



KRYCÍ LIST – VÝSTUPY

Název výstupu	Metodika využití stopovacích zkoušek v geotermálních vrtech
Výzkumný program	Hydrogeologie, hydrochemie a termohydraulické modelování
Partner/partneři	Česká geologická služba
Termín zpracování	5/2020

Název projektu	Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)
Registrační číslo	CZ.02.1.01/0.0/0.0/16 013/0001792
Žadatel	Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Metodika využití stopovacích zkoušek v geotermálních vrtech

Autoři: Pavla Holečková, Jan Holeček, Jaroslav Řihošek

Česká geologická služba

Praha, květen 2020

Obsah

1. Úvod	4
2. Účel stopovacích zkoušek v geotermální praxi	4
3. Typy látek využívané pro stopovací testy a experimenty	5
3.1. Přirozeně se vyskytující stopovače	6
3.2. Chemické stopovače	6
3.2.1. Anorganické soli	6
3.2.2. Barviva	8
3.2.3. Organické látky	9
3.3. Radioaktivní stopovače	11
4. Metodika provedení stopovacích zkoušek	12
5. Pohyb stopovací látky horninovým prostředím	14
6. Shrnutí a závěr	14
7. Použité zdroje	15

1. Úvod

V rámci řešení Výzkumného programu č. 3 „Hydrogeologie, hydrochemie a termohydraulické modelování“ v sekci „Hydrochemie“, byla řešena metodika možností využití stopovacích zkoušek v geotermálních vrtech pro účely analýzy existence hydraulických cest v horninovém tepelném výměníku pro následnou optimalizaci provozu takového výměníku.

Byla provedena metodická rešerše pro provádění stopovacích zkoušek v geotermálních vrtech na základě současných zkušeností tzv. best practices z relevantních geotermálních instalací ve světě. Tyto poznatky jsou aplikovatelné při výzkumu geotermálního horninového výměníku na území ČR v rámci výstavby hluboké geotermální instalace.

2. Účel stopovacích zkoušek v geotermální praxi

Stopovací zkoušky patří v oblasti výzkumu hydrogeologie geotermálních vrtů k metodám, které poskytují pravděpodobně největší možnou míru poznání stavu hydraulických vlastností horninového prostředí podzemního tepelného výměníku. Stopovacími zkouškami lze analyzovat míru hydraulického propojení dvou či více geotermálních vrtů a lze objasnit preferenční hydraulické cesty v horninovém prostředí. V určitých případech je možné pomocí stopovacích zkoušek identifikovat i místa hydraulických bariér (například na posunu zlomů). Dále je možné pomocí stopovacích zkoušek měřit ztráty injektovaného média do horninového prostředí, měřit poločas zdržení podzemních fluid mezi injektáží a zpětným čerpáním na povrch nebo měřit rychlost proudění podzemních vod v horninovém prostředí. Při použití speciálních teplotlivých stopovacích látek, lze analyzovat i maximální dosažené teploty ohřevu teplotnosného média. V případě analýzy přirozeně se vyskytujících látek v podzemní vodě, je možné určit i původ hydrotermálních fluid případně analyzovat jejich geochemický vývoj.

Výsledky získané ze stopovacích zkoušek jsou nezbytné pro správné nastavení způsobu vtláčení média do horninového tepelného výměníku, aby byl udržován konstantní provozní tlak a pokud možno i konstantní optimální průtok horninovým výměníkem a nedocházelo k výrazným změnám chemického složení podzemních fluid vlivem mísení různých fluid, které by v extrémním případě mohlo způsobit srážení sekundárních minerálních fází a zatěsnění hydraulických cest v puklinách tepelného výměníku nebo v geotermálním vrtu samotném.

3. Typy látek využívané pro stopovací testy a experimenty

Stopovací látkou může být jakákoli chemická látka, která zůstane stabilní v geotermálním prostředí a je možné ji detekovat po smísení s podzemními fluidy. Existuje celá řada látek používaných pro geotermální stopovací experimenty a stále se provádí nové výzkumy s cílem najít nejvhodnější stopovací látky pro různá prostředí a výzkumné cíle. Pro stopovací zkoušky můžeme využít přirozeně se vyskytující látky, nebo látky uměle dodané. V případě umělého stopovače se látka v horninovém prostředí přirozeně nevyskytuje, nebo se vyskytuje pouze ve velmi malém množství, a tato látka je do prostředí uměle vtlačena během stopovací zkoušky.

Přirozeným (přirozeně se vyskytujícím) stopovačem může být libovolná látka, která se vyskytuje v dostatečné koncentraci a je od okolí dostatečně geochemicky kontrastní, aby ji bylo možné detekovat a vyhodnotit přítomnost či migraci.

Mezi nejčastěji používané přirozené stopovací látky patří chloridy, amoniak a různé stabilní izotopy vody (Petrowiki, 2013). Z umělých stopovacích látek jsou nejvíce využívány tritium, karboxylové a benzen sulfonové kyseliny, polyaromatické sulfonáty, chlorofluoruhlovodíky, fluorovodíky, 2-naftalensulfonát, 2,7-naftalensulfonát, radioaktivní jodid-125, jodid-131, bromidy, fluorescein sodný a fluorescenční barviva, jako jsou fluorescein a rodamin (Petrowiki 2013, Rose a kol. 1998, 2001, Axelsson 2005, Reed 2007).

Ideální stopovací látka má následující vlastnosti:

- Látka je teplotně stabilní a nerozkládá se při teplotách, které panují v geotermálním výměníku.
- Látka je detekovatelná ve velmi malém množství a detekční metoda je velmi citlivá vůči stopovací látce.
- Látka by se měla v horninovém prostředí chovat konzervativně. To znamená, že by měla být inertní vůči horninovému prostředí a nemělo by docházet k chemickým či izotopickým interakcím mezi stopovací látkou a rozpuštěnou mineralizací v podzemní vodě, nebo mezi stopovačem a horninotvornými minerály.
- Látka by měla být stabilní, aby nedocházelo ke změnám koncentrace z důvodu rozpadu stopovací látky v čase.
- Látka by měla být netoxická a bezpečná pro životní prostředí.

3.1. Přirozeně se vyskytující stopovače

Přirozeně se vyskytující stopovače přináší informace o rychlosti transportu, stupni obnovy, rychlosti obnovy, mísení podzemních vod a o interakcích podzemí vody s povrchem. Může to být jakákoliv látka, která se vyskytuje v podzemní vodě přirozeně bez ohledu na záměr provést stopovací zkoušku. Může se jednat o ionty přirozeně se vyskytujících rozpuštěných solí, rozpuštěné plyny, stabilní či radiogenní izotopy. Mezi přirozeně se vyskytující stopovače můžeme zařadit i látky, které sice nejsou přírodního původu, avšak lidskou činností se dostaly do přírodního prostředí. Jedná se zejména o rezidua různých chemických látek používané pro jiné účely. Mezi tradiční stopovací látky tohoto typu patří radioaktivní tritium (Kluge a kol. 2010, Blavoux a kol. 2013, Chatterjee a kol. 2018), které bylo v minulosti do prostředí uvolněno při jaderných experimentech v průběhu 20. století. Dalšími běžně využívanými přirozeně se vyskytujícími stopovači jsou látky ze skupiny freonů – CFC a SF₆ (Upstill-Goddard a Wilkins 1995). Tritium, freony a SF₆ jsou využívány zejména pro analýzu stáří (geochronologii) a analýzu předpokládané doby zdržení vody v podzemí. Mezi nové a nekonvenční stopovací látky, které se bohužel již volně vyskytují v životním prostředí, patří rezidua léčiv a další kontaminanty ze skupiny herbicidů, pesticidů a dalších látek využívaných v zemědělství. Tyto látky je možné využít pro analýzu komunikace mělkých kolektorů s hlubším prostředím geotermálních výměníků. V případě, že jsou vody s obsahem těchto látek vtláčeny injekčním vrtem do hlubších partií horninového prostředí, lze je využít i pro analýzu proudění v hlubší části horninového prostředí. Z důvodu nízké koncentrace přirozeně se vyskytujících stopovačů je obvykle výhodnější použít stopovací látku, která je pro stopovací experiment cíleně vybrána a injektována do studovaného prostředí.

K určení cirkulace a stáří hydrotermálních vod, zdrojů a stupni obnovy, teploty rezervoáru a mísení různých zdrojů vod, stejně jako k interpretaci interakcí voda – hornina jsou využívány izotopy, které se ve vodě přirozeně vyskytují. Jsou to především stabilní izotopy H a O (D, ¹⁸O), izotopy He (³He/⁴He) a Ne (⁴He/²⁰Ne) a izotopy C (¹⁴C a ¹³C) (Qiu a kol. 2018, Stefánsson a kol. 2019).

3.2. Chemické stopovače

3.2.1. Anorganické soli

Nejčastěji využívané látky ze skupiny anorganických solí jsou halogenidy alkalických prvků či prvků alkalických zemin. Zcela nejběžnějším stopovačem z této skupiny je NaCl, který není toxický a je velmi levný. Jeho nevýhodou je, že podzemní vody v hlubších partiích horninového prostředí často obsahují přirozeně se vyskytující solanky a pak není možné použití této stopovací látky. Obvykle je ale stále možné využít jiné soli, jež se přirozeně vyskytují v nízké koncentraci. Běžně se využívají KCl, LiCl, které jsou ale ekonomicky nákladnější než NaCl. Výhodou chloridů je jejich vysoká rozpustnost. Při dostatečné koncentraci se tyto látky chovají jako konzervativní stopovací látky.

Kumagai a kol. (2004) použili v geotermální oblasti Sumikawa v Japonsku stopovací látku KI, který vtláčeli do vrtu společně s kondenzátem páry a KBr, který vtláčeli do vedlejšího vrtu s odpadní vodou o teplotě 140°C. V ostatních produkčních vrtech sledovali obsah KI i KBr, kde se objevili po 2 (vrty vzdálené 1000 m) až 7 dnech (vrty vzdálené 1500 m). Stopovač vymizel po 6 měsících. KI je nereaktivní a konzervativní stopovač.

Pro testy, při kterých je do vrtů vtláčena pára s plynným stopovačem se jako vhodná látka ukázal fluorid sírový - SF₆ (Hirtz a kol. 2001). Patří k hojně používaným látkám a díky citlivým metodám jeho stanovení slouží jako referenční stopovač k ostatním používaným stopovacím látkám (Hirtz a kol. 1993).

Kationtově výměnné stopovače - např. Cs⁺ jsou vhodné pro prostředí s přirozeně nízkým obsahem Cs. Tento stopovač vykazuje proces kationtové výměny mezi fluidní fází a povrchem horninotvorných minerálů (Reimus a kol. 2020). Procesu kationtové výměny lze využít při studiu charakteru puklinové sítě a odhadu velikosti kontaktní plochy puklin. V prostředí s vyšší četností drobných puklin je zachyceno (vyměněno) větší množství stopovací látky než v prostředí, kde je pouze několik velkých průtočných puklin.

3.2.2. Barviva

Barviva jsou pro člověka nejpřirozenějšími stopovacími látkami, protože je lze ve vyšší koncentraci detekovat přímo lidským okem. V praxi se ale pro jejich detekci využívají sofistikovanější metody – různé druhy kolorimetrů, fotometrů či spektrometrů, které pracují ve viditelném i ultrafialovém spektru záření. Výhodou barviv je poměrně jednoduchá a levná instrumentace jejich detekce, kdy je možné koncentraci barviva měřit kontinuálně v průtočné cele připojené na vzorkovací potrubí čerpaného vrtu. Lze tak snadno sledovat celý průběh průnikové křivky horninovým prostředím během stopovacího experimentu.

Mezi nejčastěji využívané látky ze skupiny barviv patří bezesporu fluoresceiny. První zmínky o použití fluoresceinů jako stopovací látky pochází již z roku 1906 (Dole 1906), kdy byly tyto látky použity pro stopování toku povrchových vod. V průběhu 60. a 70. let začaly být fluoresceiny hojně využívány v karsologii a ropném průzkumu (Smart a Laidlaw 1977) pro analýzu toku podzemních vod, mísení vod, směru toku či disperzi vod v průběhu jejich cesty horninovým prostředím. V posledních desetiletích jsou fluoresceiny využívány i pro výzkum vlastností geotermálních horninových výměníků, například ve Klamath Falls v Oregonu (Gudmundsson a kol., 1983), Cornwallu, Anglie (Batchelor, 1986), Fenton Hill, Nové Mexiko (Tester a kol., 1986), Hatchobaru, Japonsko (Yoshida, 1980), Palinpinon, Filipíny (Urbino a kol., 1986), nebo v Dixie Valley v Nevadě (Adams a kol., 1989). Z novějších výzkumů lze pak zmínit využití fluoresceinů na známé lokalitě Soultz-sous-Forêts ve Francii (Radilla a kol. 2012). Byl použit pro celou řadu opakovaných testů a výsledky stopovacích zkoušek byly následně použity k sestavení různých interpretačních modelů (Egert a kol. 2020). 82,5% roztok fluoresceinu byl injektován do vtlačných vrtů. Z monitorovacích vrtů byly průběžně odebírány vzorky a online analyzovány následující parametry: koncentrace barviva, elektrická vodivost, pH, Eh a základní chemická analýza čerpané podzemní vody (Radilla a kol. 2012).

Kromě analýzy toku fluid podzemím lze fluoresceiny aplikovat i při výzkumu efektivity přísad zabraňujících usazování a inkrustaci novotvořených pevných fází v potrubí, geotermálním vrtu i horninovém výměníku. Práce z této oblasti výzkumu publikoval Adams (1985) z lokalit East Mesa v Kalifornii a Pleasant Bayou v Texasu. Nespornou výhodou fluoresceinů jakožto stopovací látky je jejich snadná analýza, detekovatelnost a silné zbarvení i při nízkých koncentracích. Přestože jsou fluoresceiny

chemicky stabilní látky odolné i vůči biodegradaci, jsou citlivé na termální degradaci při zvýšených teplotách. Jsou použitelné ve středně teplotních systémech s teplotou nepřesahující 250°C (Smart a Laidlaw, 1977). Využíván bývá i fluorescein sodný ($C_{20}H_{10}Na_2O_5$), který ale není v prostředí zcela stabilní (Axelsson a kol. 2001).

3.2.3. Organické látky

Díky značné chemické a strukturní variabilitě organických látek je možné vybrat pro stopovací testy takovou látku, která ideálně vyhovuje podmínkám studované oblasti – šíření prostředím, povrchová adsorpce a desorpce a tepelná stabilita. Výhodou organických látek jsou i nízké detekční limity analytických metod a nízká toxicita, čímž nezatěžují životní prostředí.

Organické kyseliny

Adams s kolektivem (1992) studoval 39 aromatických organických kyselin z důvodu použití jako stopovací látky pro geotermální výzkum. Výzkum zahrnoval termální stabilitu látek do teploty okolo 300 °C, chování při různých salinitách prostředí a různých obsazích vzdušného kyslíku. V jeho práci bylo shledáno minimálně 24 organických kyselin vhodných pro využití jako geotermální stopovací látky. Testované organické kyseliny nevykazovaly adsorpci na povrchu hornin a chovaly se jako konzervativní stopovač. Některé z těchto látek byly úspěšně otestované v reálném prostředí geotermálního pole Dixie Valley v Nevadě.

Jako zástupce vhodných organických kyselin využitelný pro geotermální stopovací experimenty lze uvést kyselinu benzoovou, ftalovou, toluenové kyselin, nebo kyselinu sorbovou (Tang 2013). Organické kyseliny lze využít pro účely testování velikosti puklin, objemu pórů, celkové porositě a transportních vlastností tepelného výměníku.

Ostatní organické sloučeniny

Organická chemie nabízí nespočetné množství látek, z nichž některé byly pro jejich výhodné vlastnosti otestovány jako stopovače v geotermální praxi. Maxfield a kol. (2005) testovali různé druhy fluorovaných uhlovodíků, mimo jiné trifluorometan (R23), 1,1,1,2-tetrafluoretan (R134a), perfluorodimethylcyklobutan, perfluoromethylcyklopentan, perfluoromethylcyklohexan, perfluorodimethylcyklohexan a perfluorotrimethylcyklohexan. Ty se ukázaly jako velmi rezistentní konzervativní stopovače, avšak vhodné pouze do prostředí se střední teplotou (do 200°C). Pro prostředí s vysokou teplotou nebo v místech vysokého tepelného gradientu není tento typ stopovačů kvůli termální stabilitě vhodný.

Mezi další testované látky patří Na-benzoát, 1,5-, 2,7-, 1,6- a 2,6-naftalen disulfonát. Opět se jedná o konzervativní stopovače vhodné do prostředí do 200°C i pro dlouhodobé experimenty v řádu několika let. Tyto látky byly otestovány na známém geotermální zdroji Souz sous Foret ve Francii (Sanjuan a kol. 2006) či na geotermálním poli Habanero v Austrálii (Ayling a kol., 2016).

Schaffer a kol. (2016) testovali v laboratorních podmínkách 17 různých amidů (amidy S1 až S17 a jejich hydrolytické produkty H1 až H3), které si sami syntetizovaly. Jedná se o stopovače citlivé na teplotu a jsou využívány pro zjištění rozložení tepla v geotermálním rezervoáru a ke sledování tepelného toku. Experiment byl prováděn při teplotách 100 – 200°C, celkově je použití amidů vhodné pro středně teplé geotermální rezervoáry do 200°C (Schaffer a kol. 2016). Jejich další výhodou je nezávislost reakcí na pH pro hodnoty běžné v geotermálních rezervoárech. Amidy a estery jako vhodné teplotní stopovače byly studovány již dříve Robinson a Tester (1990), avšak narazili na problém s komerční výrobou potřebných chemikálií. Řešení navrhl Nottebohm a kol. (2012), kdy menší množství tepelně citlivých látek přidali k běžněji používanému stopovači (naftalensulfonáty), čímž spojili výhody obou – citlivost na teplotu s fluorescencí a vysokou rozpustností.

Pro rezervoáry s nízkou teplotou je vhodným tepelně-citlivým stopovačem fenol acetát (Nottebohm a kol. 2012).

Nízkomolekulární alkoholy se mohou využít jako dvou fázové stopovače, díky jejich volatilitě (Fukuda a kol. 2018). V první fázi je alkohol využit jako tekutý stopovač k určení propustnosti rezervoáru a průtokových cest. V druhé fázi, při dosažení teploty varu, je

možné zjistit místa a podmínky, kde k tomuto dochází, a dále preferenční cesty unikajících par.

Butyramid, u kterého jsou dobře známy stupně degradace v závislosti na teplotě, je možné použít jako teplotně citlivou stopovací látku, kdy je možné sledovat rozložení teploty v geotermálním rezervoáru (Reimus a kol. 2020).

3.3. Radioaktivní stopovače

Většina stopovacích zkoušek předpokládá konzervativní chování stopovacích látek, ale obvykle tomu tak není a dochází k různým interakcím (izotopická frakcionace, chemické reakce, nedefinovatelný rozpad látky), které ztěžují vyhodnocení stopovacích testů a vnášejí nedefinovatelné chyby. Látka, která se svými vlastnostmi blíží dokonale konzervativnímu stopovači je tritiem značená voda (HTO). Tritiový stopovač byl použit v řadě geotermálních studií (Malik a kol., 2020, Chatterjee a kol, 2019, Cheng a kol, 2010, Kitaoka 1990).

Dalšími běžně používanými stopovači jsou tritiem nebo radioaktivním uhlíkem značené alkoholy, které jsou ve vodě dobře mísitelné - isopropyl alkohol, n-propyl alkohol, či n-butyl alkohol. Tyto stopovače se obecně chovají obdobně jako HTO avšak díky větší molekule se u nich objevuje větší zpoždění při průchodu horninovým prostředím a při jejich aplikaci je nutné znát rozdělovací koeficient.

Další možností je využívání iontů či komplexních iontů značených radioizotopy. Může se jednat jak o kationty $^{22}\text{Na}^+$, ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{57}Co a ^{60}Co , $^{56}\text{Co}(\text{CN})_6^{3+}$ (Wood a kol. 1993), tak i anionty $^{36}\text{Cl}^-$, $^{35}\text{SO}_4^{2-}$, $^{125}\text{I}^-$ a $^{131}\text{I}^-$, S^{14}CN^- . Iontové stopovače mají vždy nějakou míru interakce s prostředím a je nutné znát chování a průnikové křivky pro jednotlivé použité látky.

<u>Water Tracer Compound</u>	<u>Half-Life (year)</u>	<u>Main Radiation Characteristics (keV)</u>	<u>Comments</u>
HTO	12.32	β^- (18)	Generally applicable
CH ₂ TOH ¹⁾	12.32	β^- (18)	Caution at $T > 100^\circ\text{C}$ (partition into gas phase), some biodegradation below 70 to 80°C
CH ₃ CTOHCH ₃	12.32	β^- (18)	Reasonably general application
C ₃ H ₇ CHTOH	12.32	β^- (18)	Reasonably general application, partition somewhat into oil
S ¹⁴ CN ⁻	5730	β^- (156)	For $T < 90$ to 100°C , long-term experiments
³⁶ Cl ⁻	3.10 ⁵	β^- (709)	High-temperature reservoirs, long term, EMS-analysis
²² Na ⁺	2.6	β^+ (545), γ (1274.5)	High-temperature tracer in saline reservoirs, long term, slight reversible sorption

Obr. 1: Příklady používaných radioaktivních stopovačů s uvedením jejich poločasu rozpadu dle Bjørnstad a Maggio (2002).

Při používání radioaktivních nebo chemických látek je vyžadováno dodržování určitých bezpečnostních pravidel. Používání radioaktivních látek je obecně striktně omezené a je důležité provádět testovací zkoušky s ohledem na aktuální předpisy.

3.4 Nanočásticové stopovače

Stopovače s nanočásticemi mohou být zvoleny s ohledem na konkrétní prostředí, především v závislosti na teplotních podmínkách geotermálního vrtu (Le Lous a kol. 2015). Využívají se především k určení reaktivnosti prostředí tepelného rezervoáru, kde je velkou výhodou právě jejich tepelná stálost (Redden a kol. 2010). V kombinaci s rozpustnými stopovači je potom možné určit tepelný obraz rezervoáru a najít místa možného úniku tepla.

4. Metodika provedení stopovacích zkoušek

Stopovací zkoušky jsou používány ve všech hydrologických a hydrogeologických prostředích (průlinových i puklinových) pro zjištění pohybu vody či kontaminantů v horninovém prostředí. Původně byly vymyšleny pro kras a předpokládá se, že více než 90 % stopovacích zkoušek bylo provedeno v karbonátových kolektorech (Goldscheider a kol. 2008).

Z hydraulického hlediska lze stopovací zkoušky rozdělit na testy s přirozeným hydraulickým gradientem, kdy tok podzemní vody horninovým prostředím není testem výrazně ovlivňován. V druhém případě je hydraulický gradient v horninovém výměníku uměle vyvolán aktivním vtláčením stopovací látky do podzemí.

V geotermální praxi jsou stopovací zkoušky prováděny mezi 2 a více vrty. Vrt, do kterého je aplikována stopovací látka, nazýváme injekční vrt. Vrt, v němž je stopovací látka detekována, je pak označován jako vrt čerpací. Stopovač je obvykle aplikován pouze do úseku vymezeného pomocí pakrů umístěných v zájmové části vrtu. Látka v druhém sledovaném vrtu je detekována buď v celém profilu, nebo v části vrtu, kde je předpokládána hydraulická spojitost s vrtem injekčním.

Způsob detekce stopovače je závislý na použité stopovací látce. Může se jednat o detekci fyzikální, chemickou, radioaktivní či fotometrickou.

Fyzikální detekce zahrnuje například měření změn vodivosti (elektrické konduktivity) podzemní vody v závislosti na obsahu rozpuštěných solí v podzemní vodě. Měření změn elektrické konduktivity podzemní vody lze dobře využít ve vrtech, kde kolektor obsahuje vodu s nízkým obsahem rozpuštěné mineralizace a nízkou elektrickou vodivostí. Po přidání i relativně malého množství soli, nejčastěji NaCl, vodivost takové vody rychle vzrůstá a lze ji snadno detekovat karotážní elektrickou konduktometrií. Hluboké geotermální vrty bohužel často obsahují různé typy solanek s vysokým obsahem solí a pak tuto metodu nelze použít.

Chemická detekce stopovačů obvykle zahrnuje odběr vzorku vody z vrtu, případně kontinuální odběr vzorků pomocí čerpání. V závislosti na složitosti detekce chemické látky je stopovač detekován online v průběhu čerpání (například Na^+ , K^+ , Li^+ , Cl^-) pomocí iontově selektivních elektrod nebo jsou vzorky odebírány v časových intervalech a později analyzovány v chemické laboratoři. Okamžitá analytika stopované látky na místě u čerpaného vrtu poskytuje mnohem větší flexibilitu rozhodování při řízení průběhu vtláčecích zkoušek. Nevýhodou je pak omezená škála stopovačů, které mají snadnou instrumentaci detekce.

Fotometrická detekce stopovacích látek využívá analýzy změn složení světelného spektra při průchodu fotometrem, případně spektrometrem. V případě použití barviv jsou využívány pro detekci vlnové délky viditelného záření, u některých fluorescenčních barviv

jsou pro detekci stopovací látky využívány i části spektra s kratší vlnovou délkou v oblasti UV záření.

Používání radioaktivních stopovačů přináší problémy legislativního, ale i bezpečnostního charakteru, což je dané povahou radioaktivní stopovací látky. Největší výhodou radioaktivních stopovačů je vysoká citlivost detekce stopovače a poměrně jednoduchá instrumentace detekčního zařízení. Detekce radioaktivity stopovače může být provedena in situ přímo ve vrtu pomocí sond umístěných na kabelu, nebo ex situ v detekční cele umístěné na povrchu, kam je přiveden odčerpávaný vzorek podzemní vody z vrtu.

5. Pohyb stopovací látky horninovým prostředím

Cílem tradičních stopovacích experimentů je zjištění transportních cest a parametrů horninového prostředí. Injektáž stopovače do prostředí je jen prostředkem jak označit injektovaná fluida a odlišit je od ostatních již zde přítomných.

Stopovací látka se v prostředí může šířit třemi základními mechanismy (Axelsson a kol. 2005):

- 1) advekcí a konvekcí, kdy je stopovač unášen pohybem vody v horninovém prostředí
- 2) mechanickou disperzí stopovací látky, která reflektuje různé rychlosti pohybu částic ve vodném prostředí
- 3) molekulární difuzí, jež je způsobena difuzí molekul stopovací látky z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací.

Teorie transportu látek ve vodě v průlinovém i puklinovém prostředí je obsáhle diskutována v řadě publikací například Bear a kol. (1993) nebo Javandel a kol. (1984).

6. Shrnutí a závěr

Pojem stopovací zkoušky zahrnuje různé typy experimentů obvykle zaměřené na transport fluid v horninovém prostředí. V širším kontextu pak stopovací látky – stopovače mohou být zaměřeny i na zjištění zdroje a původu fluid v podzemí, případně na zhodnocení stáří těchto fluid, jejich geochronologii. S ohledem na různé zamýšlené cíle stopovacích zkoušek, využití různých stopovacích látek i způsobů jejich detekce není možné navrhnout jednotnou metodiku pro stopovací zkoušky. Vždy je nutné metodiku prací uzpůsobit zamýšlenému cíli, použitému stopovači i lokálním geologickým podmínkám na základě aktuálně známých vlastností horninového prostředí, tektoniky i vlastnostech podzemních

vod. Při provádění stopovacích zkoušek jsou ve většině případů do prostředí zaváděny dodatečné látky a nelze předem přesně odhadnout, do jakých míst se tyto stopovací látky v průběhu experimentu dostanou. Je nutné při provádění stopovacích experimentů vždy postupovat opatrně, aby nebylo ohroženo životní prostředí a zejména pak vodní zdroje. Na druhou stranu stopovací zkoušky přináší obrovské množství cenných informací, které jiným způsobem nejsou zjistitelné či měřitelné. Z tohoto důvodu mají stopovací experimenty nezastupitelnou roli při výzkumu či provozním řízení využití geotermálního horninového výměníku.

7. Použité zdroje

Adams M. C. (1985): Tracer stability and chemical changes in an injected geothermal fluid during injection-backflow testing at the East Mesa geothermal field. Proceedings of the Tenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, pp. 247-252.

Adams M. C., Benoit W. R., Bodvarsson G. S., Moore J. N. (1989): The Dixie Valley, Nevada tracer test. Geothermal Resources Council Trans. 13, 215-220.

Adams M. C., Moore J. N., Fabry L. G., Ahn J. H. (1992): Thermal stabilities of aromatic acids as geothermal tracers. Geothermics, 21 (3), 323-339.

Axelsson G., Flovenz F. O., Hauksdottir S., Hjartarson A., Liu J. (2001): Analysis of tracer test data, and injection-induced cooling, in the Laugaland geothermal field, N-Iceland. Geothermics 30, 697–725, [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(01\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(01)00026-8).

Axelsson G., Björnsson G., Montalvo F. (2005): Quantitative interpretation of tracer test data. In: World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24–29.

Ayling B. F., Hogarth R. A., Rose P. E. (2016): Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia. Geothermics, 63, 15-26.

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.03.008>.

Bear J., de Marsily G., Tsang C.-F. (1993): Preface. In: Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. Academic Press, Pages xi-xii. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-083980-3.50004-8>.

Bjørnstad T., Maggio G. M. (2002): Radiotracer Applications in Industrial Processing, Oil & Geothermal Reservoirs. Intl. Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

Blavoux, B., Lachassagne, P., Henriot, A., Ladouche, B., Marc, V., Beley, J.J., Nicoud, G., Olive, P. (2013): A fifty-year chronicle of tritium data for characterising the functioning of the Evian and Thonon (France) glacial aquifers. *J. Hydrol* 494, 116–133.

Chatterjee S., Sinha U.K., Ansari M. A., Mohokar H.V., Ashutosh D. (2018): Application of lumped parameter model to estimate mean transit time (MTT) of the thermal water using environmental tracer (3H): Insight from uttarakhand geothermal area (India), *Applied Geochemistry*, Volume 94, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.04.013>

Batchelor A. S. (1986): Reservoir behaviour in a stimulated hot dry rock system. *Proceedings of the Eleventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, pp. 35-41.

Bruce A. Robinson B. A, Tester J. W. (1990): Kinetics of alkaline hydrolysis of organic esters and amides in neutrally-buffered solution. *Int. J. of Chem. Kinetics*, 22 (5), 431 – 448. <https://doi.org/10.1002/kin.550220502>.

Dole R. B. (1906): Use of fluorescein in the study of underground waters. *Underground-water papers*, 73-85.

Egert R., Korzani M.G., Held S, Kohl T. (2020): Implications on large-scale flow of the fractured EGS reservoir Soultz inferred from hydraulic data and tracer experiments, *Geothermics*, Volume 84, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101749>.

Fukuda D., Kuwano T., Itoia R. (2018): Estimation of the steam fraction of injected water at the Matsukawa vapordominated geothermal field using two-component, two-phase tracers. *Geothermics*, 71, 167–177.

Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C. (2008): Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37 (1), 27-40.

Gudmundsson J. S., Johnson S. E., Home R. N., Jackson P. B., Culver G. G. (1983): Doublet tracer testing in Klamath Falls, Oregon. *Proceedings of the Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, pp. 331-337.

Hirtz P., Lovekin J., Copp J., Buck C., Adams M. (1993): Enthalpy and mass flow rate measurements for two-phase geothermal production by tracer dilution techniques. *Proc. Eighteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford Geothermal Program, Stanford University.

Hirtz P. N., Kunzmana R. J., Broaddus M. L., Barbitaa J. A. (2001): Developments in tracer flow testing for geothermal production engineering *Geothermics* 30, 727–745.

Chatterjee S., Gusyev M. A, Sinha U. K, Mohokar H. V., Dash A (2019): Understanding water circulation with tritium tracer in the Tural-Rajwadi geothermal area, India, *Applied Geochemistry*, Volume 109, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104373>.

Cheng W., Kuo T., Su C., Chen C., Fan K., Liang H., Han Y. (2010): Evaluation of natural recharge of Chingshui geothermal reservoir using tritium as a tracer, *Radiation Measurements*, Volume 45, Issue 1, Pages 110-117, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.08.002>.

Javandel I., Doughty C., Tsang C.-F. (1984): *Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models*. Water Res. Monograph 10, American Geophysical Union, Washington D. C.

Kitaoka K. (1990): Water circulation rates in a geothermal field: a study of tritium in the Beppu hydrothermal system, Japan, *Geothermics*, Volume 19, Issue 6, 1990, Pages 515-539, [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(90\)90003-T](https://doi.org/10.1016/0375-6505(90)90003-T)

Kluge, T., Riechelmann, D.F.C., Wieser, M., Spötl, C., Sültenfuß, J., Schröder-Ritzrau, A., Niggemann, S., Aeschbach-Hertig, A. (2010): Dating cave drip water by tritium. *J. Hydrol* 394 (3–4), 396–406.

Kumagai N., Tanaka T., Kitao K. (2004): Characterization of geothermal fluid flows at Sumikawa geothermal area, Japan, using two types of tracers and an improved multi-path model, *Geothermics*, 2004, 33, (3), 257-275. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.08.010>.

Le Lous M., Larroque F., Dupuy A., Moignard A. (2015): Thermal performance of a deep borehole heat exchanger: Insights from a synthetic coupled heat and flow model. *Geothermics*, 57, 157-172.

Malik D., Abidin Z., Pramono B. (2020): Tritium tracer Injection test at Wayang Windu Geothermal Field, West Java, Indonesia. *Geothermics*, 83, 101718. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101718>.

Maxfield B. T., Ginosar D. M., McMurtrey R. D., Rollins H. W., Shook G. M. (2005): The effect of moisture content on retention of fluorocarbon tracers on sand. *Geothermics*, 34 (1), 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2004.06.003>.

Nottebohm M., Licha T., Sauter M., 2012. Tracer design for tracking thermal fronts in geothermal reservoirs. *Geothermics* 43, 37–44.

PetroWiki (2013): Tracer testing in geothermal reservoirs

[http://petrowiki.org/Tracer testing in geothermal reservoirs](http://petrowiki.org/Tracer_testing_in_geothermal_reservoirs), 18.5.2020

[https://petrowiki.org/Tracer testing in geothermal reservoirs](https://petrowiki.org/Tracer_testing_in_geothermal_reservoirs)

[https://petrowiki.org/Well to well tracer tests](https://petrowiki.org/Well_to_well_tracer_tests)

[https://openei.org/wiki/Tracer Testing](https://openei.org/wiki/Tracer_Testing)

Qiu X., Wanga Y., Wanga Z., Regenauer-Lieb K., Zhanga K., Liua J. (2018): Determining the origin, circulation path and residence time of geothermal groundwater using multiple isotopic techniques in the Heyuan Fault Zone of Southern China. *Journal of Hydrology* 567, 339–350.

Radilla G., Sausse J., Sanjuan B., Fourar M. (2012): Interpreting tracer tests in the enhanced geothermal system (EGS) of Soultz-sous-Forêts using the equivalent stratified medium approach. *Geothermics* 44, 43– 51.

Reed M. J. (2007): An investigation of the Dixie Valley geothermal field, Nevada, using temporal moment analysis of tracer tests. In: *Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*; Stanford University, California.

Reimus P., Caporuscio F., Marina O., Janney D. (2020): Field demonstration of the combined use of thermally-degrading and cationexchanging tracers to predict thermal drawdown in a geothermal reservoir. *Geothermics* 83, 101712.

Redden G., Stone M., Wright K. E., Mattson E., Palmer C. D., Rollins H., Harrup M., Hull L. C. (2010): Tracers for characterizing enhanced geothermal systems. In: *Proc of thirty-fifth workshop on geothermal reservoir engineering*. Stanford University.

Rose P.E., Benoit W.R., Adams M.C. (1998): Tracer Testing at Dixie Valley, Nevada, Using Pyrene Tetrasulfonate Amino G, and Fluorescein. *Geothermal Resources Council Transactions*.

Rose P. E., Johnson S. D., Kilbourn P. (2001): Tracer Testing at Dixie Valley, Nevada, Using 2-Naphthalene Sulfonate and 2,7-Naphthalene Disulfonate. In: *Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* Stanford University.

Sanjuan B., Pinault J.-L., Rose P., Gérard A., Brach M., Braibant G., Crouzet C., Foucher J.-C., Gautier A., Touzelet S. (2006): Tracer testing of the geothermal heat exchanger at Soultz-sous-Forêts (France) between 2000 and 2005. *Geothermics*, 35 (5–6), 622-653.

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.09.007>.

- Schaffer M., Idzik K. R., Wilke M., Licha T. (2016): Amides as thermo-sensitive tracers for investigating the thermal state of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 64, 180–186.
- Smart. P. L., Laidlaw E. M. S. (1977): An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resources* 13, 15-33.
- Stefánsson A., Arnórsson S., Sveinbjörnsdóttir Á, E., Heinemaier J., Kristmannsdóttir H. (2019): Isotope (δD , $\delta^{18}O$, $3H$, $\delta^{13}C$, ^{14}C) and chemical (B, Cl) Constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water. *Applied Geochemistry* 108, 104380.
- Tang Y. (2013): Novel multidimensional tracers for geothermal inter- well diagnostics. U. S. Department of Energy Geothermal Technologies Office 2013 Peer Review. Colorado.
- Tester J. W., Robinson B. A., Ferguson J. H. (1986): Inert and reacting tracers for reservoir sizing in fractured, hot dry rock systems. *Proceedings Of the Eleventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, pp. 149-159.
- Upstill-Goddard R. C., Wilkins C. S. (1995): The potential of SF₆ as a geothermal tracer. *Wat. Res.* Vol. 29, No. 4, pp. 1065—1068.
- Urbino M. E. G., Zaide M. C., Malate R. C. M., Bueza E. L. (1986): Structural flow paths of reinjected fluids based on tracer tests - Palinpinon I, Philippines. *Proceedings Of the Eighth New Zealand Geothermal Workshop*, pp. 53-58.
- Yoshida K. (1980): Hatchobaru geothermal power plant. *Chinetsu Enerugii* 15, 23-25 (japonsky).
- Wood K.N., Lai F.S., Heacock D.W. (1993): Water Tracing Enhances Miscible Pilot. *SPE Form Eval* 8 (1): 65–70. SPE-19642-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/19642-PA>.