbon isotopic signature suggesting a mixture of carbon from different sources. Following interaction were determined and facilitated the construction of the conception model for the carbon origin.: (i) groundwater– CO_2 gas from the upper mantle, (ii) groundwater–rock matrix, (iii) groundwater–fossil organic matter and (iv) groundwater–surface waters.

Based on this, the dilution correction model seems to be the most adequate for the radiocarbon dating. The results confirm the existence of modern waters (enriched in stable isotopes) and the old waters (depleted in stable isotopes). However, the maximal residence time is 11 ka BP. This finding together with the detailed stable isotope and the palaeoclimatic considerations led us to assume that the groundwater aging around 11 ka BP probably originates from ice sheets extending in Europe around the LGM. The fact that the ground was adverse for any recharge

during the LGM explains the absence of waters from that period. Depleted water accumulated in glaciers were recharged later when the glacier melted.

4.3 Insight into palaeorecharge conditions of European deep aquifers

Hydrogeology Journal

4.3.1 Palaeoclimatic conditions in Europe and stable isotopes

In order to characterise the recharge conditions since the Last Pleistocene within the European continent, several aquifers from different geographical locations from Portugal to Estonia were selected. The isotopic composition of aquifers generally reflects the palaeoclimatic conditions. During cold periods, especially in the north European countries, the precipitation could not be easily infiltrated owing to the permafrost or ice sheets occurrence and was therefore accumulated in the form of snow and ice. It was only after the ice and permafrost retreat when the aquifers could be recharged again directly from precipitation and from melt water. The insight into the stable isotopic signature suggested the period when the precipitation was formed, but the recharge timing had to be discussed with radiocarbon data.

European groundwaters reveal a huge span in both stable isotopic values as the consequence of very contrast geographical and climatic conditions. The most enriched values are found in Spain and Portugal while the most depleted come from north European countries. Despite the differences of the absolute isotopic values, the amplitudes between modern precipitation and the LGM waters range from 1.2‰ to 2.7‰ and from 8.2‰ to 20‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, respectively.

4.3.2 Recharge conditions in Europe

Groundwater presents an excellent archive of recharge conditions. The main target of the current work was to investigate the recharge timing in the European aquifers in order to clarify the effect of the cold period during the Late Pleistocene on the recharge events. The discussion on palaeorecharge on the global scale in Europe have been already included in the work of Darling (2004) who suggested the existence of the recharge gap for several sandstone aquifers in Europe. However, the recharge gap corresponding to the LGM period is often difficult to identify and some previous studies supported rather uninterrupted recharge during Late Pleistocene and transition into the Holocene. Our results confirm the hypothesis about recharge variability within Europe. Two major groups of aquifers were distinguished. Besides, a third category involving particular recharge processes has been put apart:

- (ii) *Continuous recharge*: This first group includes groundwater of all ages dating back to 40 ka BP that do not reveal any recharge gap from the Late Pleistocene up to the Holocene (e.g. Portugal, Spain, southern France, eastern Romania).
- (ii) *Recharge hiatus around LGM*: This second group involves aquifers which were prevented from recharge around LGM. Some of these aquifers provide groundwater ages up to 40 ka BP. However, some of these aquifers reveal a lack of groundwater recharge prior to LGM which is either because of the absence of recharge or data absence (e.g. northern France, Switzerland, Hungary, Belgium, Great Britain, Poland).
- (iii) *Particular situations*: This third group corresponds to special situations and suggests that the recharge occurred during or shortly after LGM and has been provided by subglacial melted groundwater drainage through tunnel valleys or that aquifers were recharged by melted water from the North European ice sheets driven by the main drainage axes right after the LGM (e.g. Denmark, Czech Republic, Estonia).

4.4 Geothermal assessment of the deep aquifers of the north western part of the Bohemian Basin, Czech Republic

Geothermics

4.4.1 Lithological properties of the BCB rocks and thermal conductivity

Selected boreholes with known lithological profile were divided into five groups according to the overall percentage of sand within a well. The gradual transition from pure sandstones in the north-east into clayey sediments in the western part of the study area in the BCB is evident. Each of this group varying by 20% of the sand ratio was attributed a value of thermal conductivity which is typical for the given lithology: (i) 0 – 20%: 1.8 W/m.K, (ii) 20 – 40%: 2.1 W/m.K, (iii) 40 – 60%: 2.4 W/m.K, (iv) 60 – 80%: 2.7 W/m.K and (v) 80 – 100%: 3 W/m.K.

4.4.2 Geothermal gradient determination

The geothermal gradient was deduced from the temperature logs of measured boreholes. First, the careful gradient determination had to be undertaken if the vertical flow was detected. The geothermal gradients have been also corrected for the effect of topography and represent the averaged value for the well. Middle Turonian sandstones exhibit low gradients of around 3 K/100m and increase gradually with depth to 5 – 6 K/100m as the high conductivity sandy component is replaced by low conductivity clayey and calcareous material. The lowest gradient value (0.5 K/100 m) was calculated in the easternmost part of the study area in a mountainous region. Such a low value reflects the hydrogeological conditions in a recharge area. The highest

geothermal gradient of 7.6 K/100m was computed near Ústí nad Labem which corresponds to the drainage area. Such large values of gradient at this site, as well as in other drainage zones (e.g. Děčín and the Kamenice valley), are caused by the gradual ascent of warmed water towards the surface.

4.4.3 Heat flux distribution

The heat flux calculations reveal a very large range of values. Fig. 5 illustrates the spatial distribution of the heat flux within the region.

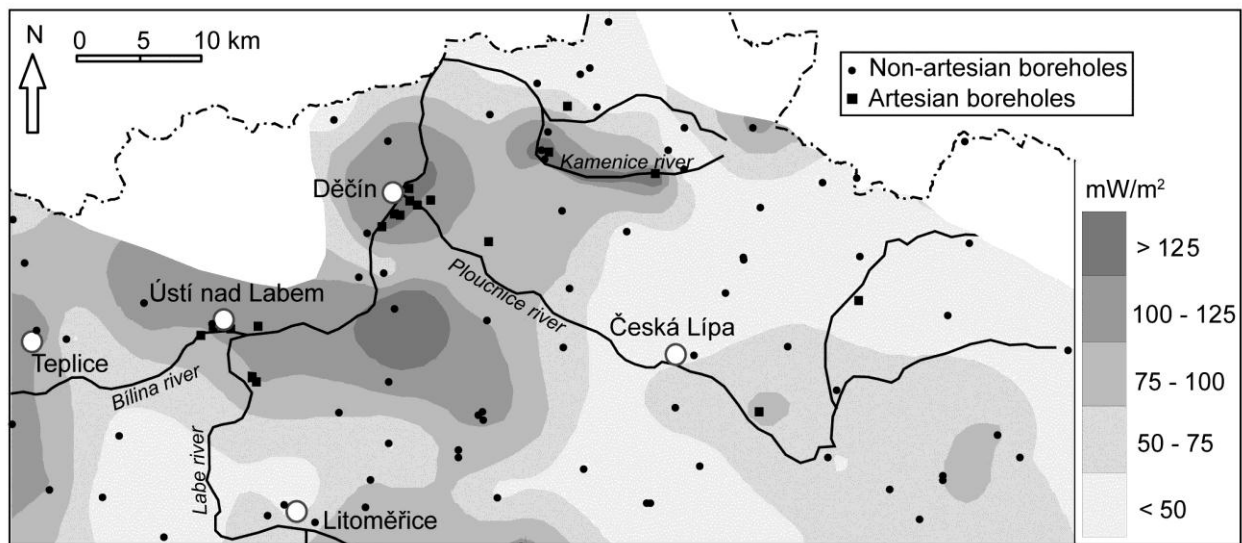


Fig. 5. Heat flux distribution in the Benešov – Ústí aquifer system.

Anomalies in the thermal field indicated by the elevated geothermal gradient are represented by two longitudinal areas of W-E orientation (Fig. 5.). The first crosses Ústí nad Labem with the highest potential near Těchlovice, the second is well developed in Děčín surroundings and continues in northwestern direction towards the Kamenice river. The Kamenice river valley exhibits a very narrow thermal anomaly along the river caused by warmed water drainage from the surrounding rock formation. Similarly, the Děčín valley shows very high heat flux values that are observable on the right river bank only. This phenomenon can be explained by groundwater circulation through numerous tectonic structures. Water which infiltrates in the eastern and northern part of the study area, flows westward through sandstone layers and is drained along the fault structures on does not pass behind these faults.

In conclusion, groundwater flow significantly affects the geothermal field and plays a key role in the heat transfer throughout the whole area of interest. Heat transfer is also influenced by the deep tectonics, such as Ohře (Eger) rift in the study area representing a zone of groundwater

warming. Groundwater with dissolved gases (namely CO₂) is a heat transport fluid. Detailed isotopic study carried out by Jiráková et al. (2010) detected mantle derived carbon (CO₂) in groundwater in the vicinity of Ústí nad Labem, Děčín and around the Kamenice river, which are zones of high heat flux values. However, a relationship between CO₂ occurrence and higher heat flux values has yet to be established, and should be investigated further.

5 Conclusion

Nowadays, all major aquifer formations used for drinking or geothermal water supply need improved knowledge about the groundwater regime which might be traced by both isotopic and geothermal investigations. Isotopic methods used in this study confirmed its utility for the insight into recharge timing and palaeorecharge conditions in the northern part of the AB and the northwestern part of the BCB. The geothermal data from the BCB offered the possibility to penetrate deeper in the issue of the groundwater flow and dynamics.

This work clarified some ambiguous questions about the groundwater recharge continuity during the Late Pleistocene period at both studied sites and later on allowed to classify the recharge heterogeneity at the European scale. In the BCB, it was possible to combine isotopic data with temperature logs which allowed comparing and reciprocally verifying of the acquired results.

All case studies needed the individual approach as many hydraulic, geochemical and thermal processes occur in the aquifers. The palaeorecharge study in the AB had to consider an adopted dating model for carbonate environment, in the isotopic study of the BCB different dilution models for groundwater dating had to be developed as many interaction processes had been identified and the geothermal study was complicated by intensive vertical flow and variable topography. However, particular corrections for each case enabled us to proceed to the solution and therefore to offer the new insight into deep sedimentary formations. This may be furthermore used by groundwater modellers because the pattern of the groundwater regime is determining for further water management planning.

6 Reference list

- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema Publishers, Leiden.
- Beck, A.E., 1982. Precision logging of temperature gradients and the extraction of past climate. *Tectonophysics* 83 (1-2), 1-11.
- BRGM, 1999. *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine, Année 3. Opération sectorielle, Relation entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Eocène*. R-40729, 122 p.
- BRGM, 2004. *Projet de mise en place d'une banque de données isotopiques. Etat d'avancement année 2003*. RP-51092-FR, 68 p.
- Clark, I.D., Fritz, P., 1999. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton. 311 p.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133, 1702–1703.
- Čermák, V., Jetel, J., 1985. Heat flow and ground water movement in the Bohemian Cretaceous Basin (Czechoslovakia). *Journal of Geodynamics* 4, 285-303.
- Darling, W.G., 2004. Hydrological factors in the interpretation of stable isotopic proxy data present and past: a European perspective. *Quaternary Science Reviews* 23, 743–770. doi:10.1016/j.quascirev.2003.06.016.
- Fontes, J.C., Garnier, J.M., 1979. Determination of the ^{14}C initial activity of TDC: a review of the existing models and a new approach. *Water Resources Research* 15, 399–413.
- Herčík, F., Hermann, Z., Valečka, J., 1999. *Hydrogeology of the Bohemian Cretaceous Basin*. Czech Geological Survey, Prague, Czech Republic, 116 pp. (in Czech).
- 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). *Applied Geochemistry* 25, 1265-1279. doi:10.1016/j.apgeochem.2010.05.012.
- Petelet-Giraud, E., Casanova, J., Chery, L., Négrel, P., Bushaert, S., 2005. Attempt of isotopic characterisation (d18O and d2H) of present rainwater signature using lakes and reservoirs. Application to south-western France. *La Houille Blanche* 2, 57–62.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R., 1992. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climates. *Science* 258, 981–984.
- Štulc, P., 1994. *Convective Heat Transfer in the Bohemian Cretaceous Basin*. Ph.D. Thesis. Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czech Republic, 107 pp. (in Czech).

Životopis

Hana Jiráková

Narozena: 23. 5. 1983 v Praze
 Národnost: česká
 E-mail: *hanajirakova@post.cz*

VZDĚLÁNÍ

2007 – 2011: Ph.D. studium, Univerzita Karlova v Praze & Univerzita Bordeaux-1
2001 – 2007: Univerzita Karlova v Praze, magisterské studium hydrogeologie
1/2005 - 7/2005: Univerzita Bordeaux-1, ERASMUS
1995 - 2001: Gymnázium *na Vítězné Pláni 1160*, Praha

PEDAGOGICKÁ AKTIVITA

2008-2009 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Cvičení - Hydrogeologie (výuka v češtině)
2008-2011 Česká zemědělská univerzita v Praze
Cvičení - Hydrologie a hydrogeologie (výuka v češtině a angličtině)
Cvičení – Hydrogeology for Natural Resources and Environment (výuka v angličtině)
2008 – 2010 Univerzita Bordeaux-1
Cvičení – Geologie jihozápadní Francie (výuka ve francouzštině)
Cvičení – Podzemní zdroje + terénní exkurze (ve francouzštině)

PRAXE V OBORU

2007 – nyní: Česká zemědělská univerzita, Katedra vodních zdrojů, výuka cvičení
2006 – nyní: *GEOMEDIA s.r.o.*, Praha. Hydrogeologie - ochrana a využití podzemních zdrojů, geotermální výzkum, monitoring studní a vrtů, zpracování dat (ArcView), mezinárodní projekty
10/2005 - 12/2006: *GeoTec-GS a.s.*, Praha. Inženýrská geologie, popis vrtného profilu, zpracování dat (AutoCad)

TERÉNNÍ KURZY

6/2006: Geologické mapování v Moravském krasu, hydrogeologie
9/2005: Terénní kurz, Jeseníky, hydrogeochemie

<u>5/2005</u>	Terénní kurz, Casteljaloux (Francie), geofyzikální metody
<u>4/2005</u>	Geologické mapování St-Jean Pied de Port (Francie)

ZNALOSTI A DOVEDNOSTI

Hydrogeologie:	Měření průtoku, hydraulické vodivosti, termometrie, speleologie, hydrogeochemie, datování podzemních vod
Geophysics:	elektrické metody, gravimetrie, seismika, RADAR, hydrogeofyzikální měření, karotáž (termometrie)
Práce s PC:	MS Windows, MS Office, OS Mac, Internet, Grapher, Surfer, ArcView, Adobe Illustrator, Aquachem, Phreeq-C, Diagramme
Jazyky:	čeština, angličtina (plynně, FCE 12/2006), francouzština (plynně), ruština (pokročilá)
Řidičský průkaz skupiny B	

PŘIDĚLENÉ GRANTY A STIPENDIA

- Cotutelle – stipendium francouzské vlády, Ministerstvo zahraničních věcí (3 x 6 měsíců)
- Stipendium pro doktorské stadium – česká vláda, Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (4 roky)
- Cestovní grant IAH pro účast na 36th IAH kongresu “Integrating groundwater science and human well being”. Toyama, Japonsko, 27 – 31 října 2008
- Cestovní grant IAHS pro účast na 8th IAHS vědeckém shromáždění & 37th IAH kongresu “Vital resource under stress - How science can help”. Hyderabad, Indie, 6 – 12 září 2009

ČLENSTVÍ

2010	Francouzská Speleologická Federace (FFS)
2010	Speleologický klub - SSPB (Société Spéleologique et Préhistorique de Bordeaux)

ZAJMY

Cestování, cizí jazyky, sport (tenis, badminton, squash, plavání, lyžování, cyklistika, speleologie)

Curriculum vitae

Hana Jiráková

Born: 23. 5. 1983 in Prague
 Nationality: Czech
 E-mail: *hanajirakova@post.cz*

EDUCATION

2007 – 2011: Ph.D. studies, Charles University in Prague & University Bordeaux-1
2001 – 2007: Charles University in Prague, Master degree in hydrogeology
1/2005 - 7/2005: University Bordeaux-1, ERASMUS
1995 - 2001: Grammar school *na Vítězné Pláni 1160*, Prague

PEDAGOGICAL ACTIVITIES

2008-2009 Charles University in Prague, Faculty of Science
pt in Hydrology and Hydrogeology (in Czech)
2008-2011 University of Life Sciences in Prague
pt in Hydrology and Hydrogeology (in Czech, in English)
pt in Hydrogeology for Natural Resources and Environment (in English)
2008 – 2010 University Bordeaux-1
pt in Géologie du Sud-Ouest de la France (in French)
pt in Ressources du sol et du sous-sol + Field trips (in French)

* *pt* – practical training

PROFESSIONAL EXPERIENCES

2007 – nowadays: University of Life Sciences, Department of Water resources, technical staff
2006 – nowadays: *GEOMEDIA s.r.o.*, Prague. Hydrogeology - use and protection of the groundwater resources, geothermal exploration, monitoring, data processing (ArcView), participation in international projects
10/2005 - 12/2006: *GeoTec-GS a.s.* Prague. Engineering geology - borehole's description, information processing (AutoCad and MicroStation)

FIELD WORK EXPERIENCES

6/2006: Training course in Moravia (CZ), geological mapping in the karstic region
9/2005: Training course in Jeseníky mountains (CZ), hydrogeochemistry

<u>5/2005</u>	Training course in Casteljaloux (France), geophysical prospection
<u>4/2005</u>	Training course in St-Jean Pied de Port (France), geological mapping

KNOWLEDGES AND SKILLS

Hydrogeology:	Flow rate measuring, thermometry, hydraulic conductivity measuring, speleology, hydrogeochemistry, groundwater dating, hydrology, measurements in situ
Geophysics:	Electrical methods, gravimetry, seismic measuring, RADAR, hydrogeophysical, well-logging methods (thermometry)
Work with PC:	MS Windows, MS Office, OS Mac, Internet, Grapher, Surfer, ArcView, Adobe Illustrator, Aquachem, Phreeq-C, Diagramme
Languages:	Czech (mother tongue), English (fluent, FCE 12/2006), French (fluent), Russian (advanced)
Driving licence B	

SCIENTIFIC GRANTS

- Cotutelle grant from the French government, Ministry of Foreign Affairs (3 x 6 months)
- Doctoral grant from the Czech government, Ministry of Education, Youth and Sport (4 years)
- Travel grant IAH for the participation at 36th IAH Congress, Integrating groundwater science and human well being. Toyama, Japan, 27 – 31 October 2008.
- Travel grant IAHS for the participation at 8th IAHS Scientific assembly & 37th IAH Congress, Vital resource under stress - How science can help. Hyderabad, India, 6 – 12 September 2009.

MEMBERSHIP

2010	Fédération Française de Spéléologie (FFS)
2010	Speleological association - SSPB (Société Spéleologique et Préhistorique de Bordeaux)

INTERESTS

Travelling, foreign languages, sport (tennis, badminton, squash, swimming, ski, cycling, speleology)

Seznam publikací - Publication list

PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ PUBLICATIONS RELATED TO THIS STUDY

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., HRKAL Z., LE COUSTUMER P., CELLE-JEANTON H. (2010): Carbon isotopes to constrain the origin and residence time of groundwater in the Cretaceous Basin of Bohemia (Czech Republic). *Applied Geochemistry* 25, 1265-1279. [[doi:10.1016/j.apgeochem.2010.05.012](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.05.012)]

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., CELLE-JEANTON H., HRKAL Z., LE COUSTUMER P. (2009): Palaeorecharge conditions of the deep aquifers of the Northern Aquitaine region (France). *Journal of Hydrology* 368, 1-16. [[doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.017](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.017)]

JIRÁKOVÁ, H., PROCHÁZKA, M., DĚDEČEK, P., KOBR, M., HRKAL, Z., HUNEAU, F., LE COUSTUMER, P. (*in press*): Geothermal assessment of the deep aquifers of the north western part of the Bohemian Basin, Czech Republic. *Geothermics*.

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., CELLE-JEANTON H., HRKAL Z., LE COUSTUMER, P. (*accepted*): Insight into palaeorecharge conditions of European deep aquifers. *Hydrogeology Journal*.

OSTATNÍ PUBLIKACE - OTHER PUBLICATIONS

HUNEAU, H., DAKOURE, D., CELLE-JEANTON, H., VITVAR, T., ITO, M., TRAORE, S., COMPAORE, N.F., JIRAKOVA, H., LE COUSTUMER, P. (*submitted*). Flow pattern and residence time of groundwater within the south-eastern Taoudeni sedimentary basin (Burkina Faso, Mali). *Journal of Hydrology*.

OPONENTURA ODBORNÝCH ČLÁNKŮ V MEZINÁRODNÍCH ČASOPISECH

PEER REVIEWS OF SCIENTIFIC PAPERS IN INTERNATIONAL JOURNALS

02/2010 Hydrological Sciences Journal (IF=1,8)

11/2010 Applied Geochemistry (IF=1.961)

Seznam konferencí – Conference list

Plakát - Poster

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., HRKAL Z., LE COUSTUMER P., CELLE-JEANTON H. (2008): Paleo-hydrogeology of the deep aquifers of the Northern Aquitaine Region (France). 36th International Association of Hydrogeologists Congress, Toyama, Japan, 26 October -1 November 2008.

Přednáška - Oral presentation

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., CELLE-JEANTON H., LE COUSTUMER P., HRKAL Z. (2010): Deep aquifers as archives of palaeorecharge conditions in Europe. 23ème Réunion des Sciences de la Terre Bordeaux, 25 - 29 October 2010.

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., CELLE-JEANTON H., HRKAL Z., LE COUSTUMER P. (2010): Insight into the Pleistocene palaeorecharge conditions of confined aquifers throughout Europe. Hydrology Conference 2010, San Diego, CA, USA, 11 - 13 October 2010.

JIRÁKOVÁ H., HUNEAU F., HRKAL Z., CELLE-JEANTON H., LE COUSTUMER P. (2009): Carbon isotopes and groundwater dating in the north-western part of the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic). 37th International Association of Hydrogeologists Congress, Hyderabad, India, 6-12 September 2009.

JIRÁKOVÁ H., PROCHÁZKA M., DATEL J., KOBR M., HRKAL Z. (2009): Geothermal conditions in the western part of the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic) deduced from the well-logging measurements. 10th Czech-Slovakian international congress in hydrogeology, Ostrava, Czech Republic, 31 August – 3 September 2009.