



# KRYCÍ LIST – VÝSTUPY

Název výstupu	Metodika přesné teplotní karotáže a teplotního monitoringu v hlubokých vrtech při využití moderních technologií měření (např. DTS)
Výzkumný program	Tepelný tok a teplotní podmínky v zemské kůře
Partner/partneři	Geofyzikální ústav AV
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





### Obsah

1	Cíle metodiky		
2	Úv	rod	3
3	Tep	Teplotní karotáž a monitoring pomocí teplotních čidel	
	3.1 Teplotní čidla		4
	3.1	.1 Kalibrace teplotních čidel	4
3.2 Teplotní karotáž		Teplotní karotáž	5
3.2.1		2.1 Limity dané fyzikálními podmínkami ve vrtu	6
	3.2	2.2 Aparatura pro teplotní karotáž	7
	3.2	2.3 Bodová teplotní karotáž	8
	3.2	2.4 Kontinuální teplotní karotáž	9
	3.3	Teplotní monitoring pomocí čidel1	0
4	Тер	Teplotní monitoring pomocí optického kabelu1	
	4.1	4.1 Kalibrace aparatury	
	4.2	Stabilita systému 1	4
	4.3	Ukázkové měření systémem DTS1	4
5	Záv	věr 1	6
6	Použitá literatura1		7





### 1 Cíle metodiky

Důvodem pro vypracování této metodiky bylo jednak předat dlouholeté zkušenosti pracovníků geotermického oddělení Geofyzikálního ústavu s prováděním přesné teplotní karotáže a dlouhodobým teplotním monitoringem ve vrtech a pak také provést porovnání těchto ověřených metod s progresivní metodou teplotního monitoringu pomocí optického vlákna systémem DTS (Distributed Temperature Sensing). Toto porovnání bylo umožněno díky nákupu systému DTS v rámci projektu RINGEN.

# 2 Úvod

Nutnost přesných teplotních měření ve vrtech vyvstala v 60. letech minulého století, kdy se naplno rozběhlo studium hustoty zemského tepelného toku (Čermák, V. 1967), jehož hodnota je dána součinem tepelné vodivosti horniny a teplotního gradientu ve vrtu. Od té doby byly provedeny pracovníky geotermického oddělení stovky teplotních měření ve vrtech po celém světě. Stejně tak disponují pracovníci geotermického oddělení bohatými zkušenostmi s dlouhodobým teplotním monitoringem ve vrtech, přičemž nejdelší teplotní řada je z cca 38 m hlubokého vrtu v areálu GFÚ, kde začal monitoring v roce 1993. Kromě této stanice probíhá teplotní monitoring ještě na několika dalších místech v ČR a ve spolupráci se zahraničními kolegy také ve Slovinsku a v Portugalsku.

# 3 Teplotní karotáž a monitoring pomocí teplotních čidel

Měření teploty ve vrtech pomocí teplotních čidel je dlouhodobě používaný a dobře známý způsob získávaní informací o teplotním poli horninového masivu. Teplotní karotáž je metodou dynamickou, při které dochází ke spouštění teplotního čidla do vrtu. Naopak





monitoring je většinou dlouhodobé měření jedním, či více čidly upevněnými v určité hloubce ve vrtu.

# 3.1 Teplotní čidla

Nejčastěji používaná čidla můžeme rozdělit na polovodičová (termistory) a kovová (nejčastěji platina, nikl). Výhodou termistorů je značná citlivost díky jejich vysokému odporu. Je proto možné měřit odpor dvouvodičovým kabelem na vzdálenost několika km, aniž by došlo k výraznému poklesu přesnosti měření. Nevýhodou je pak ale exponenciální závislost změny odporu na teplotě (viz. Obr. 1), což komplikuje kalibraci a s rostoucím teplotním intervalem klesá přesnost měření. Hlavní nevýhodou je však možná časová nestabilita, tzv. stárnutí, nebo drift termistorů, kdy u některých termistorů dochází v čase ke kontinuálnímu odklonu od jejich kalibrační křivky. Pro dlouhodobý teplotní monitoring termistory je tak vhodné používat dvojice čidel.

Nejčastěji používanými kovovými čidly jsou platinová čidla o odporech 100 a 1000 ohmů (Pt100 a Pt1000). Jejich výhodou je lineární závislost odporu na změně teploty a také dlouhodobá časová stabilita. Kalibrace čidel je jednoduchá a vzhledem k linearitě ji není třeba provádět pro různé teplotní intervaly. Nevýhodou kovových čidel je jejich relativně nízký odpor a tudíž je nutno provádět kompenzaci odporu kabelu. Proto musí kabel obsahovat čtyři vodiče. I přes tuto kompenzaci by neměl být kabel příliš dlouhý, aby vlivem šumu nedocházelo ke zhoršování přesnosti měření. Použitelná délka kabelu závisí na požadované přesnosti a prostředí, ve kterém se kabel nachází. Ze zkušeností s instalacemi v projektech geotermického oddělení GFU lze konstatovat, že lze bez problému měřit na vzdálenosti prvních desítek metrů. V případě, kdy se datalogger nachází ve větší vzdálenosti, je vhodné použít převodník signálu.

#### 3.1.1 Kalibrace teplotních čidel

Kalibrace celého měřícího systému je nutná pro získávání relevantních teplotních dat a jejich následnou správnou interpretaci. Je třeba si uvědomit, že vyšší požadovaná přesnost s sebou nese vyšší finanční nároky na samotné měřící zařízení i na jeho kalibraci. Kalibrační laboratoř GFU disponuje špičkovým vybavením pro přesnou kalibraci teplotních čidel a měřících aparatur. Její součástí jsou zejména míchaná kapalinová lázeň





pro kalibraci teploměrů a teplotních čidel (ISOTECH Hydra 798), bloková kalibrační pec (ASL B140), míchané kapalinové lázně, etalonový elektronický teploměr (ASL F150), digitální multimetry (KEITHLEY,HP,KEYSIGH) s přepínači měřících míst, přesné odporové normály (MEATEST) a zejména pak vysoce přesné a stabilní etalony ITS-90 - kyvety trojného bodu vody a Galia (ISOTECH).

Veškeré měřící aparatury, či teplotní čidla jsou před instalací kalibrovány. V případě čidel pro teplotní karotáž dochází ke kalibraci jedenkrát za rok.



Obr. 1. Kalibrační křivka termistoru

#### 3.2 Teplotní karotáž

Teplotní karotáž, neboli teplotní měření ve vrtu, je standardní karotážní metodou používanou pro popis teplotního pole ve vrtu. Jejím principem je spouštění teplotního čidla do vrtu a následný záznam odporu/teploty v jednotlivých hloubkových úrovních.





#### 3.2.1 Limity dané fyzikálními podmínkami ve vrtu

Při teplotní karotáži a její interpretaci je potřeba zohlednit řadu fyzikálních faktorů, které ovlivňují naměřenou teplotu a její vztah k neporušené teplotě v hornině před vyvrtáním vrtu, jejíž co nejlepší odhad je ve většině případů hlavním cílem měření. Zde je potřeba zmínit zejména

#### Vliv vrtání a cirkulace výplachu

Porušení teploty během vrtání a její ustalování po ukončení vrtných prací závisí zejména na délce vrtání. V případě vrtů hlubokých stovky metrů trvá ustalování několik týdnů, v případě vrtů hlubokých kilometr a více řadu měsíců či let (Haenel et al. 2012). Obecně platí, že gradient teploty se ustaluje rychleji než teplota samotná.

#### <u>Náplň vrtu</u>

Většina vrtů s výjimkou aridních oblastí bývá od několika metrů až desítek metrů zaplněna vodou. Díky menší náchylnosti vody ke konvekci odpovídá její teplota v dané hloubce teplotě okolní horniny, a díky její velké tepelné kapacitě a dostatečné vodivosti se teplota karotážní sondy rychle ustaluje a ovlivňuje minimálně teplotu vody. Jinak je tomu v části vrtu vyplněné vzduchem. Zde je vedle velké konvekce, která může vést za nepříznivých podmínek k výraznému rozdílu mezi původní teplotou horniny a teplotou vzduchu ve vrtu, hlavním problémem pomalé ustalování sondy. V našich experimentech se osvědčil postup, kdy teplotní karotáž ve vzduchu je prováděna jak při spouštění, tak při vytahování sondy. Porovnáním obou karotážních křivek je pak možné odhadnout chybu měření.

#### Konvekce ve vrtu

Přirozená konvekce vody ve vrtu je vyvolávána nestabilním rozložením její hustoty v úsecích, kde teplota vzrůstá s hloubkou, což se děje v naprosté většině případů. Intenzita konvekce vzrůstá lineárně s rostoucím gradientem teploty a se čtvrtou mocninou průměru vrtu (Haenel et al. 2012). Existence konvekce způsobuje, že teplota v dané hloubce kolísá v čase s amplitudou několika tisícin až prvních setin stupně (Bodri et al., 2008; Čermák et al., 2008a; 2008b; 2008c). Tento stupeň neurčitosti a proměnlivosti teploty v dané





hloubce je potřeba mít na paměti při interpretaci karotážních křivek a z nich spočteného teplotního gradientu.

#### Vliv zapažení vrtu

Obecně nemá zapažení vrtu prakticky žádný vliv na rozložení teploty v něm. Pokud je průměr pažnice významně menší než původní průměr vrtu, snižuje se tím tendence k přirozené konvekci vody ve vrtu. Při řešení projektu RINGEN byl zaznamenán zajímavý jev související s perforací pažnice ve vrtu PVGT-LT1 Litoměřice (Šafanda et al., 2020). V hloubce pod 1600 m byla teplotní křivka (obr.2) ovlivněna perforací středové ocelové pažnice o vnějším/vnitřním průměru 80/67 mm při průměru vrtu 152 mm. Pažnice byla perforována v úseku 1600 – 1700 m svislými zářezy délky 10-12 cm a šířky 3 mm. Pravděpodobné vysvětlení tvaru teplotní křivky je zvýšená konvekce vody/výplachu v důsledku výrazného zvětšení efektivního průměru vrtu v perforovaném úseku, kdy pažnice hydraulicky nerozděluje vrt na válec uvnitř pažnice a vnější meziválec a tendence k volné konvekci ve vrtu hnané archimédovskou vztlakovou silou výrazně vzrůstá. Tento předpoklad byl potvrzen teplotní karotáží vrtu v roce 2020, která se uskutečnila 8 měsíců po odstranění pažnice (obr.2). Tím byla vyvrácena alternativní hypotéza o původu anomálie, kdy byla anomálie spojována s prouděním vody v hypotetické puklinové zóně protnuté vrtem.

#### 3.2.2 Aparatura pro teplotní karotáž

Během samotného měření je třeba zaznamenávat jednak teplotu v daném místě měření a také hloubku, ve které se čidlo nachází. Nejběžnějším způsobem je použití kabelu, na jehož konci je termistor a dochází k přímému odečtu hodnot odporu/teploty na povrchu v průběhu měření. Dalším způsobem je použití autonomní sondy (teplotní čidlo + datalogger), kdy je teplota zaznamenávána s určitým časovým krokem a obsluha zařízení nemá přehled o jejích změnách. V obou případech je hloubka zaznamenávána pomocí kladky vybavené elektronickým snímačem otáček.

Na pracovišti geotermického oddělení GFÚ je v posledních letech používána komerčně vyráběná autonomní sondy Antares (ANTARES Datensysteme GmbH), které jsou po nastartování, synchronizaci času s řídícím počítačem a volbou intervalu měření (minimum je 1 sekunda) spouštěny do vrtu přes kladku na ocelovém lanku bez přenosu





signálu a bez elektronického spojení s povrchem. Výhodou je malá hmotnost sondy i lanka a tudíž snadný transport a přenositelnost karotážní soupravy. Nevýhodou byla špatná kontrola pohybu sondy ve vrtu, kdy nebylo možné jednoduše zjistit, že sonda uvízla ve vrtu před dosažením jeho dna. Ve většině takových případů lanko svojí váhou klesalo do vrtu, otáčelo kladkou a způsobovalo zdánlivé zvětšování hloubky sondy, zatímco ve skutečnosti povolené lanko vytvářelo ve vrtu "závity", popřípadě smyčky, které hrozily při vytahování přetrhnutím lanka a ztrátou sondy. Tento nedostatek byl odstraněn během řešení projektu navržením, konstrukcí, instalací a úspěšným odzkoušením systému měření tahu lanka na kladku. Aktuální velikost a časové změny tahu lanka jsou během karotáže zobrazovány na obrazovce řídícího počítače a uvíznutí sondy je možné okamžitě detekovat.



Obr. 2. Teplotní profily získané opakovanými karotážemi vrtu PVGT-LT-1 v úseku 1400 – 1800 m. Teplotní anomálie pozorovaná v úseku perforované pažnice 166 – 1700 m vymizela po odstranění pažnice v roce 2019.

#### 3.2.3 Bodová teplotní karotáž

Principem bodové teplotní karotáže je postupné spouštění sondy do vrtu s tím, že v požadovaných hloubkových úrovních se určitý čas čeká, aby došlo k ustálení sondy. Čím je sonda menší, tím je třeba k ustálení kratšího času. V případě sondy Antares





dochází k ustálení během několika sekund (obr. 3) a proto je dostatečným časem pro reprezentativní změření teploty přibližně jedna minuta. Z teplotního záznamu je pak použita hodnota těsně před započetím dalšího posunu sondy (červené body v obrázku 3)



Obrázek 3. Ukázka bodového měření sondou Antares (červeně vyznačena část záznamu s ustálenou teplotou)

#### 3.2.4 Kontinuální teplotní karotáž

Při kontinuálním spouštění je teplota měřená v dané hloubce nižší (při vzrůstu teploty s hloubkou) než skutečná teplota okolní vody. Tento rozdíl je funkcí odezvy sondy na skokovou změnu teploty, rychlosti spouštění a gradientu teploty (Conaway, 1977). K nalezení optimální rychlosti kontinuálního měření byly provedeny opakované karotáže vrtu PVGT-LT-1 s rychlostí spouštění 5 m/min, 15 m/min a 30 m/min (obr.2 a 3). Při vzorkovací frekvenci měření teploty 1 sekunda odpovídají tyto rychlosti spouštění hloubkovému kroku měření 8.3 cm, respektive 25 cm a 50 cm. Při typickém gradientu teploty 0.025 K/m se na těchto intervalech mění teplota o 0.002 K, respektive 0.006 K a 0.012 K. Při nejpomalejší uvažované rychlosti spouštění 5 m/min se očekávaná změna teploty mezi dvěma sousedními měřeními pohybuje na hranici citlivosti sondy a odhad





rozdílu skutečné a naměřené teploty (Conaway, 1977) činí 0.01 až 0.02 K. Naměřené teplotní profily ukazují, že při nejrychlejším spouštění se sonda v oblasti lokálního minima teploty v hloubce kolem 40 m nestačí ochladit tak, jako při pomalejším spouštění (obr.4) a v důsledku toho je naměřená teplota vyšší i v následujících několika desítkách metrů. Po vymizení tohoto efektu je relativní poloha všech tří křivek již v souladu s očekáváním (obr.5). Tedy, že (při vzrůstající teplotě s hloubkou) naměřená teplota klesá v dané hloubce s rostoucí rychlostí spouštění.



Obr.4 Teplotní profily naměřené ve vrtu PVGT-LT-1 v okolí lokálního minima teploty v hloubce kolem 40 m při kontinuálním spouštění sondy různými rychlostmi.

#### 3.3 Teplotní monitoring pomocí čidel

Teplotní monitoring v horninovém masivu lze provádět různými způsoby a vždy je třeba optimalizovat daný postup pro konkrétní úlohu. V případě lokálního monitoringu si vystačíme s multikanálovým záznamníkem dat, v případě monitoringu většího rozsahu, či nutnosti přenosu dat na větší vzdálenosti, je pak vhodné použít převodníky spojené se záznamníkem dat. Před instalací teplotního řetězce do vrtu je vždy třeba provést kalibraci celého systému. K tomuto účelu má geotermické oddělení k dispozici špičkově





vybavenou kalibrační laboratoř s kalibrační lázní, do které je možné vložit celý teplotní řetězec. Na obrázku 5 je ukázka teplotního záznamu z půdy z observatoře GFÚ v Praze na Spořilově. Je zde vidět útlum denních variací teploty do hloubky, kdy v hloubce 0,5m již nejsou tyto variace okem viditelné.



Obr. 5. Ukázka teplotního monitoringu v půdě na jaře 2016 v observatoři GFÚ v Praze

# 4 Teplotní monitoring pomocí optického kabelu

Systém DTS (Distributed temperature sensing) je relativně mladou metodou teplotního monitoringu založenou na vysílání krátkých světelných impulsů v řádu nanosekund do optického vlákna a zpětné detekci odraženého rozptýleného světla. Zde se využívá závislosti intenzity záření určité vlnové délky (Ramanův rozptyl) na teplotě prostředí (obr. 6), ze kterého došlo k odrazu paprsku. Celé zařízení tak sestává z jednotky, která vysílá, přijímá a zpracovává signál do připojeného optického kabelu. Absolutní přesnost měření se pohybuje v řádu prvních desetin stupně Celsia a rozlišení může být až o dva řády lepší, přičemž ale jak přesnost, tak rozlišení záleží na délce připojeného kabelu a časovém kroku měření. V současné době lze k jednotce připojit až desítky km optického kabelu, přičemž na trhu jsou kabely s různou mírou odolnosti. Geotermické oddělení GFU zakoupilo v rámci projektu RINGEN na konci roku 2018 měřící jednotku Sentinel firmy





Sensornet. Postupně pak bylo dokoupeno několik odolných optických kabelů různých délek (200 m až 2km). Jedná se o kabely mechanicky odolné, kdy je optické vlákno chráněno ocelovou trubičkou a také ocelovým opletením (viz. Obr. 7). Takto konstruovaný kabel je samonosný a lze ho do vrtu volně zavěsit.



Obr. 6. Vlnové spektrum odraženého světelného signálu (zdroj: www.apsensing.com).



Obr. 7. Průřez vysoce odolného optického kabelu





#### 4.1 Kalibrace aparatury

Kalibrace aparatury se provádí před začátke měření, přičemž lze korigovat jednak celkový teplotní ofset vlákna a pak také sklon teplotní křivky. Je proto vhodné pro kalibraci znát přesnou teplotu na dvou místech vlákna. Výhodou je to, že lze provést kalibraci také zpětně až po skončení měření. Tento případ nastává ve chvíli, kdy máme například ve vrtu spolu s optickým vláknem zavěšený teplotní záznamník a data z něho získáme až po skončení měření. Na obrázku 8 je schéma aparatury použité pro měření ve vrtu PVGT-LT-1 v únoru 2020. V blízkosti jednotky Sentinel byl umístěn izotermický kalibrační box, ve kterém bylo smotáno 15 m kabelu a bylo zde také umístěno čidlo přesného kalibračního teploměru. Po spuštění optického kabelu do vrtu, byla do hloubky 30 m spuštěna sonda Antares. Výstu z této sondy a z kalibračního teploměru byl použit pro kalibraci optického vlákna. Je samozřejmé, že čím hlouběji do vrtu by byla sonda spuštěna a tím se zvětšila vzdálenost mezi kalibračními čidly, byla by kalibrace přesnější.



Obr. 8. Schéma měřícího systému, na fotografii pohled do kalibračního termoboxu





#### 4.2 Stabilita systému

Na obrázku 9 je zobrazeno porovnání měření optickým vláknem a sondou Antares v hloubce 162 m v nově vyvrtaném vrtu v centru RINGEN. V tomto případě probíhalo měření systémem DTS s krokem 4 hodiny. Je evidentní, že výstup sondy Antares je mnohem stabilnější a přesnost měření je podstatně vyšší. Tato informace ale není vzhledem k uváděné přesnosti měření systémem DTS nijak překvapivá. Nicméně až na pár výjimek je rozdíl naměřených teplot menší než 0,1°C, což je vzhledem k nesporným výhodám systému DTS akceptovatelné.



Obr. 9. Porovnání měření systémem DTS a sondou Antares

#### 4.3 Ukázkové měření systémem DTS

Na konci ledna 2020 proběhly ve vrtu PVGT-LT-1 hydraulické testy, kdy byla do vrtu vháněna voda pod tlakem maximálně 40 bar. Po celou dobu testů byl do vrtu až do hloubky 1610 m instalován a ve zhlaví vrtu tlakově utěsněn optický kabel. Po celou dobu testů a následné dva měsíce probíhal nepřetržitý teplotní monitoring nejprve s časovým





krokem 30 minut a později, kdy ve vrtu neprobíhaly žádné dynamické děje s krokem 4 hodiny. V sobotu 25.1. večer se podařilo mezi hloubkou 880 a 890 m aktivovat puklinu v horninovém masivu, kterou začala odtékat voda vháněná do vrtu. Na obrázku 10 je teplotní záznam z neděle 26.1., kde je jasně vidět prochlazování vrtu nad otevřenou puklinou díky chladné vodě na vstupu do vrtu. Stajně tak je na obrázku 11 patrná zpětná relaxace vrtu po skončení hydraulických testů. Ve 21 hod. bylo zastaveno pumpování vody do vrtu a vrt byl ponechán cca hodinu pod tlakem. Na teplotních křivkách v kroužku je tak patrná dominance konduktivního přenosu tepla z okolní horniny. Poté co byl vrt otevřen dochází ke skokovému konvektivnímu oteplení.



Obr. 10. Ochlazování vrtu na otevřenou puklinou během hydraulických testů



Obr. 11. Zpětné oteplování vrtu po skončení hydraulických testů

# 5 Závěr

Předkládaná metodika zevrubně popisuje výhody, nevýhody a úskalí jednotlivých způsobů teplotních měření ve vrtech. Přesná teplotní karotáž, či teplotní monitoring pomocí teplotních čidel jsou díky své vysoké přesnosti předurčeny ke sledování detailních změn teplotního pole v horninovém masivu. Na druhou stranu měření pomocí systému DTS, kdy je možné opakovaně v krátkých časových krocích proměřovat celý teplotní profil vrtu, přináší i přes svou nižší přesnost velké výhody při sledování dynamických změn teplotního pole.





### 6 Použitá literatura

L.Bodri, V.Čermák and J.Šafanda: Thermal instability of the fluid column in a borehole, application to the Yaxcopoil hole. Geophys.Res.Abstr., Vol.10, 2008, EGU General Assembly 2008, 1607-7962/gra/EGU2008-A-03371, Wien, April 13-18, 2008.

J.Conaway: Deconvolution of temperature gradient logs. Geophysics, 42 (4), 1977, 823 – 837.

Čermák, V.: Results of geothermic investigation of heat flow in Czechoslovakia in 1964– 1966. Stud. Geophys. Geod. 11, 342–344 (1967a)

V.Čermák, L.Bodri and J.Šafanda: Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? Part II. Theory and interpretation. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 97, doi: 10.1007/s00531-007-0250-7, 375-384, 2008a.

V.Čermák, J.Šafanda and L. Bodri: Precise temperature monitoring in boreholes: Evidence for oscillatory convection? Part 1. Experiments and field data. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 97, doi: 10.1007/s00531-007-0237-4, 365-373, 2008b.

V.Čermák, J.Šafanda and M.Krešl: Intrahole-fluid convection: high-resolution temperature time monitoring, J.Hydrol., 348, 2008c, DOI:10.1016/j.hydrol.2007.10.016, 464-479.

R. Haenel, L. Stegena, Ladislaus Rybach (Eds): Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination: with Guidelines and Recommendations of the International Heat Flow Commission, Springer Science & Business Media, 2012, 486 stran.

J.Šafanda, K.Verner, J.Franěk, V.Peřestý, J.Holeček, T.Fischer: Geology and geothermal potential in the eastern flank of Eger Rift (Litoměřice area, Czech Republic), Geothermics, 86, 2020, doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101808.