

**Stanovení stáří vzorků podzemní vody
na základě analýz izotopů tritia, tritia-hélia a ^{14}C
v rámci projektu GRACE Cíle 3
Shrnutí výsledků pro
oblast: Hřensko – Křinice/ Kirnitzsch**

Předložené výsledky byly získány v rámci přeshraničního projektu „Společně využívané podzemní vody na česko-saském pomezí“ (GRACE) v letech 2013/14. Hlavním partnerem projektu je Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., partnerem projektu pak Saský zemský úřad pro životní prostředí, zemědělství a geologii (*Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie - LfULG*).

Analýzy byly provedeny jak oběma partnery projektu, tak i externími institucemi. Ke stanovení stáří pomocí tritia byl VÚV TGM, v.v.i. a LfULG proveden především společný odběr vzorků na pozorovacích vrtech (resp. měřicích stanicích podzemních vod). Analytiku tritia a výpočty stáří vody provedl VÚV TGM, v.v.i. Analýzy pomocí tritia-hélia, včetně příslušných speciálních odběrů vzorků podzemní vody, zadal LfULG jako zakázku firmám G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH (odběr vzorků) a „helis“ – „helium isotope studies“ Ústavu fyziky životního prostředí (*Institut für Umweltphysik*) Univerzity Brémy, dr. J. Sültenfuß (analýza pomocí tritia-hélia, stanovení stáří). Analýzy vybraných vzorků podzemních vod z hlediska jejich aktivity ^{14}C proběhly na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy Praha. Vyhodnocení výsledků bylo záležitostí partnerů projektu.

Cíl: Cílem analýz bylo zjištění věkové struktury podzemní vody v zájmovém území. K tomuto účelu byly použity izotopy tritia (^3H), tritia-hélia ($^3\text{H}-^3\text{He}$) a ^{14}C . Kromě toho měly být zodpovězeny otázky k dynamice podzemních vod (míšení), resp. ke geohydraulice.

Realizace:

Odběr vzorků: F. Nüßler (Sächsische Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, BfUL)
T. Klups (Sächsische Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, BfUL)
M. Schaffrath (G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH)
M. Mühlenbeck (G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH)
T. Börner (G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH)
P. Šimek (VÚV TGM, v.v.i.)
Michal Novák (VÚV TGM, v.v.i.)

Analýzy: VÚV TGM, v.v.i.
dr. J. Sültenfuß („helis“, Institut für Umweltphysik der Universität Bremen)
Přírodovědecká fakulta UK Praha

Postupy – metodický postup, odběr vzorků, analýzy

Metodický postup

Principiálně staví stanovování stáří vody s pomocí vybraných izotopů na jejich radioaktivním rozpadu. Stanovení stáří pomocí tritia spočívá v rozpadu radioaktivního vodíkového izotopu tritia (^3H) a je vhodné pro velmi nízké stáří vody, přibližně mezi 10-40 roky. Tato metoda staví na vysokých antropogenních obsazích tritia v atmosféře v důsledku testů jaderných zbraní provedených v 50. a 60. letech minulého století. Vnos tritia do podzemních vod se děje prostřednictvím srážek, takže obsah tritia ve srážkách představuje vstupní signál pro určení stáří. Jako referenční stanice pro tritium byly pro dané zájmové území použity meteorologické stanice Freiberg (Sasko) a Hohe Warte, Vídeň (Rakousko).

Jelikož doposud již byla větší část tzv. „bombového tritia“ z atmosféry emitována a obsahy tritia se zase přibližují své přirozené nízké úrovni, stoupají nejistoty při stanovování stáří pomocí tritiové

metody. Proto byla jako další možnost k určení stáří vody použita metoda tritium-hélium, a to pro zvýšení vypovídací schopnosti výsledků. Tato metoda je rovněž vhodná pro určování stáří u mladých vod se stářím přibližně 0 až 50 let. Metoda tritium-hélium tkví na straně jedné v měření rozpadu tritia, a na straně druhé v měření tzv. tritiogenního hélia ($^3\text{He}_{\text{tri}}$), které při tom vzniká. Proto se tritium a tritiogenní hélium označují jako mateřsko-dceřiný pár nuklidů. Stáří vody se tak určuje nejenom z aktivity tritia, nýbrž i ze sumy tritia a produktu jeho rozpadu $^3\text{hélia}$, což zaručuje vyšší vypovídací schopnost výsledku.

Vlastní stanovení stáří vody probíhalo u obou metod na bázi zjištěných obsahů tritia, resp. tritiogenního hélia v [T.U.¹] s pomocí tzv. modelu piston-flow. U tohoto výpočetního modelu se ze zjištěných obsahů izotopů a z výchozí koncentrace ve srážkách vypočítá prostřednictvím zákona rozpadu stáří podzemní vody.

Metoda ^{14}C vychází z toho, že poměr ^{14}C - ^{12}C (poměr radioaktivního uhlíku a neradioaktivního uhlíku) v CO_2 atmosféry je přenášen do příjmového média, např. do vody. Tím je dán počáteční stav a přes rozpad ^{14}C je možné určit stáří. S pomocí této metody je možné provést věkové rozčlenění starších podzemních vod. Avšak odhad počátečního obsahu ^{14}C v podzemní vodě je spojen s velkou nejistotou, protože chemické procesy uskutečňující se při vnosu ^{14}C , stejně jako i hydraulicky podmíněné procesy směšování vody a výměnné reakce, bylo doposud možné podchytit pouze pomocí zjednodušených modelů. Tak například vede prosakování živou a neživou půdní zónou k míšení biogenního CO_2 s obsahem ^{14}C a fosilního uhlíkatu bez obsahu ^{14}C v proudu prosakující vody. Kvůli tomuto spolupůsobení recentního a fosilního uhlíku při tvorbě nové podzemní vody leží počáteční koncentrace ^{14}C pro podzemní vodu mezi 100% modern a více než 50% modern. To vede k tomu, že při předpokladu počáteční koncentrace ve výši 100% modern je stáří vody nadhodnoceno a při 50% modern podhodnoceno, protože v druhém případě nejsou zohledněny sekundárně vytvořené uhlíkaty s obsahem ^{14}C . Dalším vlivovým faktorem je nenasycená zóna, kde má na obsah ^{14}C v podzemní vodě vliv výměna izotopů mezi CO_2 vzduchu v pórech a hydrouhlíkatem vody v pórech. Kromě toho mají na stáří dle ^{14}C značný vliv konvekční jevy spojené s patrovou skladbou profilu, kdy jsou nad sebou vrstvy s mladou a starou podzemní vodou. To znamená, že při difúzním toku od mladší ke starší podzemní vodě se v hlubším patře voda dle ^{14}C zdatelně omlazuje (MOSER & RAUERT, 1980).

U prováděných analýz byl nejprve zjišťován obsah tritia a bylo stanovováno stáří vody ve vzorcích podzemních vod a vody z pramenů. Následně proběhlo u vybraných pozorovacích vrtů a studní určování stáří vody pomocí metody tritium-hélium. Výběr pozorovacích vrtů pro tyto účely se řídil podle zjištěného obsahu tritia, který neměl být nižší než 2 tritiové jednotky (T.U.), protože z metodických důvodů jinak není možné spolehlivě určit stáří vody. Na pozorovacích vrtech a pramenech se stářím vody vyšším než 50 let bylo stáří vody navíc určováno pomocí aktivity ^{14}C .

Odběr vzorků

Odběry vzorků podzemní vody pro analýzy tritia probíhaly na pozorovacích vrtech standardně odběrem reprezentativního vzorku podzemní vody (odčerpání 1,5-násobku objemu okružní, resp. až po konstantní stav hlavních parametrů). Na pramenech byly prováděny čerpané vzorky. U vodárenských studní byly vzorky odebírány odběrem surové vody při běžícím čerpadle vodárny. Stejně odběrové metody byly aplikovány pro získání vzorků k analýzám ^{14}C . U metody tritium-hélium byly kvůli vzácnému plynu hélium a jeho těkavosti odebírány vzorky pouze v pozorovacích vrtech a ve vodárenských studnách. Vzorek vody byl v průběhu odběru bez kontaktu se vzduchem naplněn do měděné trubičky, která pak byla vzduchotěsně uzavřena. Následující tabulka poskytuje přehled k jednotlivým pozorovacím vrtům, kde se odebíraly vzorky pro izotopové analýzy, k druhu pozorovacích vrtů, k datu a způsobu odběru vzorku.

T.U.= Tritium Unit

Tab. 1: Přehled k odběrům vzorků na pozorovacích vrtech a pramenech pro analýzy různých izotopů.

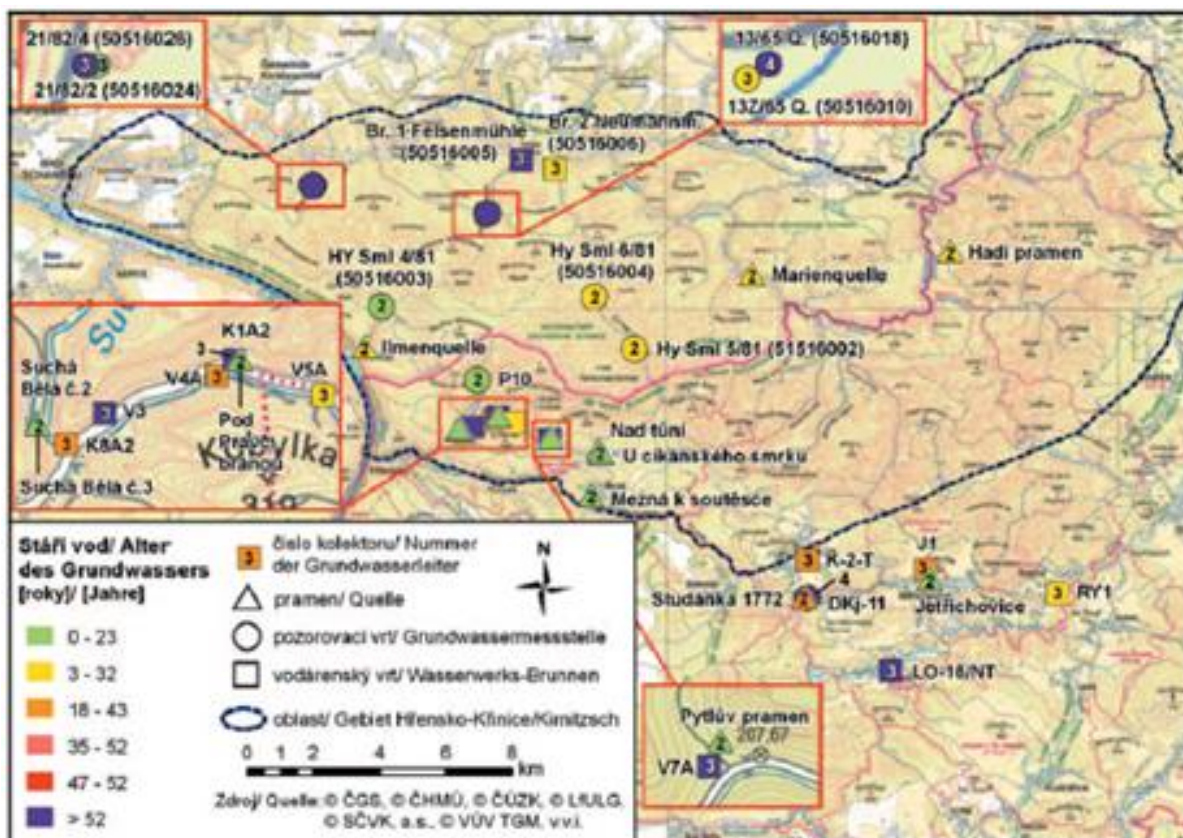
Č.	Název	Druh	Datum	Způsob odběru
<u>Tritium</u>				
50516003 (D)	Schmilka, HY SMIL 4/81, Wurzelweg	pozorovací trubka	28.05.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
50516024 (D)	Schmilka, Nasser Grund, Hy Sca 21/82/2	pozorovací trubka	28.05.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
50516026 (D)	Schmilka, Nasser Grund, Hy Sca 21/82/4	pozorovací trubka	28.05.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
50516018 (D)	Schmilka, 13/65 Quenenwiese	pozorovací trubka	28.05.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
51516002 (D)	Ottendorf, Hy Sml 5/81, Zschand, Hickelhöhle	pozorovací trubka	29.05.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
50516010 (D)	Schmilka, 13z/65 Quenenwiese	pozorovací trubka	29.05.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
50516005 (D)	studna Felsenmühle	studna	29.05.2013	surová voda
50516006 (D)	studna Neumannmühle	studna	29.05.2013	surová voda
	pramen Marienquelle (D)	pramen	29.05.2013	čerpaný vzorek
K1A2 (CZ)		studna	29.05.2013	surová voda
K8A2 (CZ)		studna	29.05.2013	surová voda
V4A (CZ)		studna	29.05.2013	surová voda
V5A (CZ)		studna	29.05.2013	surová voda
	Tři prameny (CZ)	pramen	29.05.2013	vzorek vody z pramene
	Pytlův pramen (CZ)	pramen	29.05.2013	vzorek vody z pramene
J 1 (CZ)		studna	21.06.2013	surová voda
RY 1 (CZ)		studna	21.06.2013	surová voda
LO-19/NT (CZ)		studna	21.06.2013	surová voda
K-2-T (CZ)		studna	21.06.2013	surová voda
	Hadí pramen (CZ)	pramen	21.06.2013	vzorek vody z pramene
P10 (CZ)		hladinoměr	30.07.2013	reprezentativní vzorek podzemní vody
PP552 (CZ)		pramen	30.07.2013	vzorek vody z pramene
PP 552/2 (CZ)		pramen	30.07.2013	vzorek vody z pramene
<u>Tritium-hélium</u>				
50516003 (D)	Schmilka, HY SMIL 4/81, Wurzelweg	pozorovací trubka	17.03.2014	měděná trubička
50516024 (D)	Schmilka, Nasser Grund, Hy Sca 21/82/2	pozorovací trubka	17.03.2014	měděná trubička
50516006 (D)	studna Neumannmühle	studna	25.03.2014	měděná trubička
K8A2 (CZ)		studna	18.03.2014	měděná trubička
V5A (CZ)		studna	18.03.2014	měděná trubička
J 1 (CZ)		studna	18.03.2014	měděná trubička
RY 1 (CZ)		studna	18.03.2014	měděná trubička
K-2-T (CZ)		studna	18.03.2014	měděná trubička
P10 (CZ)		hladinoměr	18.03.2014	měděná trubička
<u>¹⁴C</u>				
50516018 (D)	13/65 Quenenwiese	pozorovací trubka	25.03.2014	reprezentativní vzorek podzemní vody
LO-18/NT (CZ)		studna	07.11.2013	surová voda
K1A2 (CZ)		studna	07.11.2013	surová voda
	Pod Pravčickou bránou	pramen	07.11.2013	vzorek vody z pramene

Analytika

Analýzy tritia byly prováděny v laboratoři radioekologie VÚV TGM, v.v.i. pomocí kapalinové scintilační metody po elektrolytickém obohacení vzorků. Obsahy vzácného plynu ($^3\text{He}_{\text{tri}}$) pro metodu tritium-hélium byly stanovovány na hmotnostním spektrometru v laboratoři izotopů vzácných plynů Univerzity Brémy, Ústavu pro fyziku životního prostředí. Aktivita ^{14}C u vzorků podzemních vod byla zjišťována pomocí kapalinového scintilačního spektrometru v laboratořích Přírodovědecké fakulty UK Praha. Následně bylo z výsledků stanovováno stáří vody.

Výsledky

Stanovením **obsahů tritia** v podzemní vodě a ve vodě pramenů bylo možné určit stáří vody, které je zobrazeno na následující mapce.



Mapa 1: Zjištěné stáří vody v podzemní vodě a ve vodě pramenů s přiřazením bodů měření k příslušné zvodni.

Principiálně je pro interpretaci stáří vody v této oblasti nutné posuzovat dva procesy. Zaprvé je to doba setrvávání vody prosakující na povrchu terénu v nenasycené zóně pískovců, která může v údolích Křivice a Kamenice představovat 20 ->200 m. A zadruhé je to doba setrvávání a míšení podzemní vody v nasycené zóně zvodně. To znamená, že se stoupající mocností nenasycené zóny stoupá i doba setrvávání vody v této zóně (G.E.O.S. 1997). A s přibývajícím hloubkou ve zvodni stoupá rovněž i stáří vody.

V horní tuonské zvodni (zvoďeň 2) jsou mladší podzemní vody (se stářím 0-32 let). Ve spodní tuonské zvodni (zvoďeň 2+3, resp. 3) dominují starší vody se stářím 18-43 let. Ojedinele byly i zde nalezeny starší vody se stářím vyšším než 50 let (studna Felsenmühle, vodárna Hřensko). Z cenomanské, nejhlubší zvodně (zvoďeň 4) byl odebrán jeden vzorek (pozorovací vrt 50516018 „Quenenwiese“) s vodou se stářím vyšším než 50 let.

Pro vyhodnocení stáří vody je, jak již bylo uvedeno výše, důležité, aby byly do vyhodnocení zapojeny vzdálenosti mezi úrovní terénu a úrovní hladiny podzemní vody, resp. poloha filtrační zóny daného

vzorkovaného pozorovacího vrtu či poloha pramenů v terénu. Nejnižší stáří vody mezi 0 a 23 roky často korespondují s velmi malými filtračními hloubkami (20-30 m pod horní hranou terénu), nebo byly pozorovány u pramenů. Toto stáří vody bylo mimo jiných zjištěno i u pozorovacího vrtu 50512024, který se velmi pravděpodobně vyznačuje přímým vlivem podpovrchové podzemní vody, resp. srážkové vody. O něco vyšší stáří vody (3-32 let) bylo pozorováno na pozorovacích vrtech či studnách Neumannmühle (50516006), Richterschluchte (50516004) a Hickelhöhle (51516002), které jsou charakterizovány hlouběji posazenými filtry či delšími filtračními zónami (polohy filtrů na 40-60 m, maximálně 230 m pod horní hranou terénu). Celkově reprezentují tyto měřicí body mladší vody, a tím i silněji dobu setrvávání vody v nenasycené zóně. To velmi dobře ladí s výsledky firmy G.E.O.S. (1997). V hlouběji položené zvodni 3, resp. 2+3 již jsou pozorována vyšší stáří vody s dominantně 18-43 roky. Ale existují i měřicí body s vodou starší než 50 let. K nim patří např. studna Felsenmühle, která má dlouhou filtrační zónu v pásmu 124-224 m pod horní hranou terénu. Pro tuto studnu existují geofyzikální měření přítoků do vrtu, u nichž se ukázalo, že cca 50% podzemní vody přitékající do studny přitéká na výškové úrovni mezi 215-240 m pod horní hranou terénu (údaje k vystrojení vrtu od firmy ENSO AG Sachsen ke studni Felsenmühle). To velmi dobře vysvětluje vysoké stáří vody, protože tato studna tak dostává vysoký podíl podzemní vody přitékající z báze zvodně (báze zvodně Felsenmühle u -60 m n.m., přítoková zóna mezi -18 až -43 m n.m.). Pro třetí zvodně je možné vycházet z toho, že zjištěná stáří vody odrážejí jak dobu setrvávání v nenasycené zóně, tak i v nasycené zóně zvodně. Adekvátně své poloze v nejstarší části pískovcových vrstev vykazoval vzorek vody ze zvodně 4 velmi vysoké stáří vody přesahující 50 let.

Výsledky stanovování stáří vody **metodou tritium-hélium** potvrzují výsledky tritiových analýz, přičemž stáří podle tritia-hélia leží většinou v oblasti horní věkové hranice tritiových věkových tříd.

U hodnocení stáří vody pomocí **analýzy ^{14}C** se potýkáme s výše prezentovanými obtížemi s určením výchozího obsahu ^{14}C . Považujeme-li nejprve konvenční stáří vody za standardizovaný výsledek metody ^{14}C , pak byly zjištěny následující hodnoty:

Tab. 2: Zjištěné konvenční stáří vody jako standardizovaný výstup metody ^{14}C .

Pozorovací vrt	Konvenční stáří vody [a]
K1A2	2590 ± 310
LO-18N/T	2170 ± 310
50516018	4280 ± 340
Pod Pravčickou bránou	510 ± 210

Pro výpočet „reálného“ stáří vody byl použit výchozí obsah ^{14}C ve výši 85% modern, modelování se neprovádělo. Bylo tak vypočteno toto stáří vody:

Tab. 3: „Reálné“ stáří podzemní vody při předpokladu iniciačního obsahu ^{14}C modern ve výši 85%.

Pozorovací vrt	Konvenční stáří vody [a]
K1A2	cca 1.300
LO-18N/T	cca 900
50516018	cca 2.900

I z hodnot tabulky 3 je zřejmé, že stáří vody stoupá se zvyšující se hloubkou ve zvodni. Obě měřicí stanice K1A2 a LO-18N/T jsou zbudovány ve zvodni 3, hladinoměr 50516018 v nejhlubší zvodni 4. Pro tyto pozorovací vrty bylo dále možné ukázat, že podíl komponent mladé vody s nejkratší dobou setrvávání je kolem 20%, zatímco komponenty staré vody s dobami setrvávání čítajícími několik stovek až tisíců let převažují (80%). V protikladu k tomuto je voda pramene Pod Pravčickou bránou (zvodně 2) podstatně mladší a sestává převážně z komponent mladé vody s dobou setrvávání několika desetiletí.

Celkově je možné vycházet z toho, že při použití metody tritium a tritium-hélium bylo stáří podzemní vody systematicky podhodnocováno. Vyhodnocení výsledků analýz tritia a tritia-hélia se provádělo, jak je uvedeno výše, s pomocí výpočtového modelu piston-flow, který staví na následujících předpokladech: míšení různě starých komponent vody se neuskutečňuje, podzemní voda je

nenapjatá, oblast tvorby nové podzemní vody je v porovnání s celým povodím zanedbatelně malá (G.E.O.S. 2007). Tím jsou sice výsledky analýz tritia a tritia-hélia srovnatelné, avšak dané předpoklady modelu piston-flow platí pro naše zájmové území pouze velmi omezeně. Zvodeň 4 je celkově a zvodeň 3 parciálně napjatá. Pro zvodeň 2 a 3 se nová podzemní voda tvoří v celém povodí. Dále je třeba vycházet z toho, že v nasycené zóně uvnitř zvodně s velkou mocností a mezi jednotlivými patry dochází k procesům míšení. V této souvislosti představují další problém pro vyhodnocení většinou velmi dlouhé filtrační zóny sledovaných pozorovacích vrtů a studní.

U metody tritium-hélium navíc dochází k tomu, že kvůli velkým vzdálenostem mezi terénem a hladinou podzemní vody část hélia pocházejícího z rozpadu tritia vytěká, takže nemůže být zohledněna při určování stáří vody. Tento efekt popisují i CORCHO ALVARADO ET AL. (2013).

Celkově se můžeme domnívat, že stáří podzemní vody je vyšší. Hovoří pro to výsledky firmy G.E.O.S. (2007), která v saské části zájmového území pomocí exponenciálního modelu piston-flow zjistila převažující stáří vody nad 50 let. Výsledky analýz ^{14}C pro toto rovněž hovoří, i když je třeba jasně říct, že tyto výpočty stáří vody staví na předpokladu iniciačního obsahu ^{14}C . Poznatky z určování stáří podzemní vody byly začleněny do tvorby modelů proudění podzemních vod.

Literatura:

CORCHO ALVARADO, J. A.; T. PAČES & R. PURTSCHERT (2013): Dating groundwater in the Bohemian Cretaceous Basin: Understanding tracer variations in the subsurface. – Applied Geochemistry (29): 189-198.

G.E.O.S. FREIBERG INGENIEURGESELLSCHAFT MBH (1997): Gutachten zur Entwicklung und Prognose der Grundwasserdynamik im Gebiet Hinterhermsdorf (Landkreis Sächsische Schweiz) und Hřensko (Tschechische Republik). – Gutachten im Auftrag des Staatlich Umweltfachamtes Radebeul (unveröffentlicht), Bearbeiter: H. P. Mibus, P. Szymczak; 48 S. + Anl.

G.E.O.S. FREIBERG INGENIEURGESELLSCHAFT MBH (1998): Übersichtsgutachten des Grundwasserdargebotes und dessen Nutzung im Zittauer Gebirge unter Berücksichtigung der Grundwassernutzungen auf tschechischem Gebiet. – Gutachten im Auftrag des Landesamtes für Umwelt und Geologie (unveröffentlicht), Bearbeiter: H. P. Mibus, T. Schirner, J.-U. Mibus; 68 S. + Anl.

G.E.O.S. FREIBERG INGENIEURGESELLSCHAFT MBH (2007): Gutachten. Zustandsüberwachung Grenzgrundwasser/ Operatives Messnetz. – Gutachten im Auftrag des Regierungspräsidiums Dresden (unveröffentlicht), Bearbeiter: S. Rösner, P. Szymczak, R. Höhn; 60 S. + Anl.

MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. – Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart, 400 S.