

## **Oponentský posudek k diplomové práci Bc.Lucie Čákové:**

### **„Specification of the geothermic model in the environs of several selected boreholes“**

#### **(Zpřesnění geotermického modelu v okolí několika vybraných vrtů)**

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou zemského tepla ve svrchní části zemské kůry a potenciálu jeho využití se zaměřením na tři lokality: Litoměřice, Semily a Liberec. Autorka se pokusila o hledání souvislostí mezi teplotním polem a jeho principů a tektonikou, geologickou stavbou i hydrogeologickými poměry v horninovém masívu.

Práce je psána v anglickém jazyce.

Diplomová práce je rozdělena do několika kapitol, které na sebe logicky navazují.

Hodnocena je každá kapitola zvlášť včetně kritických poznámek, na závěr jsem se pokusil o celkové zhodnocení.

První poznámka se týká úplného začátku diplomové práce. Již v abstraktu je zmíněn jeden ze závěrů této práce o nadějnosti lokality Semily z hlediska vhodnosti pro využití geotermální energie, což, jak se budu snažit vysvětlit dále v textu, není zcela jisté. Mimo to bych poznámku tohoto charakteru zařadil do závěru.

Rovněž bych poprosil autorku o vysvětlení výrazu pro lokality Liberec a Litoměřice o cituji: „případu méně vyhovující kombinace tepelného toku a podložních hornin v žádané hloubce“.

Souhlasím s autorkou, že všechny modely jsou zatíženy značnou nejistotou způsobenou nedostatkem relevantních informací.

V seznamu obrázků se někde objevují kromě jejich popisu i komentáře k těmto obrázkům. Podle mého názoru komentáře k obrázkům patří až k textu.

V úvodu autorka vymezuje hlavní záměr práce, kterým je posouzení vhodnosti lokalit z hlediska využití suchého zemského tepla (HDR), a stručně shrnuje historii využívání této geotermální energie. Informuje o již existujících projektech HDR v Evropě.

Při zmínce o jednotlivých, již realizovaných projektech využití suchého tepla hornin jsou v práci uvedeny u projektu ve Velké Británii (Cornwall) teplotní parametry, tepelný tok a plánovaná životnost projektu 25 let. Není však zmíněn další důležitý údaj: objem horniny, která měla být využita po tuto dobu jako výměník tepla a která by zaručovala takto dlouhou dobu provozu.

U zmínky o projektu ve Francii (Soultz-sous-Forets) není uveden údaj o horninovém prostředí.

Autorka zmiňuje také první projekty týkající se využití suchého tepla hornin v České republice. V této souvislosti s tím bych se chtěl zeptat autorky, zda byl nějaký další důvod pozastavení projektu v Litoměřicích kromě finančního. Odpověď ostatně vyplývá i z kapitoly věnované této lokalitě, konkrétně geologii. Mimo toho se domnívám, že tento projekt, jehož jsem se osobně aktivně zúčastnil, nepřinesl více odpovědí než otázek. Ale to autorka bez osobní zkušenosti nemůže vědět.

Potenciálem geotermální energie v ČR se v minulosti zabývali i další autoři. Zajímavá je z tohoto hlediska i práce kolektivu autorů pod vedením doc.T.Pačese (není uvedena).

V druhé kapitole se autorka věnuje teoretickým základům přenosu zemského tepla ve svrchní části zemské kůry včetně jeho různých aspektů.

Zvláštní podkapitola je věnována variabilitě tepelné vodivosti hornin. L.Čápková cituje autory, kteří se touto problematikou v minulosti zabývali. Prezentuje (s odkazy) závislosti mezi mineralogickým složením horniny a tepelnou vodivostí a mezi teplotou horniny a její tepelnou vodivostí. Tuto druhou závislost dokládá vlastními grafy (obrázek č.3).

Na tomto místě musím upozornit na graf porovnání závislosti mezi tepelnou vodivostí a teplotou pro tři různé typy hornin: metamorfované, kyselé a bazické. To je porovnání neporovnatelného. Metamorfované i vyvřelé horniny mohou být kyselé či bazické.

K textu na stránce č.9 mám dotaz, zda autorka zjišťovala, jestli uvádění autoři brali v potaz hlubinnou cirkulaci podzemních vod, která mívá na teplotu horninového masívu značný vliv? Nejen zmíněná vodonasyčenost, ale především proudění vody má na teplotu zásadní vliv. S radostí proto přijímám graf (obr.č.5), který tento vliv v základních rysech vyjadřuje.

Kritickou poznámku mám k vysvětlení vlivu nadmořské výšky na teplotní gradient. Autorka uvádí, že nižší nárůst teploty s hloubkou v horách je důsledkem větší vzdálenosti od zdroje tepla. To je omyl. Představme si metr silnou desku, kde tento metr reprezentuje 10 km zemské kůry. Deska je zespodu mírně a konstantně zahřívána, zatímco horní povrch desky je na vzduchu o teplotě blízké se průměrné roční teplotě v ČR. Po delší době, pokud bychom vyvrtali skrz tuto desku otvor a změřili v ní průběh teploty, dostaneme záznam rovnoměrně vzrůstající teploty směrem dolů. Představme si podobnou desku, jen o 10 cm vyšší (to představuje 1000 m vysoké hory) a stejný způsob jejího zahřívání. Bude se snad ve svrchních 10 cm teplotní gradient výrazně odlišovat? Jistě, že nikoliv. Nadmořská výška- vzdálenost od zdroje- tedy není příčinou sníženého teplotního gradientu, jak je uváděno. Představme si ale tutéž desku, jejíž horní část (například prvních 20 cm) je rozpraskaná- pukliny jsou propojené, na kterou občas prší nebo padá sníh. Voda infiltruje do těchto puklin, ochlazuje horní část desky a postupně směrem dolů se pomalu zahřívá. V drenážní oblasti vyvěrá –ohřátá- na povrch a mírně přitom zvyšuje i teplotu okolí. To je pravá příčina sníženého geotermického gradientu v horách a naopak zvýšeného v drenážních oblastech. Nevím, zda nesprávný závěr je dílem autorky diplomové práce, nebo zda byl převzat z literatury.

Sezónní variace teplot je znázorněna na obrázku č.8. Ve zkoumaném vrtu dosahuje do hloubky cca 10 m. Dotaz na autorku: domníváte se, že hloubkový dosah 10 m je v podmínkách ČR nejběžnější a pokud ne, jaký je obvyklý a proč?

V souvislosti s dalším textem bych se chtěl zeptat, jak by si vysvětlila, že v žulovém masívu v jihovýchodní části Švédska je geotermální gradient pouze 1,3 až 1,5°C na 100 metrů hloubky?

V závěru kapitoly kladně hodnotím to, jak autorka správně zdůraznila podmínky pro modelování teplotního pole. Dodávám, že bez znalosti proudění vody ve vrtu (z karotážní metody ředění označené kapaliny, v příznivých případech i průtokometrie) skutečně není možné žádné spolehlivé teplotní modely dělat.

V kapitola č.3 popisuje Lucie Čápková geologickou stavbu ČR se zaměřením na tři zájmové oblasti. Podle mého názoru je tato kapitola zbytečně rozsáhlá, ne úplně všude má souvislost s předmětem diplomové práce a nové poznatky nepřináší.

Obrázek č.12 je zcela nečitelný.

Těžištěm diplomové práce je kapitola č.4: „Geotermální průzkum v České republice“. Popisuje tři vybrané lokality: Litoměřice, Semily a Liberec.

Každá lokalita je zpracována podobným způsobem: geografická pozice a geologické souvislosti, výběr vrtů a jejich analýza.

Předem je nutno uvést, že vrty nebyly vybrány úplně šťastně. Jedná se většinou o vrty staré cca 40-50 let s tehdejšími teplotními záznamy bez garance, že měření probíhala za ustálených teplotních poměrů. Kromě toho bylo ve dvou lokalitách vybráno pouze po třech vrtech, ve třetí žádný, což je počet, který nemůže spolehlivě popsat teplotní pole v oblasti. Tuto diplomovou práci ale chápu jako snahu studentky o demonstraci způsobu zpracování dat a nikoliv jako věrohodnou informaci o teplotním poli v daných lokalitách.

Při popisu tektoniky v oblasti Litoměřic chybí mapa zlomů, které jsou v textu popsány. Tektonická mapa severní poloviny ČR je sice uvedena o několik stránek dál, ale není tam vyznačena lokalita. V mapě nejsou zdůrazněny lineamenty- hlubinné zlomy, které fungují jako cesty pro výstup zemského tepla. Ostatní zlomy jsou z hlediska výstupu zemského tepla podružné. Využití zemského tepla v Děčíně je uvedeno, není však uvedeno využívání zemského tepla v Ústí nad Labem a Brně, které jsou lokalitě Litoměřice blíže.

Co se týká výběru vrtů, existují v oblasti poměrně hluboké vrty mladšího data s kvalitními teplotními záznamy registrované za spolehlivě ustálených teplotních poměrů.

Průzkumný vrt GTPVLT-1 v Litoměřicích z r.2007 byl vrtán bezjádrově jen s několika kratičkými úseky vrtanými na jádro. Detailní litologický profil byl sestaven na základě karotážních měření prováděných pracovníky firmy Aquatest. V diplomové práci o této skutečnosti ale zmínka není. Ke škodě věci není zmíněno ani to, že v hloubce 904 m bylo zjištěno výrazné litologické rozhraní a že v úseku 900-970 m je hornina velmi silně tektonicky porušena. Jedná se pravděpodobně o jeden z hlavních zlomů Litoměřického zlomového pásma.

O existenci přetoku na vrtu rovněž není v práci žádná informace, přestože karotážní zpráva toto podrobně uvádí (přítok v hloubce cca 1600 m). Uvádí i změny vydatnosti a občasně zmizení přetoku, což se děje v závislosti se změnami atmosférického tlaku. Nepřímá zmínka o této skutečnosti je pouze v drobném textu uvnitř obrázku č.18 na str.24. Tento obrázek byl převzat od dr.Šafandy, který v popisu jednotlivých teplotních křivek zmiňuje, že jedno teplotní měření prováděné Aquatestem, je hloubkově posunuto o 5 m. Mimochodem, toto je v diplomové práci nejen jediná nepřímá zmínka o existenci přetoku, ale i o roli karotáže firmy Aquatest na celém projektu. Hloubkový posun je právě důsledkem přetoku. Po otevření vrtu v důsledku přetoku dochází k pomalému hloubkovému posunu křivek. Text v obrázku však výraz „přetok“ neuvádí.

V diplomové práci není uvedeno ani poslední teplotní měření ve vrtu, které bylo provedeno pracovníky firmy Aquatest v květnu roku 2012, tedy téměř pět let po dokončení vrtu, tentokrát za skutečně ustálených teplotních poměrů.

Z hlediska formálního je obrázek č.18 příliš malý a téměř nečitelný. Některé křivky nejsou vůbec vidět. Podobně to platí i o obrázku č.19.

Souhlasím s L.Čáповou, že úvahy o geologické stavbě do větší hloubky jsou skutečně jen úvahy, které nejsou většinou opřeny o žádné spolehlivé informace. Vrt GTPVLT-1 přinesl mnohá nepříjemná překvapení už do hloubky 2100 m.

Otázka na autorku diplomové práce k obrázku č.24: Proč se teplotní křivky ve všech modelech ve vrtu GTPVLT-1 lomí v hloubce cca 900 m?

Vhodnost lokality pro využívání suchého tepla hornin není založena jen na teplotě. V této souvislosti mám dotaz na autorku: „Proč by hydraulické štěpení staurolitických svorů pravděpodobně nepřineslo kýžený efekt?“

Při zpracování lokality Semily byly zařazeny rovněž staré vrty a stará teplotní měření. Drobná poznámka: v případě lokality Litoměřice jsou uváděny u vrtů data vrtání a měření, u lokality Semily nikoliv.

Vrt Pé-1 je nutno ze zpracování zcela vyřadit. Za prvé: teplota 5°C v hloubce 100 m není reálná v našich podmínkách. Za druhé: hodnoty na křivce diferenciální teploty oscilují v rozmezí 0,1°C až 1,3°C / 100 m. Jedná se tedy s vysokou pravděpodobností o měření za neustálených teplotních poměrů. Teplota měřená ve vrtu Pé-1 není věrným obrazem teploty v horninovém masívu a vrt je nutno ze zpracování vyloučit.

Ve vrtu KV-1 bylo zjištěno proudění vody. Namísto toho, aby byla provedena oprava křivky na proudění, byl celý úsek, v němž k intenzivnímu proudění dochází, ze zpracování vyloučen. Tím došlo k tomu, že byl do zpracování bez opravy zařazen úsek, v němž dochází k vyrovnávání teploty a možná i ke zbytkovému proudění v puklinových systémech (analogie viz obrázek č.5). Výsledkem je, že výsledný vypočtený gradient je vyšší než reálný. To přivedlo autorku k závěru o zvýšeném teplotním gradientu a i ke zvýšenému teplotnímu toku v této lokalitě. Pokud ale provedeme opravu na vliv proudění vody, dostaneme hodnotu blížíící se průměrnému gradientu a průměrnému tepelnému toku pro ČR v tomto vrtu ( $G = 2,55^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ). V nejbližším hlubokém vrtu KH-1 s relativně nízkou hodnotou tepelného toku, kde k žádnému proudění nedochází, byla interpretace snadnější.

Nepřesný způsob zpracování provedený v tomto jediném vrtu Kv-1 vede pak k názoru o nadějně, zvýšené hodnotě tepelného toku pro oblast Semily. I zde je nutno podotknout, že chybu lze částečně omluvit, neboť studentka nemá zkušenosti s podobným zpracováním.

Při podrobnějším pohledu se však průběh teplotní křivky poměrně významně odlišuje od průběhu křivky, jak je uložena ve strukturách Geofondu. Měření tehdy vyhodnocovala dr.Chochlíková, kontrolu správnosti prováděl RNDr.Kořalka (bývalá firma Geoindustrie Praha). Pro názornost přikládám originál z Geofondu pro porovnání s křivkou uváděnou L.Čáповou, kterou získala ze zdroje AVČR (dr.Dědeček, dr.Šafanda). Toto měření bylo provedeno pracovníky AVČR v květnu 1977 (informace dr.Dědečka). Měření provedené pracovníky Geoindustrie se uskutečnilo dne 24.4.1977 (zjištěno z kopie zprávy), tedy o něco dříve. Obě křivky se od sebe podstatně liší jak tvarem, tak absolutními hodnotami (až 5°C). Zpracováním originálu křivky Geoindustrie (Kořalka, Chochlíková) získáme průměrný teplotní gradient dokonce o něco nižší, než je jeho průměrná hodnota v ČR ( $1,95^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ). Není vyloučeno, že se mohlo jednat o měření za neustálených teplotních poměrů. To, že existují dva rozdílné teplotní záznamy ze dvou hodnověrných zdrojů, mělo být v diplomové práci komentováno, autorka měla na tuto nejednoznačnost upozornit a měla se alespoň pokusit o možné vysvětlení těchto rozdílů.

Výsledky jsou prezentovány s vysokou přesností, ale vstupní údaje jsou buď nekvalitní (vrt Pé-1), anebo dvojznačné (vrt Kv-1), třebaže při správném postupu zpracování ani jedno z měření nevede k závěru o zvýšeném tepelném toku na lokalitě Semily.

Na lokalitě Liberec při absenci vhodných vrtů byly sestaveny modely teplotního pole na základě teoretických výpočtů při možném předpokládaném geologickém sledu. Byly vypočteny různé teplotní modely pro různé geologické situace, které se vzájemně poměrně výrazně liší. Je to dáno nedostatkem informací z hlubších geologických struktur v oblasti, což je v práci správně komentováno. Poznámka oponenta: Nicméně několik vrtů do hloubky cca 100 m, v nichž byla provedena termometrie za ustálených poměrů, se v Liberci nachází. Průměrný teplotní gradient v žulách se v této oblasti v těchto hloubkách pohybuje kolem  $2,0^\circ\text{C}$ - $2,5^\circ\text{C}/100\text{m}$ . Nevybočuje tedy z průměru, je podobný hodnotám v ostatních dvou posuzovaných lokalitách Semily a Litoměřice. Určitou výhodou lokality Liberec je geologická stavba. Hydraulické štěpení v tektonicky porušených granitech na rozdíl od řady jiných hornin možné je.

V závěru L.Čápková konstatuje, že o teplotních a geologických poměrech v hlubší části zemské kůry pod 2000 m jsou dosavadní znalosti mizivé. S tím je nutno souhlasit.

Geologické řezy, které jsou součástí přílohy, lze akceptovat pouze se značnou rezervou. Je otázkou, zda je vůbec zařazovat do diplomové práce. V rámci serióznosti spíše raději ne. Rozdíl mezi očekáváním a skutečností bývá značný, jak ostatně bylo prokázáno vrtem GTPVLT-1.

Nelze však s ohledem na výše uvedené souhlasit s tvrzením o větší nadějnosti lokality Semily pro využití tepla, neboť tomu nic nenasvědčuje. Mimo to nadějnost lokality pro využití suchého tepla hornin je nutno posuzovat zpracováním větší kolekce vrtů a i podle jiných kritérií než podle teploty. Jedním ze zásadních je vhodnost hornin pro hydraulické štěpení při vytváření výměníku tepla. Toto není v závěru zmíněno.

Potvrzení či vyvrácení úvah o větší či menší nadějnosti využití zemského tepla z metamorfovaných hornin než granitů v oblasti Liberce je odvážné. Odpověď přinese až budoucnost.

#### Závěrečné shrnutí:

Lucie Čápková si za téma práce vybrala zajímavé a náročné téma geotermického modelování. Pro to, aby mohla být práce napsána, nastudovala poměrně velké množství literatury z různých zdrojů, třebaže některé zdroje zůstaly nepovšimnuty. To platí i o ne úplně optimálním výběru vrtů. Práce je koncipována přehledně, kapitoly jsou řazeny logicky za sebou. Práce obsahuje značné množství doprovodných obrázků a tabulek.

Modely pro vybrané oblasti prováděla při různých simulacích. Nejistota výsledků je tak značná. Vycházela z velmi omezeného množství dat, navíc někdy nekvalitních, někdy dvojnásobných, v jednom případě neprovedla opravu na proudění vody, což zkresluje výsledné geotermické modely a vede k nesprávným závěrům. Je však nutno přihlídnout k nezkušenosti autorky diplomové práce. Ke komplexnímu posouzení teplotních záznamů je potřeba dlouholetou zkušenost.

V jednom případě vycházela z nesprávné koncepce, což však není její chybou.

Jak bylo zmíněno výše, dopustila se autorka také několika nedůsledností v textu i v grafu. Některé obrázky jsou příliš zmenšené a prakticky nečitelné.

Jako oponent chápu tuto diplomovou práci jako text, který má ambici předvést možnosti zpracování dat a vytváření modelů a nikoliv jako práci, která by si kladla za cíl informovat o skutečném teplotním poli na zvolených lokalitách. K tomu by bylo potřeba velmi pečlivě a kriticky zpracovat kvalitní teplotní záznamy z desítek vrtů v oblasti. Tak je potřeba na práci nahlížet i do budoucna.

Důrazně doporučuji tuto práci v aktuální formě zatím nikde neprezentovat, alespoň do té doby, dokud nedojde k opravě všech, především ale těch závažnějších chyb, které mohou vést k zavádějícím závěrům.

Z hlediska ukázky způsobu zpracování je diplomová práce Lucie Čápkové poměrně uceleným a logicky sestaveným dílem. Při zvážení této kvality na straně jedné a nedůsledností faktických či formálních a hlavně různých chyb zmíněných v předchozím textu, navrhuji ocenit diplomovou práci stupněm „velmi dobrá“.