

# Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných údajů

Autoři: Petr Dědeček<sup>1</sup>, Tomáš Uxa<sup>1</sup>,  
Jan Holeček<sup>2</sup>

Praha, 2020



**NÁZEV ZPRÁVY:** Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných údajů

**NÁZEV PROJEKTU:** Výzkumná podpora pro bezpečností hodnocení hlubinného úložiště

**IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:** Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti

Průběžná zpráva

**ČÍSLO SMLOUVY:** SO2016-061 (ev. č.: 4.1.7.5 / č.j. ESS: SURAO-2019-3183)

Bibliografický zápis:

DĚDEČEK P., UXA T., HOLEČEK J. (2020): Geotermické zhodnocení potenciálních lokalit HÚ na základě dostupných dat. – MS SÚRAO, TZ 486/2020

**ŘEŠITELÉ:**

Geofyzikální ústav Akademie věd ČR<sup>1</sup>, Česká geologická služba<sup>2</sup>

**AUTORSKÝ KOLEKTIV:** Dědeček P.<sup>1</sup>, Uxa T.<sup>1</sup>, Holeček J.<sup>2</sup>

**Jméno Příjmení**

Lukáš Vondrovic (SÚRAO)

15.4.2020

**Jméno Příjmení**

Václava Havlová (ÚJV Řež, a.s.)

15.4.2020



## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Březový potok</b>	<b>11</b>
2.1	Tepelné vlastnosti lokality	11
2.1.1	Tepelná vodivost hornin a homogenita tepelné vodivosti	11
2.1.2	Měrná tepelná kapacita	11
2.1.3	Radiogenní produkce tepla	12
2.1.4	Tepelný tok	13
2.1.5	Teplota horninového prostředí	14
2.1.6	Závěr	16
<b>3</b>	<b>Čertovka</b>	<b>17</b>
3.1	Tepelné vlastnosti lokality	17
3.1.1	Tepelná vodivost a tepelná difuzivita	17
3.1.2	Měrná tepelná kapacita	17
3.1.3	Radiogenní produkce tepla	18
3.1.4	Tepelný tok	19
3.1.5	Teplota horninového prostředí	20
3.1.6	Závěr	22
<b>4</b>	<b>Čihadlo</b>	<b>23</b>
4.1	Tepelné vlastnosti lokality	23
4.1.1	Tepelná vodivost a tepelná difuzivita	23
4.1.2	Měrná tepelná kapacita	23
4.1.3	Radiogenní produkce tepla	24
4.1.4	Tepelný tok	25
4.1.5	Teplota horninového prostředí	25
4.1.6	Závěr	27
<b>5</b>	<b>Horka</b>	<b>28</b>
5.1	Tepelné vlastnosti lokality	28
5.1.1	Tepelná vodivost a homogenita tepelné vodivosti	28
5.1.2	Měrná tepelná kapacita	28
5.1.3	Radiogenní produkce tepla	29
5.1.4	Tepelný tok	29
5.1.5	Teplota horninového prostředí	30
5.1.6	Závěr	32

<b>6</b>	<b>Hrádek.....</b>	<b>33</b>
6.1	Tepelné vlastnosti lokality .....	33
6.1.1	Tepelná vodivost a tepelná difuzivita .....	33
6.1.2	Měrná tepelná kapacita .....	34
6.1.3	Radiogenní produkce tepla.....	35
6.1.4	Tepelný tok .....	35
6.1.5	Teplota horninového prostředí.....	36
6.1.6	Závěr.....	38
<b>7</b>	<b>Kraví hora .....</b>	<b>39</b>
7.1	Tepelné vlastnosti lokality .....	39
7.1.1	Tepelná vodivost a tepelná difuzivita .....	39
7.1.2	Měrná tepelná kapacita .....	40
7.1.3	Radiogenní produkce tepla.....	41
7.1.4	Tepelný tok .....	41
7.1.5	Teplota horninového prostředí.....	42
7.1.6	Závěr.....	44
<b>8</b>	<b>Magdaléna .....</b>	<b>45</b>
8.1	Tepelné vlastnosti lokality .....	45
8.1.1	Tepelná vodivost a homogenita tepelné vodivosti .....	45
8.1.2	Měrná tepelná kapacita .....	46
8.1.3	Radiogenní produkce tepla.....	47
8.1.4	Tepelný tok .....	47
8.1.5	Teplota horninového prostředí.....	48
8.1.6	Závěr.....	50
<b>9</b>	<b>Reference.....</b>	<b>52</b>

## Seznam použitých zkratk:

A	amfibolit
AM	aritmetický průměr
B	bazalt
BT	blatenský typ granodioritu
C	měrná tepelná kapacita
CB	syenit typu čertovo břemeno
CT	červenský typ granodioritu
$c_v$	objemová tepelná kapacita
EK	granit Klenov
eU(Ra)	ekvivalentní koncentrace U
eTh	ekvivalentní koncentrace Th
F	fylit
G	granulit
GB	granit typu Boršov
GC	granit typu Čeřínek
H	hadec
HÚ	hlubinné úložiště
MG/M	migmatit
P	pískovec
S	syenit
T	granodiorit
TD	melasyenit táborského typu, varieta Dražice
TT	melasyenit táborského typu
VJP	vyhořelé jaderné palivo

## Vysvětlení pojmů:

### Tepelná vodivost hornin

Tepelná vodivost hornin ( $\lambda$ ) je schopnost horniny vést teplo. Tento parametr závisí zejména na minerálním složení horniny, dále pak na její pórovitosti, struktuře a textuře. Velmi dobrým vodičem tepla je křemen, naopak špatným vodičem jsou jílové minerály. Synonymními pojmy jsou koeficient tepelné vodivosti horniny, tepelná konduktivita. Udává se v jednotkách  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

### Měrná tepelná kapacita hornin

Měrná tepelná kapacita ( $c$ ) je definována jako tepelná kapacita hmotné jednotky (podíl tepelné kapacity objektu a jeho hmotnosti), přičemž měrná tepelná kapacita  $c$  značí množství tepla potřebné k ohřátí 1kg látky o 1 °C. Udává se v jednotkách  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

### Radiogenní produkce tepla

Radiogenní produkce hornin je množství tepelné energie uvolněné radioaktivním rozpadem přirozeně se vyskytujících radioaktivních prvků (U, Th, K) obsažených v hornině. Udává se obvykle v jednotkách  $mW \cdot m^{-3}$ .

## **Hustota tepelného toku**

Hustota tepelného toku ( $\varphi$ ) představuje tepelný výkon horninového prostředí vyjádřený ve watttech vztažený na jednotku plochy. Udává se obvykle v jednotkách  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ .



## Abstrakt

Tento dokument shrnuje v současnosti dostupné poznatky o geotermických vlastnostech hornin a horninového prostředí na území sedmi původních kandidátních lokalit navržených pro situování trvalého hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Na základě terénních i laboratorních měření jsou ve zprávě zhodnoceny tepelné vodivosti přítomných hornin, homogenita tepelné vodivosti, tepelné kapacity hornin, radiogenní produkce horninového prostředí závislé na obsahu přirozeně se vyskytujících radioaktivních prvků, tepelný tok zemské kůry v zájmových lokalitách a zároveň jsou namodelované předpokládané teploty horninového prostředí v plánované cílové hloubce hlubinného úložiště v úrovni 500 m pod terénem. Všechny diskutované parametry jsou nezbytné pro geotermické zhodnocení lokalit ve vztahu k přítomnosti zdrojů geotermální energie i pro dimenzování technických parametrů plánovaného úložiště.

## Klíčová slova

tepelné vlastnosti hornin, teplota horninového prostředí, tepelná vodivost hornin, radiogenní tepelná produkce hornin, hustota tepelného toku, tepelná kapacita hornin

## Abstract

This document summarizes the currently available knowledge about the geothermal properties of rocks and the rock environment at seven candidate sites selected for the location of a permanent deep repository of radioactive waste. Based on field and laboratory measurements; the report evaluates thermal conductivities of the rocks present at localities, homogeneity of thermal conductivity, thermal capacities of rocks, radiogenic production of rock environment dependent on the content of naturally occurring radioactive elements, heat flow of the Earth's crust at localities and estimations of temperature at planned depth of deep geological repository 500 m below the ground have been calculated. All discussed parameters are necessary for geothermal evaluation of sites in relation to the presence of geothermal energy resources and for dimensioning technical parameters of the planned geological repository.

## Keywords

thermal properties of rocks, temperature of the rock environment, thermal conductivity of rocks, radiogenic heat production of rocks, heat flow density, thermal capacity of rocks

# 1 Úvod

Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež a.s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou, ČVUT v Praze, Technickou univerzitou v Liberci, Ústavem Geoniky AV ČR, a společnostmi SG Geotechnika a.s., Progeo, s.r.o. a Chemcomex, a.s. a Centrem výzkumu Řež, s.r.o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- I. Chování VJP a forem RAO nepřijatelných do přípovrchových úložišť v prostředí hlubinného úložiště;
- II. Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- III. Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- IV. Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- V. Chování horninového prostředí;
- VI. Transport radionuklidů z úložiště;
- VII. Další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

Předložená technická zpráva je výstupem zadávacího listu č. *PB-2019-ZL-S3183-043-Hodnocení 2* „Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti“.

Kompilace této zprávy byla dodatečně vyžádána ze strany SÚRAO v rámci úkolu výzkumné podpory dodatkem č. 1 *PB-2019-ZL-S3183-043-Hodnocení 2* ze dne 28. 3. 2020 položkou č. 12: Součinnost a revize podkladové dokumentace pro jednání expertního panelu; dopracování nutných chybějících materiálů.

Pro účely projektového řešení a geotermického zhodnocení potenciálních lokalit, jsou v této zprávě popsány dostupné geotermické parametry pro sedm iniciálních potenciálních lokalit HÚ: Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Kraví hora a Magdaléna. Dodatečně přidané potenciální lokality ETE-jih a EDU-západ nejsou ve zprávě obsaženy, protože pro tyto lokality nebyly odebrány potřebné horninové vzorky a změřeny petrofyzikální vlastnosti hornin nutné k následnému výpočtu geotermických parametrů a geotermickému modelování.

Geotermické parametry horninového prostředí mají přímý vliv na hodnocení přítomnosti zdrojů geotermální energie na kandidátních lokalitách HÚ, což je jedno z vylučujících kritérií a dále pak na dimenzování technických parametrů samotného navrhovaného HÚ. Při výběru horninového prostředí s výhodnějšími geotermickými parametry (nižší teplota horninového prostředí, vyšší tepelné vodivosti hornin) lze vybudovat HÚ kompaktnějších rozměrů a lze tak snížit ekonomické nároky na budování takového úložiště.

## 2 Březový potok

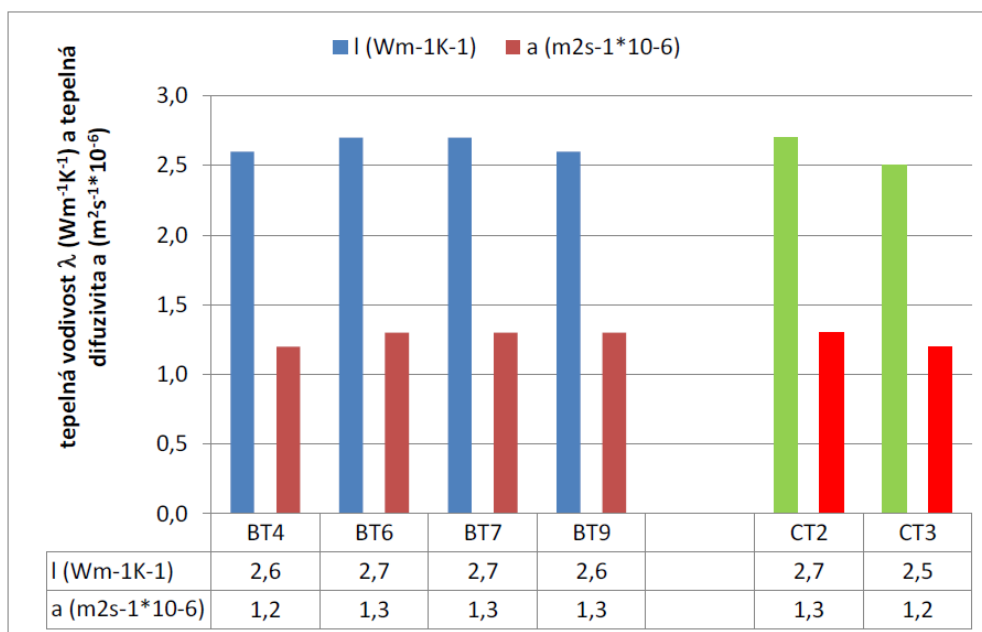
### 2.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 2.1.1 Tepelná vodivost hornin a homogenita tepelné vodivosti

Dostupná data tepelné vodivosti hornin na lokalitě Březový potok jsou publikována ve zprávě Hanáka et al. (2017). V rámci této studie byly na pracovišti Geofyzikálního ústavu AV ČR proměřeny 4 vzorky amfibol-biotitického granodioritu (BT – blatenský typ, ID 1773) od Defurových Lažan a 2 vzorky amfibol-biotitického granodioritu (CT – červenský typ, ID 1778) z lokality Barák.

Z Obr. 1 je zřejmé, že jsou všechny měřené vzorky z hlediska tepelných vlastností relativně izotropní, přičemž hodnoty tepelné vodivosti se pohybují v rozmezí  $2,5\text{--}2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnoty tepelné difuzivity v rozmezí  $1,2\text{--}1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

Pro horninové prostředí HÚ byla stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin  $>2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Andersson et al. 2000). Granity na lokalitě Březový potok tento požadavek splňují, nicméně se této hodnotě blíží a v případě vzorku CT3 byla naměřena hodnota hraniční. Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu fakt, že všechny zkoumané vzorky byly odebrány z povrchových výchozů, což může mít na naměřená data vliv.



Obr. 1 Tepelná vodivost ( $\lambda$ ) a tepelná difuzivita ( $a$ ) granodioritů blatenského typu (BT) a červenského typu (CT) – lokalita Březový potok (převzato z Hanáka et al. 2017).

#### 2.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita nebyla měřena přímo, ale byla vypočtena na stejných vzorcích granitu jako tepelné vodivosti uvedené v předchozí podkapitole. Nejprve byla určena objemová tepelná

kapacita jako podíl tepelné vodivosti a difuzivity. Měrná tepelná kapacita  $c$  pak následně byla vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity  $c_v$  a hustoty horninového vzorku.

Dle Tab. 1 mají oba typy granitu na lokalitě Březový potok podobné hodnoty měrné tepelné kapacity v rozmezí 753–806 J \*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>, přičemž průměrná hodnota pro blatenský typ je 780 J\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup> a pro červenský typ pak 785 J\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>. Průměrné hodnoty měrné tepelné kapacity pro granity při teplotě kolem 20 °C uváděné v literatuře jsou převážně v rozmezí 750–850 J\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup> (tzb-info.cz, Ražnjevič 1969, Eppelbaum et al. 2014). V porovnání s těmito hodnotami mají granity na lokalitě Březový potok průměrnou tepelnou kapacitu.

Měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny omezující limity. Tento parametr vstupuje do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 1 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) pro granity na lokalitě Březový potok dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty označené jako (AM) jsou aritmetické průměry pro daný horninový typ.

lokality		$c_v$	$c$
hornina	označení vzorku	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
BT – granodiorit blatenský typ	BT4	2160	806
	BT6	2139	799
	BT7	2037	762
	BT9	2018	753
	BT (AM)	2088	780
CT – granodiorit červenský typ	CT2	2119	784
	CT3	2129	786
	CT (AM)	2124	785

### 2.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Březový potok byla spočítána tepelná produkce jak pro oba typy granodioritu, tak také pro vzorek odebraný ze žíly minety. Protože však mineta nepatří k základním horninám lokality a na jejím vzorku nebyly stanoveny tepelné vlastnosti, není dále v textu zmiňována. Oba typy granodioritu vykazují zvýšené koncentrace radioaktivních izotopů, přičemž zejména to platí o granodioritu červenského typu (CT), kde koncentrace eU(Ra) dosahují až 18 ppm, a koncentrace eTh téměř 35 ppm.

Při průměrné tepelné produkci granitu okolo 3  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (Wedepohl 1969; Vaňková et al. 1979; Čermák a Rybach 1982) se mnoho typů granitů v Českém masivu řadí do skupin se zvýšenou (4  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) až anomální (6  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) tepelnou produkcí. Vypočtená průměrná tepelná produkce granodioritů blatenského typu je 3,4  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  a jedná se tedy o hodnotu průměrnou. V případě

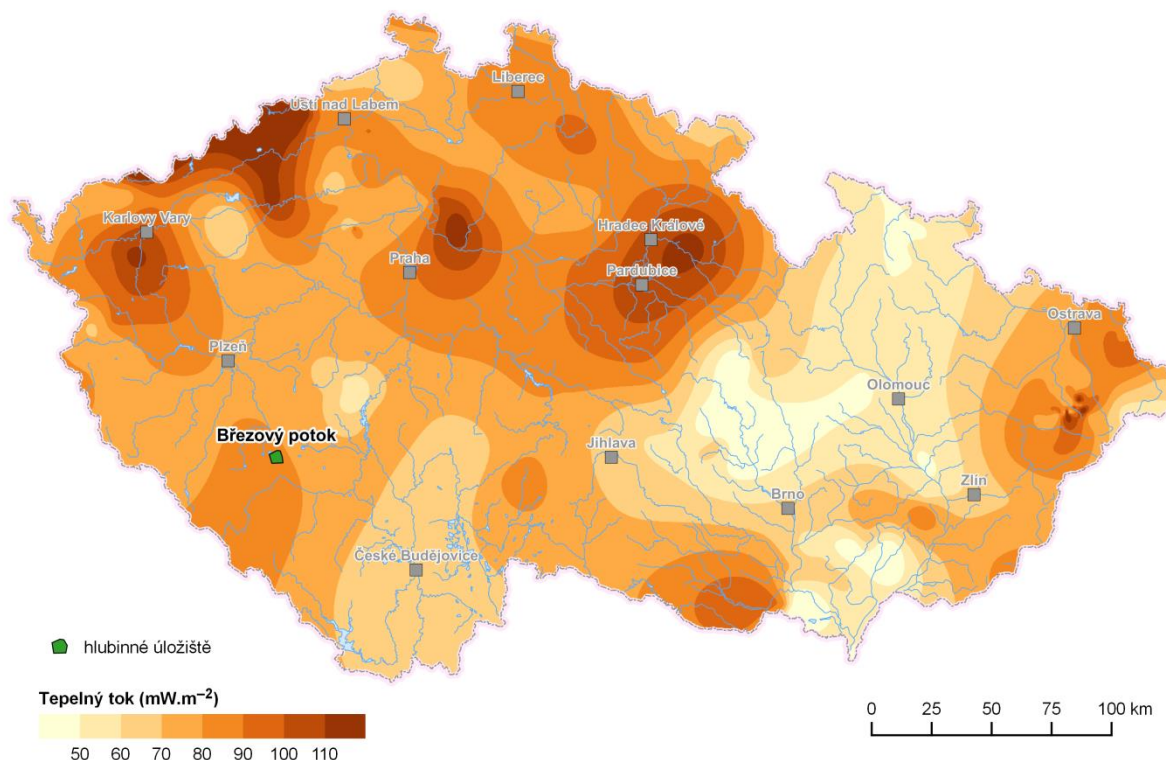
granodioritů červenského typu byla naměřena průměrná hodnota tepelné produkce  $6,3 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ , což znamená, že se jedná o hodnotu anomální.

#### 2.1.4 Tepelný tok

Hustotu tepelného toku produkovaného horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků a postupným chladnutím Země lze určit z naměřeného teplotního gradientu ve vrtech a tepelné vodivosti hornin vrtem zastižených. Podle Čermáka (1979) je hodnota průměrného tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu  $80\text{-}100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  jsou vázané na vyšší radioaktivitu variských granitů smrčinsko-krušnohorského batolitu a krkonoško-jizerského kompozitního masivu (Obr. 2).

Dle mapy na Obr. 2 leží lokalita Březový potok pravděpodobně v území s lehce nadprůměrným tepelným tokem okolo  $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Uvážíme-li výše uvedenou tepelnou produkci granodioritů, tak by byl po odečtení vlivu horninového masivu v nadloží tepelný tok v hloubce 500 m nižší o přibližně  $1,5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  v případě granodioritu blatenského typu a o  $3 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  v případě typu červenského.

Je třeba si uvědomit, že mapa vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota pro tepelný tok pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.

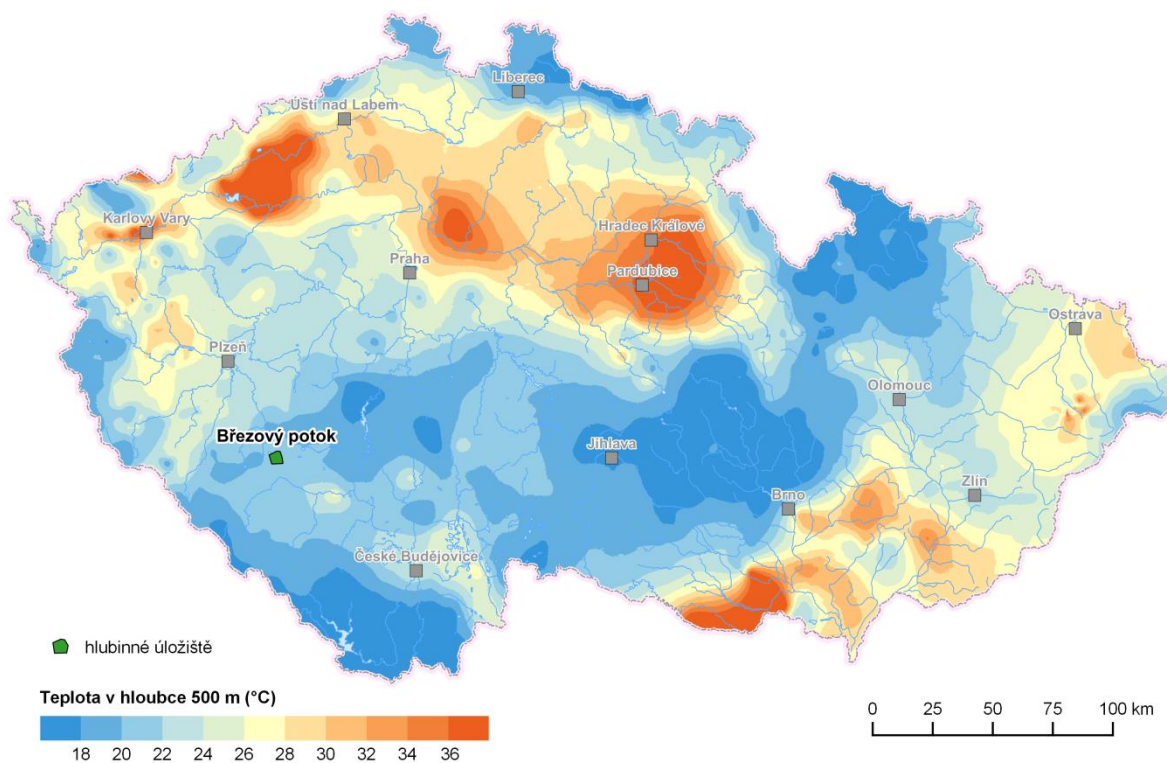


Obr. 2 Mapa tepelného toku ČR s vyznačením zájmové lokality.

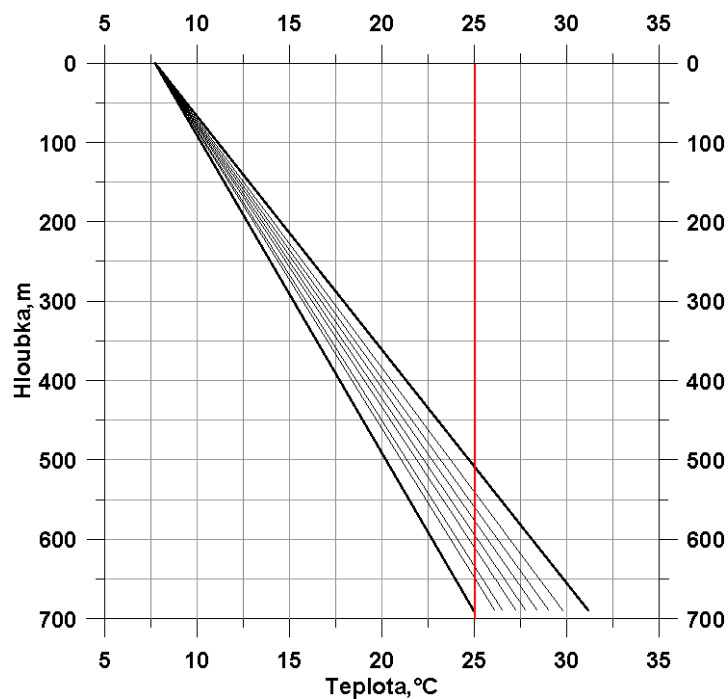
### 2.1.5 Teplota horninového prostředí

Andersson et al. (2000) v SKB technical report TR-00-12 definují vhodné horninové prostředí pro úložiště VJP jako prostředí s teplotou  $<25\text{ }^{\circ}\text{C}$  v místě uložení kontejnerů.

Na Obr. 3 je znázorněna mapa izoterm v hloubce 500 m pod povrchem. Z mapy je zřejmé, že v zájmové lokalitě by se teplota v hloubce 500 m mohla pohybovat mezi  $20\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zde je však třeba si uvědomit, že zmíněná mapa vychází jednak z výše uvedené mapy tepelného toku a pak z obvyklých hodnot tepelné vodivosti pro daný typ horniny. Vzhledem k počtu vrtů použitých pro tvorbu map a zjednodušení zavedením průměrných hodnot tepelné vodivosti pro regionální geologické celky, je třeba v případě takto detailních studií počítat se značnou mírou nepřesnosti.



Obr. 3 Schéma izolinií teplot (°C) v úrovni 500 m pod povrchem na území ČR s vyznačením zájmové lokality.



Obr. 4 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti.

Na Obr. 4 je znázorněno několik možných scénářů nárůstu teploty s hloubkou, které vycházejí z naměřených hodnot tepelné vodivosti na dané lokalitě. Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné

délce (Kubík, 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly 2,5; 2,75 a 3  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž nejnižší hodnota korespondovala s nejnižší naměřenou hodnotou a nejvyšší pak brala v úvahu možný nárůst vodivosti v neporušené části masivu. Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 75; 80 a 85  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Jak je z obrázku patrné, teplota 25 °C (červená čára) by v případě nejnižší tepelné vodivosti (2,5  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku (85  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) byla překročena v hloubce cca 500 m. Naopak pro hodnoty 3  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a 75  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  je tato hranice překročena až v hloubce téměř 700 m.

### 2.1.6 Závěr

Lokalita Březový potok se nachází pravděpodobně v místě s průměrnou až mírně nadprůměrnou hustotou tepelného toku, v případě granodioritu červenského typu s anomální hodnotou tepelné produkce a v případech obou typů granodioritů s lehce podprůměrnými hodnotami tepelné vodivosti. Na základě výše popsaného modelu pak lze předpokládat teplotu <25 °C v hloubkách do 500–700 m. Z pohledu kritérií kladených na tepelné vlastnosti hostitelských hornin se tedy lokalita jeví jako potenciálně vhodná pro umístění HÚ VJP. Tento předběžný závěr je ale založený na aktuálně dostupných datech a pouze povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat značnou míru nejistoty a pro zásadní upřesnění bude třeba provést nová doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech.



## 3 Čertovka

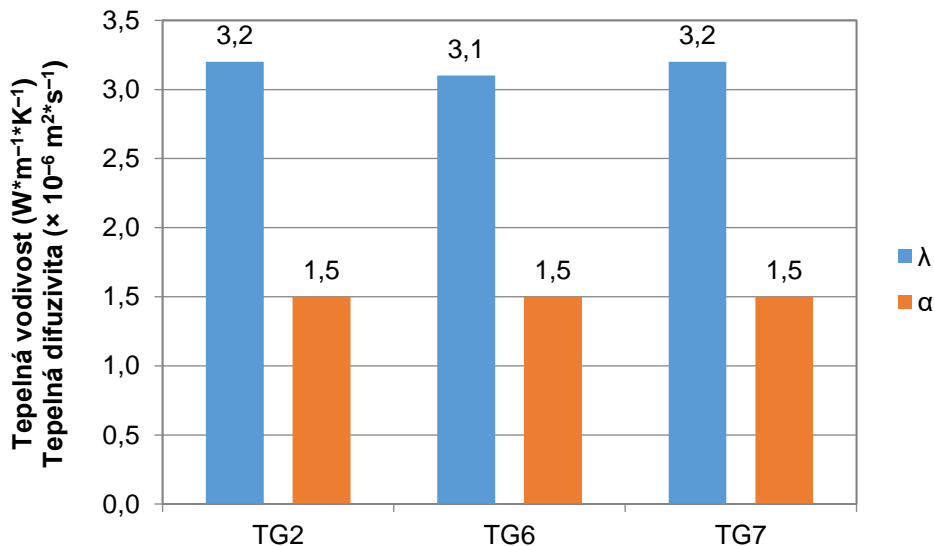
### 3.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 3.1.1 Tepelná vodivost a tepelná difuzivita

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita hornin na lokalitě Čertovka byla měřena na Oddělení geotermiky Geofyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i. na třech vzorcích tiského granitu (TG2, TG6, TG7) z odběrové lokality Tis u Blatna a naměřené údaje byly publikovány ve zprávě Hanáka et al. (2017).

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita všech tří měřených vzorků dosahuje téměř identických hodnot (Obr. 5), přičemž jejich aritmetické průměry činí  $3,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . Čermák a Rybach (1982) uvádí průměrnou hodnotu tepelné vodivosti granitů  $3,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , Sundberg et al. (2008) pak uvádí interval tepelné vodivosti křemenných intruzí v  $2,8\text{--}3,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . S přihlédnutím k výše uvedenému i k dlouhodobým výsledkům měření tepelných vlastností granitů v laboratoři Geofyzikálního ústavu lze konstatovat, že hodnoty tepelné vodivosti a tepelné difuzivity tiského granitu jsou mírně nadprůměrné.

Pro horninové prostředí HÚ byla stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin  $>2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Andersson et al. 2000), kterýžto požadavek granity na lokalitě Čertovka jednoznačně splňují.



Obr. 5 Tepelná vodivost ( $\lambda$ ) a tepelná difuzivita ( $\alpha$ ) tiského granitu na lokalitě Čertovka dle Hanáka et al. (2017).

#### 3.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita hornin na lokalitě Čertovka byla stanovena nepřímo na základě znalosti tepelné vodivosti, tepelné difuzivity a hustoty tří vzorků tiského granitu (TG2, TG6, TG7) z odběrové lokality Tis u Blatna. Nejprve byla určena objemová tepelná kapacita jako podíl

tepelné vodivosti a tepelné difuzivity. Měrná tepelná kapacita byla následně vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity a hustoty horninového vzorku.

Objemová a měrná tepelná kapacita měřených vzorků se pohybují v rozmezí 2102--2133  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 793–805  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Tab. 2), přičemž jejich aritmetické průměry dosahují 2123  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 800  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Hodnoty měrné tepelné kapacity granitů při teplotě kolem 20 °C uváděné v literatuře jsou převážně v rozmezí 750–850  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (tzb-info.cz, Ražnjevíč 1969, Eppelbaum et al. 2014). Z tohoto hlediska lze tudíž měrnou tepelnou kapacitu granitů na lokalitě Čertovka označit jako průměrnou.

Měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny žádné omezující limity. Tento parametr vstupuje do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 2 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) tiského granitu na lokalitě Čertovka dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty s označením (AM) jsou aritmetické průměry.

lokality	označení vzorku	$c_v$	$c$
hornina		$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
TG – tiský granit	TG2	2133	803
	TG6	2102	793
	TG7	2133	805
	TG (AM)	2123	800

### 3.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Čertovka byla spočítána tepelná produkce jak pro základní hodnocenou horninu (tiský granit), tak pro okolní horniny reprezentované granodioritem, fylitem, neoidním bazaltem a pískovcem. Obsahy přirozených radioaktivních prvků jsou u všech horninových typů relativně nízké a poměrně homogenní. Nejvyšší koncentrace radioaktivních izotopů byly zaznamenány u granitoidních hornin, u nichž průměrné obsahy dosahují eU(Ra) 2,9–3,9 ppm, eTh 9,9–13,2 ppm a K 2,74–3,57 %, čemuž odpovídá vypočtená průměrná tepelná produkce 1,9-2  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (

Tab. 3). To představuje poměrně nízkou tepelnou produkci s ohledem na průměrnou tepelnou produkci granitu, která se pohybuje okolo  $3 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (Wedepohl 1969; Vaňková et al. 1979; Rybach a Čermák 1982)

Tab. 3 Průměrný obsah uranu ( $eU(Ra)$ ), thoria ( $eTh$ ) a draslíku ( $K$ ) v horninách zastoupených na lokalitě Čertovka dle Hanáka et al. (2017).

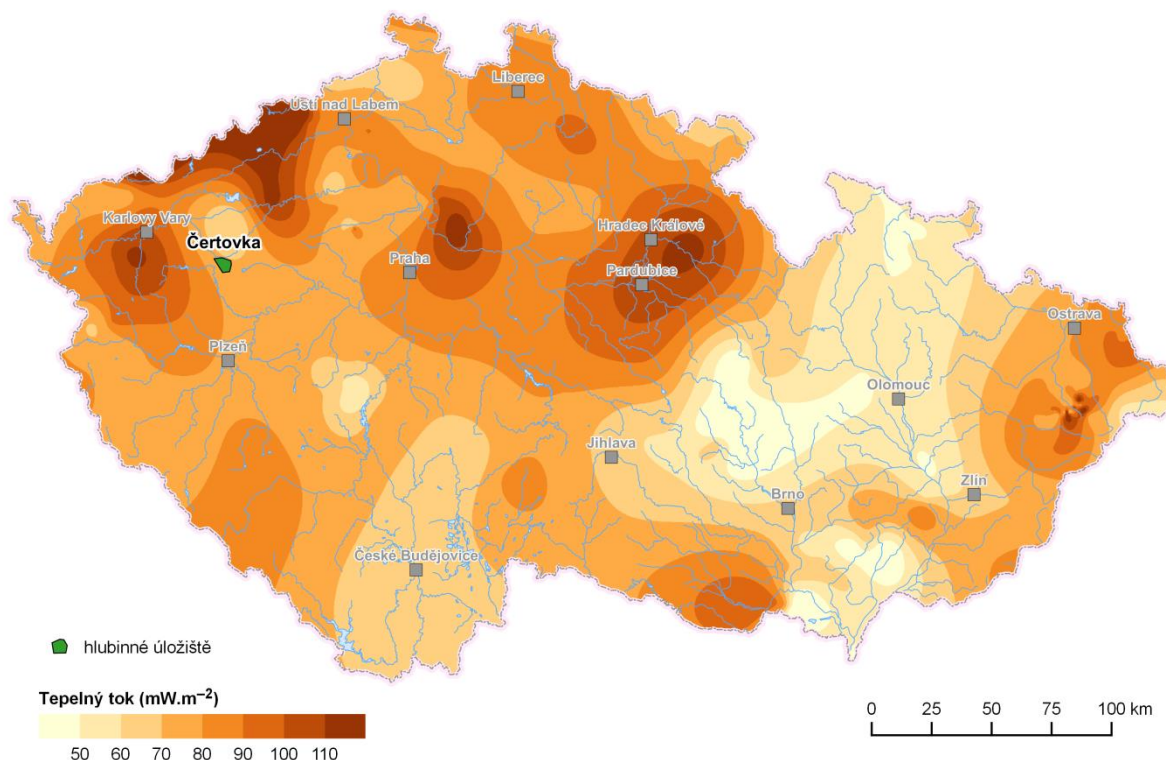
Hornina	$eU(Ra)$ (ppm)	$eTh$ (ppm)	$K$ (%)	Tepelná produkce ( $\mu W \cdot m^{-3}$ )
TG – tiský granit	3,9	9,9	3,57	2
T – granodiorit	2,9	13,2	2,74	1,9
F – fylit	2,2	7,4	1,61	1,2
B – bazalt	2,2	8,5	0,52	1,2
P – pískovec	1,2	3,6	2,36	0,69

### 3.1.4 Tepelný tok

Hustotu tepelného toku produkovaného horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků a postupným chladnutím Země lze určit z naměřeného teplotního gradientu ve vrtech a tepelné vodivosti hornin vrtem zastřižených. Podle Čermáka (1979) je průměrná hodnota tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu ( $80\text{--}100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ) jsou vázány na vyšší radioaktivitu variských granitů smrčinsko-krušnohorského batolitu a krkonošsko-jizerského kompozitního masivu (Obr. 6).

Dle mapy tepelného toku v ČR (Obr. 6) leží lokalita Čertovka pravděpodobně v území s průměrným až mírně nadprůměrným tepelným tokem cca  $70\text{--}75 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Uvážíme-li výše uvedenou tepelnou produkci granodioritů, tak by byl po odečtení vlivu horninového masivu v nadloží tepelný tok v hloubce 500 m nižší o přibližně  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , což je zanedbatelné.

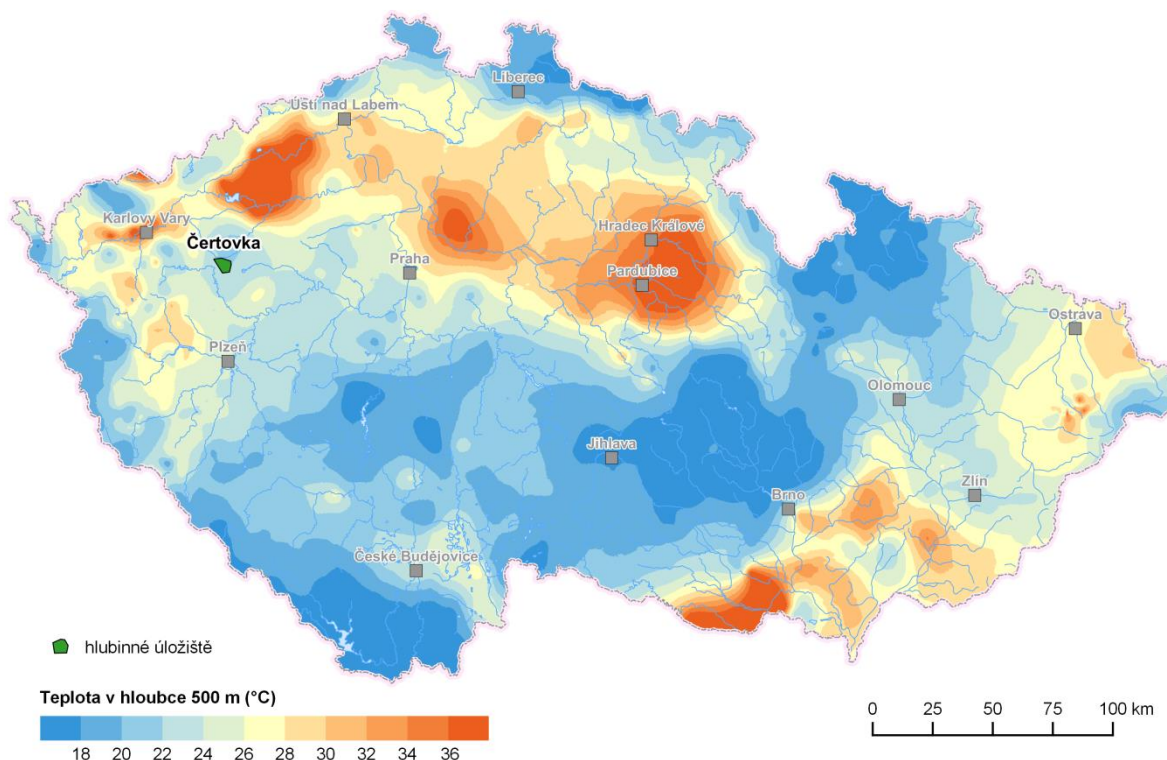
Je však nutné zdůraznit, že uvedená mapa (Obr. 6) vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota zemského tepelného toku pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.



Obr. 6 Mapa tepelného toku v ČR (Dědeček et al. 2017) s vyznačením lokality Čertovka.

### 3.1.5 Teplota horninového prostředí

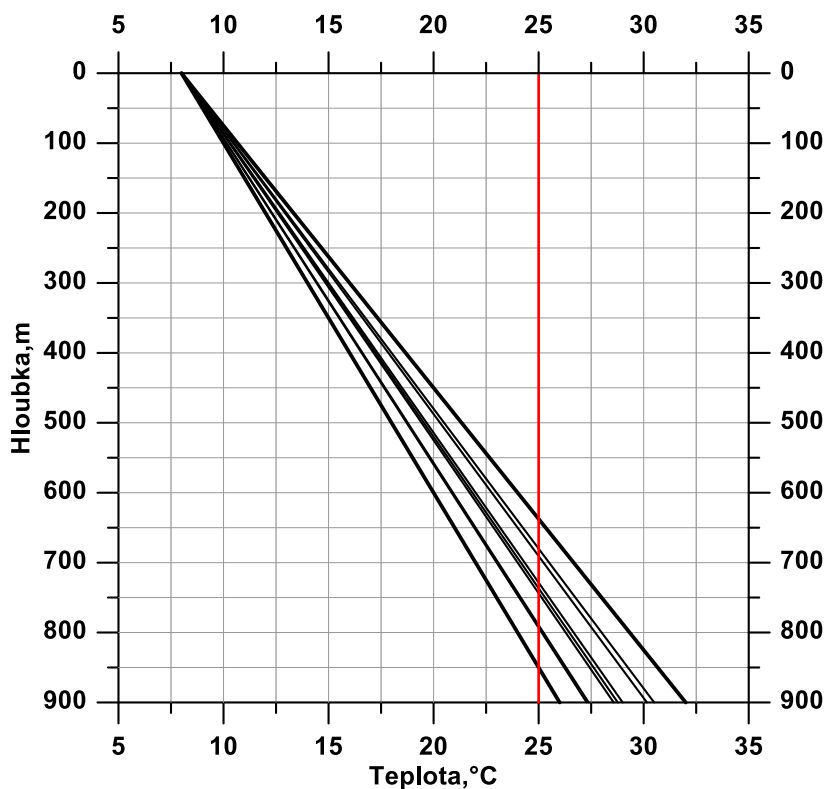
Dle mapy teploty v hloubce 500 m pod povrchem na území ČR (Obr. 7) by se teplota v této hloubkové úrovni na lokalitě Čertovka mohla pohybovat okolo 22 °C. Je však třeba zdůraznit, že uvedená teplotní mapa (Obr. 7) vychází jednak z mapy tepelného toku (Obr. 6), která je založena na omezeném počtu vrtů, a dále pak z průměrných hodnot tepelné vodivosti jednotlivých horninových typů v regionálních geologických celcích. Proto je nutné počítat se značnou mírou nepřesnosti odhadu.



Obr. 7: Mapa teploty v hloubce 500 m pod povrchem v ČR (Dědeček et al. 2017) s vyznačením lokality Čertovka.

Detailnější pohled na podpovrchovou teplotu na lokalitě Čertovka nabízí prognózy nárůstu teploty s hloubkou (Obr. 8) založené na naměřených hodnotách tepelné vodivosti na dané lokalitě a na zemském tepelném toku vycházejícím z mapy tepelného toku v ČR (Obr. 6). Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné délce (Kubík, 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly 3,00; 3,25 a 3,50  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , přičemž hodnota 3,00  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  je mírně nižší než nejnižší naměřená hodnota a hodnoty 3,25 a 3,50  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  berou v úvahu možný nárůst tepelné vodivosti v neporušené části masivu až po horní mez typického rozpětí tepelné vodivosti křemenných intruziv (Sundberg et al. 2008). Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 70; 75 a 80  $mW \cdot m^{-2}$ . Z výpočtů je patrné, že teplota v hloubce 500 m pod povrchem se pro jednotlivé scénáře pohybuje v rozpětí cca 18-21,5 °C (Obr. 8).

Dle SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000) je vhodné horninové prostředí pro HÚ VJP definováno jako prostředí s teplotou nižší než 25 °C v místě uložení kontejnerů. V případě kombinace nejnižší tepelné vodivosti (3,00  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku (80  $mW \cdot m^{-2}$ ) by tato hodnota byla překročena až v hloubce 640 m a pro kombinaci hodnot 3,50  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  a 70  $mW \cdot m^{-2}$  generujících nejnižší teplotní gradient by tato hranice byla překročena až v hloubce 850 m (Obr. 8).



Obr. 8 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti na lokalitě Čertovka.

### 3.1.6 Závěr

Lokalita Čertovka se vyznačuje mírně nadprůměrnou tepelnou vodivostí hornin s poměrně nízkou tepelnou produkcí a pravděpodobně se nachází v místě s průměrnou až mírně nadprůměrnou hustotou zemského tepelného toku. Na základě modelových výpočtů lze teplotu nižší než 25 °C předpokládat v hloubkách do 640–850 m. Z hlediska požadavků kladených na tepelné vlastnosti hostitelských hornin se tudíž lokalita jeví jako potenciálně vhodná pro umístění HÚ VJP. Tento předběžný závěr je však založený na omezeném množství aktuálně dostupných dat a výhradně na povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat, že prezentované poznatky o tepelných vlastnostech lokality Čertovka jsou zatíženy značnou mírou nejistoty a pro jejich zásadní upřesnění bude třeba provést nová, doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech.

## 4 Čihadlo

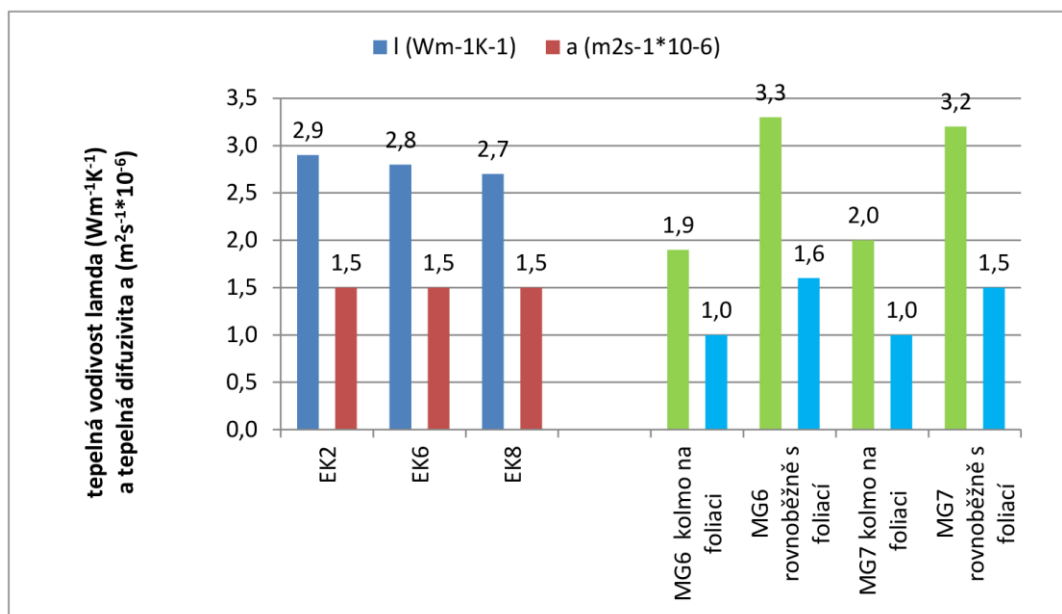
### 4.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 4.1.1 Tepelná vodivost a tepelná difuzivita

Dostupná data tepelné vodivosti hornin na lokalitě Čihadlo jsou publikována ve zprávě Hanáka et al. (2017). V této studii byly změřeny 3 vzorky krnovského granitu z lomu Deštná. Dále byly změřeny 2 vzorky migmatitu z lokality Dírenský potok. Vzorky migmatitu byly z důvodu výrazně usměrněné stavby měřeny ve 2 směrech – rovnoběžně s foliací a kolmo na foliaci horniny.

Hodnoty tepelné vodivosti změřené na vzorcích krnovského granitu vykazují téměř identické hodnoty měření v úzkém rozmezí 2,7-2,9  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ . U migmatitů se projevila výrazná anizotropie tepelné vodivosti způsobená stavbou těchto hornin. Ve směru rovnoběžném s foliací mají migmatity tepelnou vodivost 3,2–3,3  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , avšak ve směru kolmém vykazují pouze 1,9-2,0  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  (Obr. 9).

Pro horninové prostředí HÚ byla stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin  $>2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  (Andersson et al. 2000). Granity na lokalitě Čihadlo tento požadavek splňují, byť se této hodnotě blíží. Migmatity mají nedostatečnou tepelnou vodivost ve směru kolmém na foliaci.



Obr. 9 Tepelná vodivost ( $l$ ) a tepelná difuzivita ( $a$ ) u klenovského granitu (EK) a migmatitů (MG) – lokalita Čihadlo (převzato z Hanáka et al. 2017).

#### 4.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita nebyla měřena přímo, ale byla vypočtena na stejných vzorcích granitu jako tepelné vodivosti uvedené v předchozí podkapitole. Nejprve byla určena objemová tepelná kapacita jako podíl tepelné vodivosti a difuzivity. Měrná tepelná kapacita  $c$  pak následně byla vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity  $c_V$  a hustoty horninového vzorku.



Granity typu Klenov mají hodnoty měrné tepelné kapacity 701–733  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Průměrné hodnoty měrné tepelné kapacity pro granity uváděné v literatuře jsou 750  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (tzb-info.cz) až 946  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Dortman N. B v Schön H. 2015). V porovnání s těmito hodnotami mají granity typu Klenov podprůměrnou tepelnou kapacitu (Tab. 4). Průměrné rešeršní hodnoty pro měrnou tepelnou kapacitu migmatitů se nepodařilo dohledat. Změřené hodnoty měrné tepelné kapacity migmatitů na lokalitě Čihadlo jsou v rozmezí 683 až 766  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny omezující limity. Tento parametr vstupuje do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 4 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) pro granity a migmatity na lokalitě Čihadlo dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty označené jako (AM) jsou aritmetické průměry pro daný horninový typ.

lokality	označení vzorku	$c_v$	$c$
hornina		$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Čihadlo EK – granit Klenov	EK2	1933	733
	EK6	1867	708
	EK8	1852	701
	<i>EK (AM)</i>	1829	714
Čihadlo MG - migmatit	MG6 kolmo na foliaci	1900	683
	MG6 rovnoběžně s foliací	2063	742
	MG7 kolmo na foliaci	2000	718
	MG7 rovnoběžně s foliací	2133	766
	<i>MG (AM) kolmo na foliaci</i>	1969	707
	<i>MG (AM) rovnoběžně s foliací</i>	2072	744

### 4.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Čihadlo byla změřena tepelná produkce hornin na 5 vzorcích granitu typu Klenov a 5 vzorcích migmatitů. Tyto dva hlavní horninové typy se významně liší v obsazích radioaktivních prvků. Granity mají následující obsahy radioaktivních prvků:  $4,03 \pm 0,15$  hm. % K,  $9,8 \pm 1,9$  ppm U a  $26,6 \pm 0,9$  ppm eTh. Migmatity mají obsahy radioaktivních izotopů nižší ( $3,51 \pm 0,45$  hm. % K,  $3,1 \pm 0,6$  ppm U a  $11,3 \pm 2,0$  ppm eTh).

Při průměrné tepelné produkci granitu okolo  $3 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (Wedepohl 1969; Vaňková et al. 1979; Rybach a Čermák 1982) se mnoho typů granitů v Českém masivu řadí do skupin se zvýšenou ( $4 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) až anomální ( $6 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) tepelnou produkcí. Tepelná produkce granitů typu Klenov je zvýšená a změřené hodnoty jsou v rozmezí  $4,1\text{--}5,6 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tyto hodnoty řadí granity typu Klenov mezi horniny s nadprůměrnou tepelnou produkcí. Tepelná produkce migmatitů na

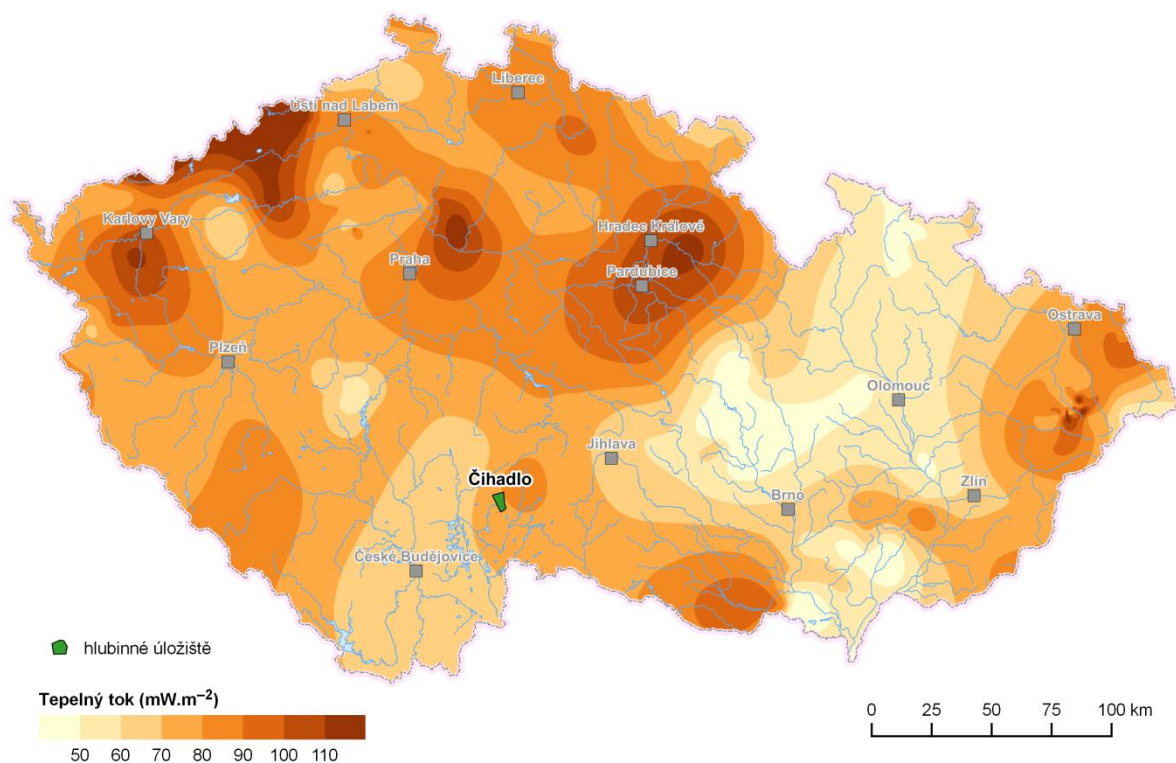
lokalitě Čihadlo je naopak nízká s hodnotami  $1,4\text{--}2,3 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ , což je s ohledem na slučitelnost horninového prostředí s HÚ výhodné.

#### 4.1.4 Tepelný tok

Teplo produkované horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků lze měřit na zemském povrchu a/nebo ve vrtech jako tepelný tok. Podle Čermáka (1979) je hodnota průměrného tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu  $80\text{--}100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  jsou vázány na vyšší radioaktivitu variských granitů smrčinsko-krušnohorského batolitu a krkonošsko-jizerského kompozitního masivu (Obr. 10).

Lokalita Čihadlo leží v území s nadprůměrným tepelným tokem okolo  $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Uvážíme-li výše uvedenou tepelnou produkci granodioritů, tak by byl po odečtení vlivu horninového masivu v nadloží tepelný tok v hloubce 500 m nižší o přibližně  $2,5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  v případě granitu a o  $1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  v případě migmatitu, což je zanedbatelné.

Je však nutné zdůraznit, že uvedená mapa (Obr. 10) vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota zemského tepelného toku pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.

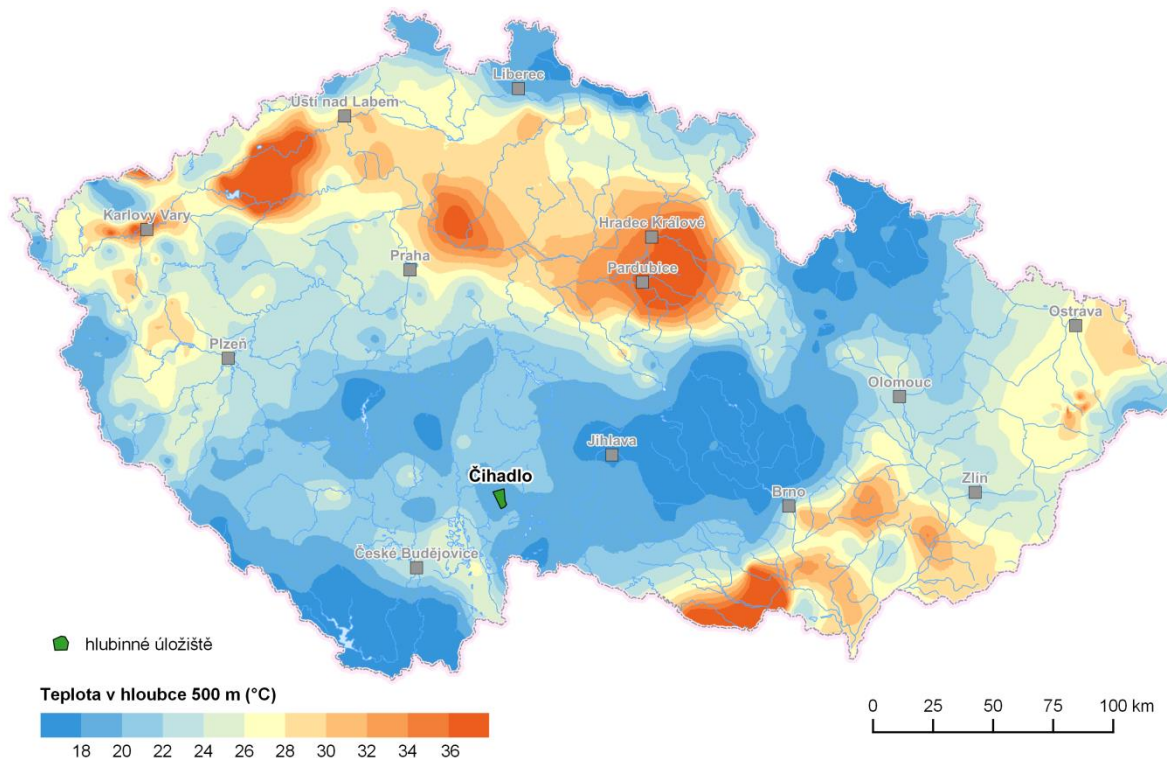


Obr. 10 Mapa tepelného toku ČR s vyznačenou lokalitou Čihadlo.

#### 4.1.5 Teplota horninového prostředí

Andersson et al. (2000) v SKB Technical Report TR-00-12 definují vhodné horninové prostředí pro úložiště VJP jako prostředí s teplotou  $<25 \text{ }^\circ\text{C}$  v místě uložení kontejnerů.

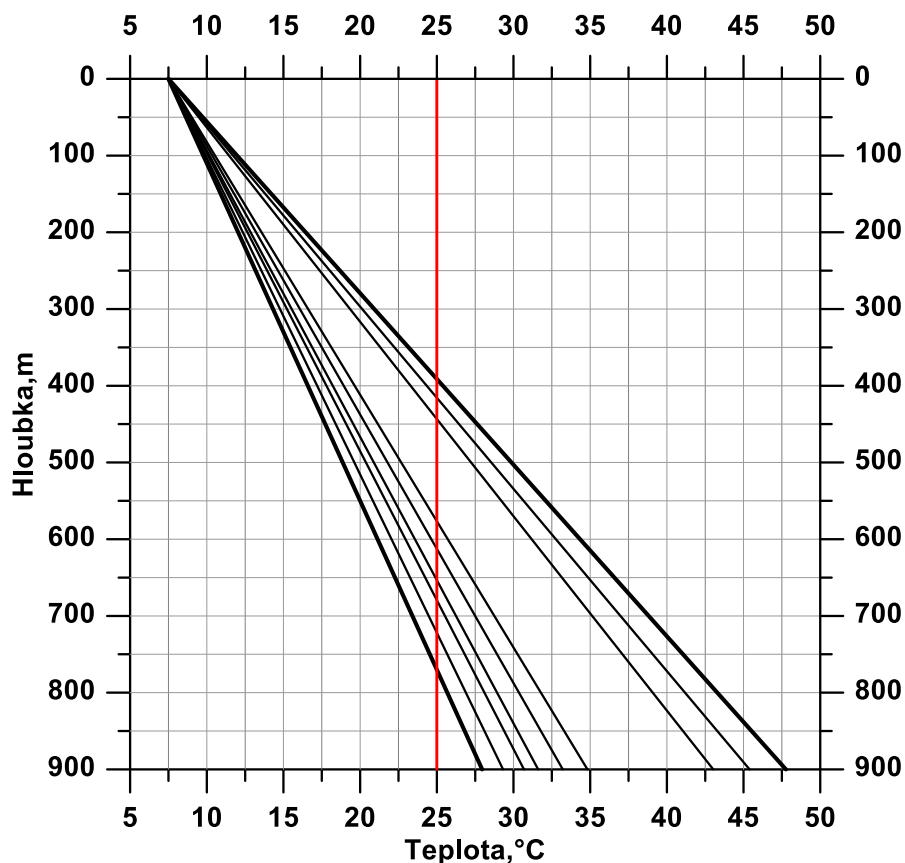
Dle mapy teploty v hloubce 500 m pod povrchem na území ČR (Obr. 11) by se teplota v této hloubkové úrovni na lokalitě Čihadlo mohla pohybovat v rozmezí 18-20 °C, což by výše zmíněné podmínky vyhovovalo. Je však třeba zdůraznit, že uvedená teplotní mapa (Obr. 11) vychází jednak z mapy tepelného toku (Obr. 10), která je založena na omezeném počtu vrtů, a dále pak z průměrných hodnot tepelné vodivosti jednotlivých horninových typů v regionálních geologických celcích. Proto je nutné počítat se značnou mírou nepřesnosti odhadu.



Obr. 11 Schéma izolinií teplot (°C) v úrovni 500 m pod povrchem na území ČR s vyznačením lokality Čihadlo.

Detailnější pohled na podpovrchovou teplotu na lokalitě Čihadlo nabízí prognózy nárůstu teploty s hloubkou (Obr. 12) založené na naměřených hodnotách tepelné vodivosti na dané lokalitě a na zemském tepelném toku vycházejícím z mapy tepelného toku v ČR (Obr. 10). Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné délce (Kubík 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly  $1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což odpovídá nejnižší naměřené hodnotě kolmo na plochu foliace migmatitu,  $2,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což odpovídá průměrné vodivosti granitů a  $3,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což koresponduje s nejvyšší naměřenou hodnotou ve směru foliace migmatitu. Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 75; 80 a  $85 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z výpočtů je patrné, že teplota v hloubce 500 m pod povrchem se pro jednotlivé scénáře pohybuje v rozpětí cca 19-30 °C (Obr. 12).

Dle SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000) je vhodné horninové prostředí pro HÚ VJP definováno jako prostředí s teplotou nižší než 25 °C v místě uložení kontejnerů. V případě kombinace nejnižší tepelné vodivosti ( $1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku ( $85 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) by tato hodnota byla překročena už v hloubce přibližně 400 m a pro kombinaci hodnot  $3,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $75 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  generujících nejnižší teplotní gradient by pak tato hranice byla překročena až v hloubce přibližně 770 m.



Obr. 12 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti na lokalitě Čihadlo.

#### 4.1.6 Závěr

Lokalita Čihadlo se pravděpodobně nachází v místě s mírně nadprůměrnou hustotou zemského tepelného toku a měřené horninové vzorky se vyznačovaly poměrně nízkou (migmatity) až průměrnou (granity) tepelnou produkcí. Tepelná vodivost zkoumaných hornin je v případě granitů průměrná, v případě migmatitů pak značně ovlivněna jejich anizotropií. Na základě modelových výpočtů lze teplotu nižší než 25 °C předpokládat v hloubkách do cca 400–770 m. Z hlediska požadavků kladených na tepelné vlastnosti hostitelských hornin se v případě krnovského granitu lokalita jeví jako potenciálně vhodná pro umístění HÚ VJP, v případě migmatitu se jeví jako problematická nízká tepelná vodivost ve směru kolmém na plochu foliace, která je značně pod limitem uvedeným v SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000). Tento předběžný závěr je však založený na omezeném množství aktuálně dostupných dat a výhradně na povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat, že prezentované poznatky o tepelných vlastnostech lokality Čihadlo jsou zatíženy značnou mírou nejistoty a pro jejich zásadní upřesnění bude třeba provést nová, doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech.

## 5 Horka

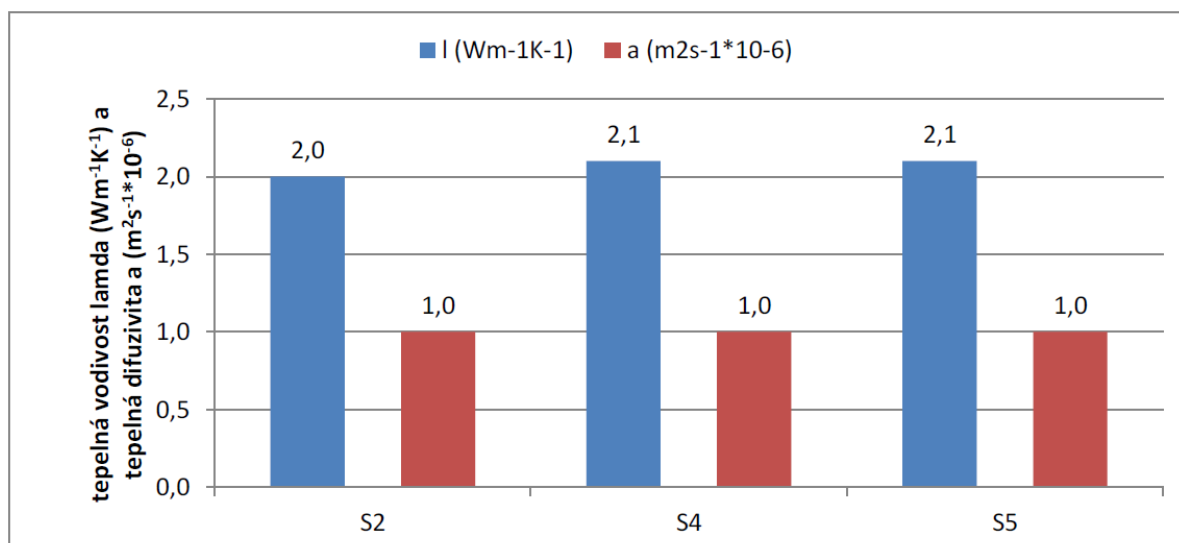
### 5.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 5.1.1 Tepelná vodivost a homogenita tepelné vodivosti

Dostupná data tepelné vodivosti hornin na lokalitě Horka jsou publikována ve zprávě Hanáka et al. (2017). V rámci této studie byly na pracovišti Geofyzikálního ústavu AVČR proměřeny 3 vzorky syenitů třebíčského masivu (S) z lokality Oslavička.

Z Obr. 13 je zřejmé, že v případě všech tří měřených vzorků byly naměřeny téměř shodné hodnoty tepelné vodivosti ( $2\text{--}2,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) i difuzivity ( $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ). Čermák a Rybach (1982) uvádějí průměrnou hodnotu tepelné vodivosti pro syenity  $2,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což dobře koresponduje s naměřenými hodnotami.

Pro horninové prostředí HÚ byla stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin  $>2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Andersson et al. 2000). Syenity na lokalitě Horka tento požadavek nesplňují, nicméně na základě archivních dat vrtné prozkoumanosti (Hanák et al. 2017) lze předpokládat značnou petrografickou variabilitu intruzivních hornin. Proto je možné, že v hloubkách možného uložení bude hodnota tepelné vodivosti podstatně vyšší.



Obr. 13 Tepelná vodivost ( $l$ ) a tepelná difuzivita ( $a$ ) vzorků syenitu – lokalita Horka (převzato z Hanáka et al. 2017).

#### 5.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita nebyla měřena přímo, ale byla vypočtena na stejných vzorcích granitu jako tepelné vodivosti uvedené v předchozí podkapitole. Nejprve byla určena objemová tepelná kapacita jako podíl tepelné vodivosti a difuzivity. Měrná tepelná kapacita  $c$  pak následně byla vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity  $c_V$  a hustoty horninového vzorku.

Dle Tab. 5 jsou hodnoty měrné tepelné kapacity tří vzorků z lokality Horka téměř shodné v rozmezí  $749\text{--}754 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž průměrná hodnota je  $750 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Z hlediska

granitických hornin se jedná o hodnotu průměrnou až podprůměrnou, což je dáno vyšším obsahem živců.

Měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny omezující limity. Tento parametr vstupuje do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 5 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) pro syenity na lokalitě Horka dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty označené jako (AM) jsou aritmetické průměry pro daný horninový typ.

lokality	označení vzorku	$c_v$	$c$
hornina		$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
S - syenit	S2	2080	749
	S4	2082	747
	S9	2108	754
	<b>S (AM)</b>	<b>2090</b>	<b>750</b>

### 5.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Horka byla spočítána tepelná produkce jednak pro syenit, a pak také pro vzorek odebraný z aplitické žíly. Protože však aplit nepatří k základním horninám lokality a na tomto vzorku nebyly stanoveny tepelné vlastnosti, není dále v textu zmiňován. Syenit je všeobecně považován za horninu s vysokou koncentrací radioaktivních izotopů. Fiala et al. (1982) uvádí pro durbachity třebíčského masivu koncentraci U v rozmezí 6,5–18,2 ppm, Th 31,7–56,6 ppm a K 4,9–5,2 %. Průměrné hodnoty koncentrací naměřené na vzorcích ze zájmové lokality jsou následující: eU(Ra) 19 ppm, eTh 41,7 ppm a K 5,62 %. To je v případě U a K nad horní hranici výše zmíněného intervalu hodnot koncentrací v durbachitech třebíčského masivu.

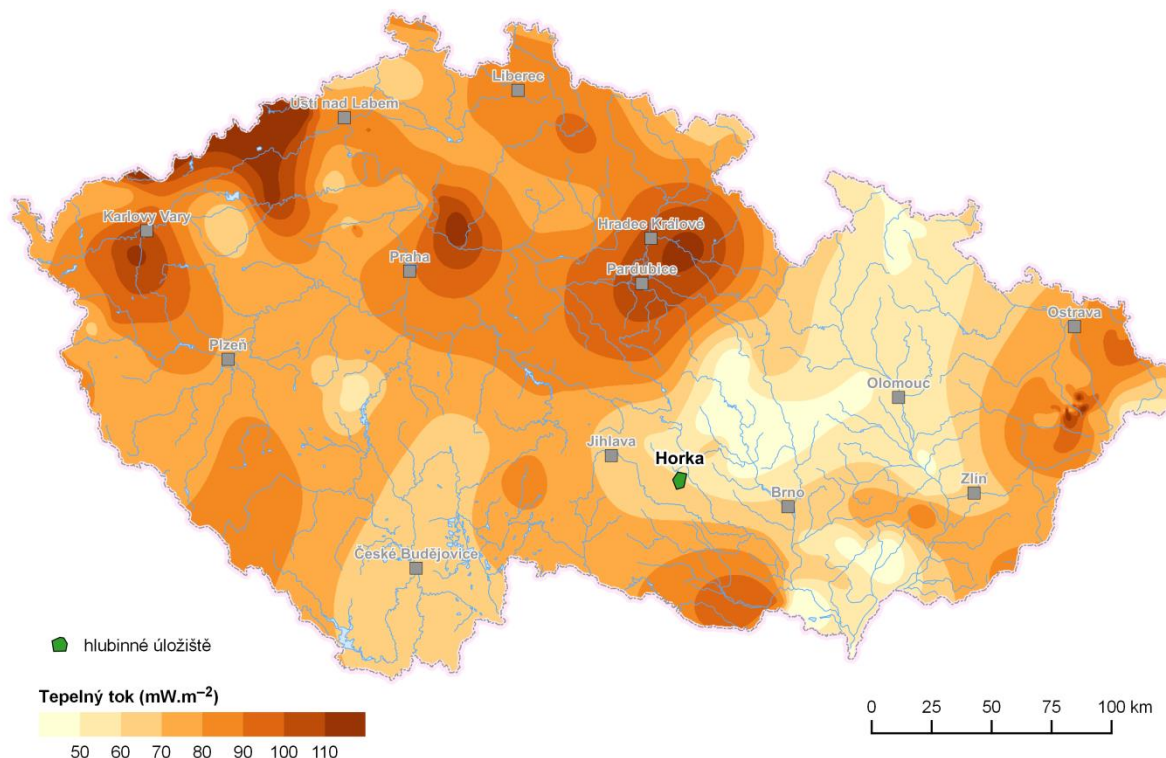
Z výše uvedeného také pramení velmi vysoká tepelná produkce, jejíž průměrná hodnota dosáhla  $8,7 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ . Čermák a Rybach (1982) uvádějí průměrnou hodnotu tepelné produkce syenitů českého masivu  $5,3 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ . Z tohoto pohledu se jeví tepelná produkce hornin na lokality Horka jako anomální.

### 5.1.4 Tepelný tok

Hustotu tepelného toku produkovaného horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků a postupným chladnutím Země lze určit z naměřeného teplotního gradientu ve vrtech a tepelné vodivosti hornin vrtem zastižených. Podle Čermáka (1979) je hodnota průměrného tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu 80-100  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  jsou vázány na vyšší radioaktivitu variských granitů smrčinsko-krušnohorského batolitu a krkonoško-jizerského kompozitního masivu (Obr. 14).

Dle mapy na Obr. 14 leží lokalita Horka pravděpodobně v území s podprůměrným tepelným tokem okolo  $60 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Uvážíme-li výše uvedenou tepelnou produkci syenitu, tak by byl po odečtení vlivu horninového masivu v nadloží tepelný tok v hloubce 500 m nižší o přibližně  $4\text{--}5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Je třeba si však uvědomit, že mapa vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota pro tepelný tok pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.

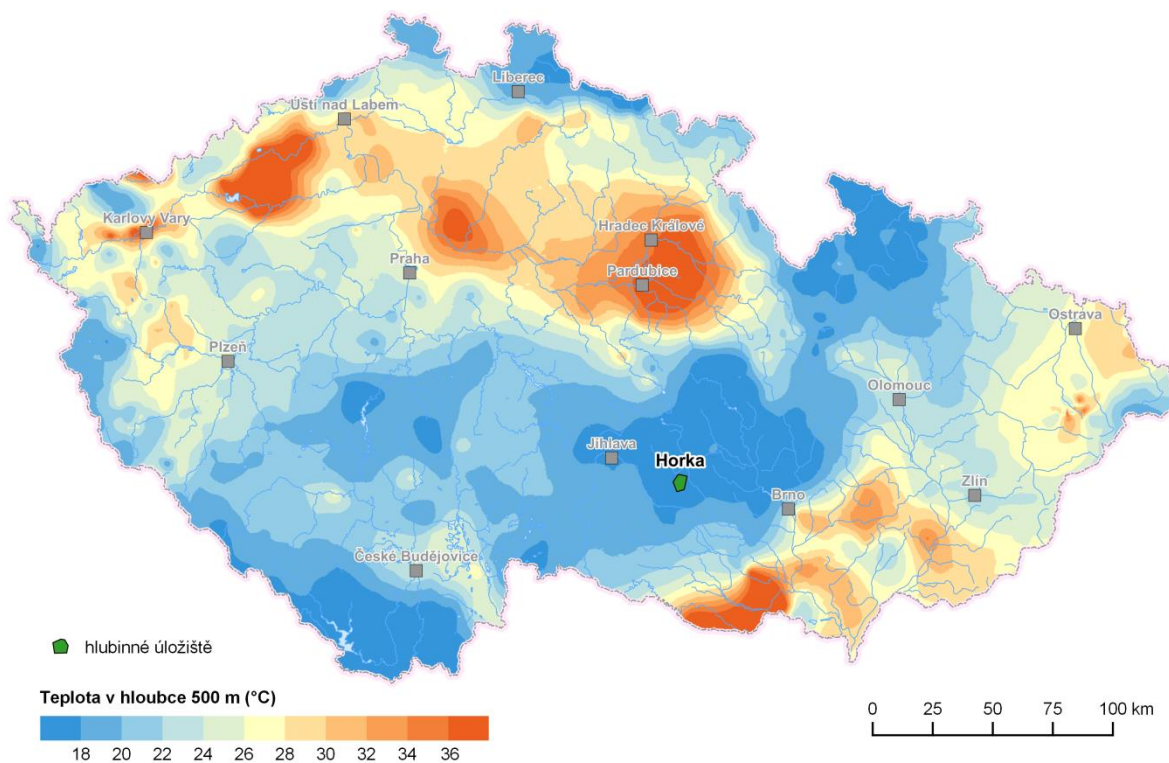


Obr. 14 Mapa tepelného toku ČR s vyznačením zájmové lokality.

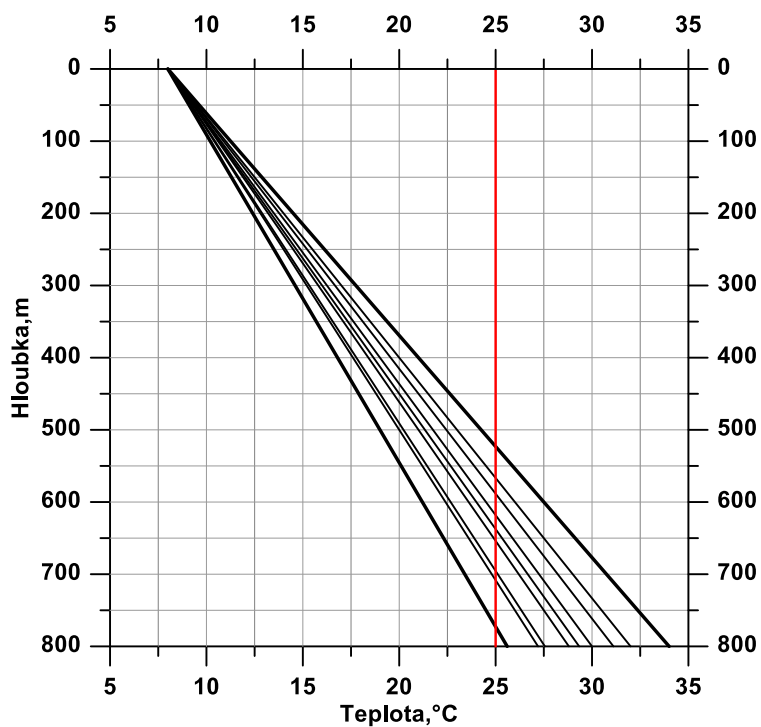
### 5.1.5 Teplota horninového prostředí

Andersson et al. (2000) v SKB Technical Report TR-00-12 definují vhodné horninové prostředí pro úložiště VJP jako prostředí s teplotou  $<25 \text{ }^\circ\text{C}$  v místě uložení kontejnerů.

Na Obr. 15 je znázorněna mapa izoterm v hloubce 500 m pod povrchem. Z mapy je zřejmé, že v zájmové lokalitě teplota v hloubce 500 m mohla být nižší než  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zde je třeba si však uvědomit, že zmíněná mapa vychází jednak z výše uvedené mapy tepelného toku a pak z obvyklých hodnot tepelné vodivosti pro daný typ horniny. Vzhledem k počtu vrtů použitých pro tvorbu map a zjednodušení zavedením průměrných hodnot tepelné vodivosti pro regionální geologické celky je třeba v případě takto detailních studií počítat se značnou mírou nepřesnosti.



Obr. 15 Schéma izolinií teplot (°C) v úrovni 500 m pod povrchem na území ČR s vyznačením zájmové lokality.



Obr. 16 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti.



Na Obr. 16 je znázorněno několik možných scénářů nárůstu teploty s hloubkou, které vycházejí z naměřených hodnot tepelné vodivosti na dané lokalitě. Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné délce (Kubík 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly 2; 2,25 a 2,5  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , přičemž nejnižší hodnota korespondovala s nejnižší naměřenou hodnotou a nejvyšší pak brala v úvahu možný nárůst vodivosti díky změně petrologie intruzivních hornin. Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 55; 60 a 65  $mW \cdot m^{-2}$ . Jak je z obrázku patrné, teplota 25 °C (červená čára) by v případě nejnižší tepelné vodivosti ( $2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku ( $65 W/m^2$ ) byla překročena v hloubce cca 520 m. Naopak pro hodnoty 2,5  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  a 55  $W/m^2$  je tato hranice překročena až v hloubce zhruba 780 m. Je patrné, že modelované teploty v hloubce 500 m jsou o něco vyšší než predikce vycházející z výše uvedené mapy, což je dáno nízkou naměřenou tepelnou vodivostí syenitu.

### 5.1.6 Závěr

Lokalita Horka se nachází pravděpodobně v místě s podprůměrnou hustotou tepelného toku a vzorky syenitu vykazují anomální hodnoty tepelné produkce. Naměřené hodnoty tepelné vodivosti byly podstatně nižší než preferovaná hodnota pro horninové prostředí HÚ. Zde je však třeba počítat s velkou variabilitou tepelných vlastností intruzivních hornin třebíčského masivu a nelze tak tuto lokalitu na základě několika měření z povrchových výchozů diskvalifikovat. Na základě výše popsaného modelu pak lze předpokládat teplotu  $<25^{\circ}C$  v hloubkách do 500–800 m a z hlediska teplotního se lokalita jeví jako potenciálně vhodná pro umístění HÚ VJP. Tento předběžný závěr je ale založený na aktuálně dostupných datech a pouze povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat značnou míru nejistoty a pro zásadní upřesnění bude třeba provést nová doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech.

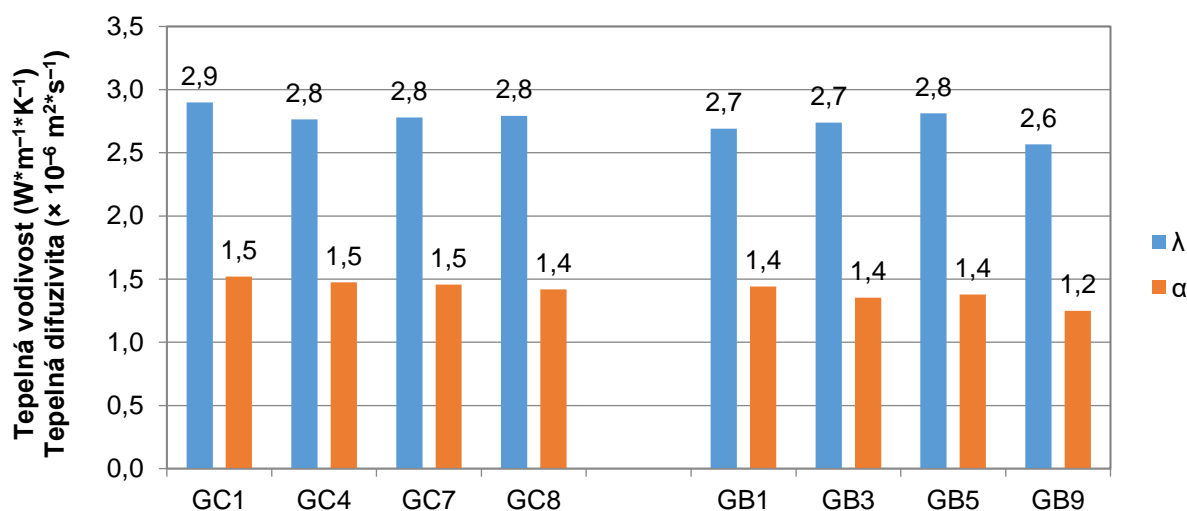
## 6 Hrádek

### 6.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 6.1.1 Tepelná vodivost a tepelná difuzivita

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita hornin na lokalitě Hrádek byla měřena na Oddělení geotermiky Geofyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i. na čtyřech vzorcích granitu typu Čeřínek (GC – ID 1551; vzorky GC1, GC4, GC7, GC8) z odběrové lokality Bromberg a na čtyřech vzorcích drobnozrnného muskovit-biotického granitu typu Boršov (GB – ID 1554; vzorky GB1, GB3, GB5, GB9) z odběrové lokality Boršov lom. Naměřené údaje byly publikovány ve zprávě Hanáka et al. (2017).

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita granitu se vyznačuje nízkým rozpětím hodnot, které pro celý soubor studovaných vzorků činí  $2,6\text{--}2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,2\text{--}1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  s aritmetickými průměry  $2,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  (Obr. 17). U granitů typu Čeřínek oba tepelné parametry dosahují mírně vyšších hodnot než u granitů typu Boršov. Jejich průměrná tepelná vodivost a tepelná difuzivita je  $2,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , zatímco v případě granitů typu Boršov dosahují průměrné hodnoty  $2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . Čermák a Rybach (1982) uvádí průměrnou hodnotu tepelné vodivosti granitů  $3,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , Sundberg et al. 2008 pak uvádí interval tepelné vodivosti křemenných intruziv  $2,8\text{--}3,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . S přihlédnutím k výše uvedenému, ale také k dlouhodobým výsledkům měření tepelných vlastností granitů v laboratoři Geofyzikálního ústavu lze konstatovat, že hodnoty tepelné vodivosti a tepelné difuzivity granitů typu Čeřínek i Boršov jsou mírně podprůměrné.



Obr. 17 Tepelná vodivost ( $\lambda$ ) a tepelná difuzivita ( $\alpha$ ) granitů typu Čeřínek (GC) a Boršov (GB) na lokalitě Hrádek dle Hanáka et al. (2017).

Dle SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000) byla pro horninové prostředí HÚ stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin vyšší než  $2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což všechny vzorky studované na lokalitě Hrádek splňují.

### 6.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita hornin na lokalitě Hrádek byla stanovena nepřímo na základě znalosti tepelné vodivosti, tepelné difuzivity a hustoty čtyř vzorků granitu typu Čeřínek (GC1, GC4, GC7, GC8) z odběrové lokality Bromberg a čtyř vzorků drobnozrnného muskovit-biotitického granitu typu Boršov (GB1, GB3, GB5, GB9) z odběrové lokality Boršov lom. Nejprve byla určena objemová tepelná kapacita jako podíl tepelné vodivosti a tepelné difuzivity. Měrná tepelná kapacita byla následně vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity a hustoty horninového vzorku.

Objemová a měrná tepelná kapacita granitu se pohybuje v poměrně úzkém rozpětí 1869-2055  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 707–776  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž aritmetické průměry dosahují 1957  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 740  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Tab. 6). Tepelná kapacita granitu typu Čeřínek je mírně nižší než v případě granitu typu Boršov a má užší rozpětí hodnot. U typu Čeřínek dosahuje objemová a měrná tepelná kapacita hodnot 1877–1968  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 709–744  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  s aritmetickým průměrem 1915  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 724  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , zatímco u typu Boršov příslušné hodnoty činí 1869-2055  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 707–776  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  s aritmetickým průměrem 1998  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 755  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Tab. 6). Hodnoty měrné tepelné kapacity granitů při teplotě kolem 20 °C uváděné v literatuře jsou převážně v rozmezí 750–850  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (tzb-info.cz, Ražnjevič 1969, Eppelbaum et al. 2014). Z tohoto hlediska lze tudíž měrnou tepelnou kapacitu granitů typu Čeřínek označit jako podprůměrnou a v případě granitů typu Boršov jako průměrnou při dolní hranici intervalu.

Objemová a měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny žádné omezující limity. Tyto parametry vstupují do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 6 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) granitů typu Čeřínek (GC) a Boršov (GB) na lokalitě Hrádek dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty s označením (AM) jsou aritmetické průměry.

lokality	označení vzorku	$c_v$	$c$
hornina		$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
GC – granit typu Čeřínek	GC1	1907	720
	GC4	1877	709
	GC7	1909	722
	GC8	1968	744
	GC (AM)	1915	724
GB – granit typu Boršov	GB1	1869	707
	GB3	2027	766
	GB5	2042	772
	GB9	2055	776
	GB (AM)	1998	755

### 6.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Hrádek byla spočítána tepelná produkce jak pro základní hodnocenou horninu, granit typu Čeřínek a jemu blízký granit typu Boršov, tak pro migmatit (M – ID 1302) z odběrové lokality Milíčov. Obsahy přirozených radioaktivních prvků dosahují u všech horninových typů průměrných hodnot a výrazně se neliší. U granitů dosahují průměrné obsahy eU(Ra) 6,9–9 ppm, eTh 13,6–19,3 ppm a K 4,01–4,11 %, čemuž odpovídá vypočtená průměrná tepelná produkce 3,5–3,6  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ . U migmatitu jsou průměrné koncentrace radioaktivních izotopů mírně nižší v případě uranu a draslíku a vypočtená průměrná tepelná produkce činí 2,9  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (Tab. 7). Tepelnou produkci hodnocených hornin lze tak označit za průměrnou, neboť je blízká typické tepelné produkci granitu, jež se pohybuje okolo 3  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (Wedepohl 1969; Vaňková et al. 1979; Rybach a Čermák 1982)

Tab. 7 Průměrný obsah uranu (U, eU(Ra)), thoria (eTh) a draslíku (K) v horninách zastoupených na lokalitě Hrádek dle Hanáka et al. (2017).

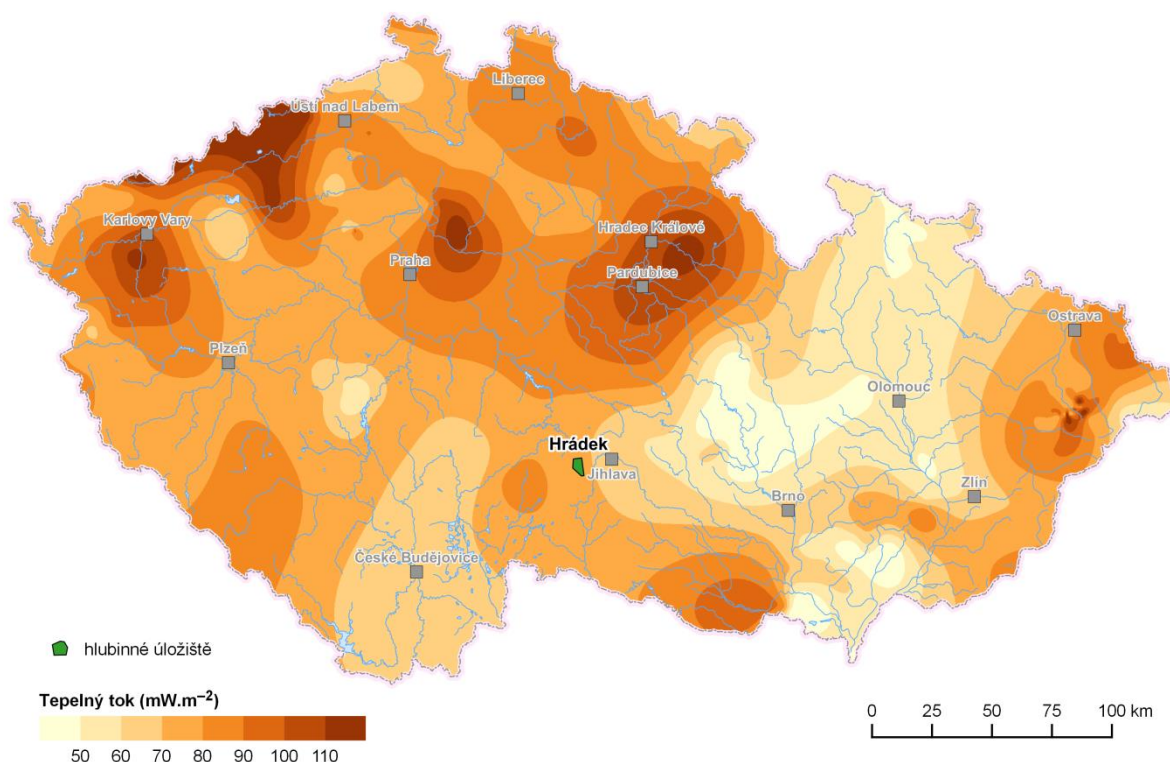
Hornina	U (ppm)	eU(Ra) (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Tepelná produkce ( $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ )
GC – granit typu Čeřínek	8,5	9,0	13,6	4,01	3,6
GB – granit typu Boršov	7,0	6,9	19,3	4,11	3,5
M - migmatit	2,1	4,9	18,4	3,19	2,9

### 6.1.4 Tepelný tok

Hustotu tepelného toku produkovaného horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků a postupným chladnutím Země lze určit z naměřeného teplotního gradientu ve vrtech a tepelné vodivosti hornin vrtem zastížených. Podle Čermáka (1979) je průměrná hodnota tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu ( $80\text{--}100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) jsou vázány na vyšší radioaktivitu variských granitů smrčinsko-krušnohorského batolitu a krkonoško-jizerského kompozitního masivu (Obr. 18).

Dle mapy tepelného toku v ČR (Obr. 18) leží lokalita Hrádek pravděpodobně v území s průměrným až mírně nadprůměrným tepelným tokem cca  $70\text{--}75 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Uvážíme-li výše uvedenou tepelnou produkci granitů, tak by byl po odečtení vlivu horninového masivu v nadloží tepelný tok v hloubce 500 m nižší o přibližně  $1\text{--}2 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ , což je zanedbatelné.

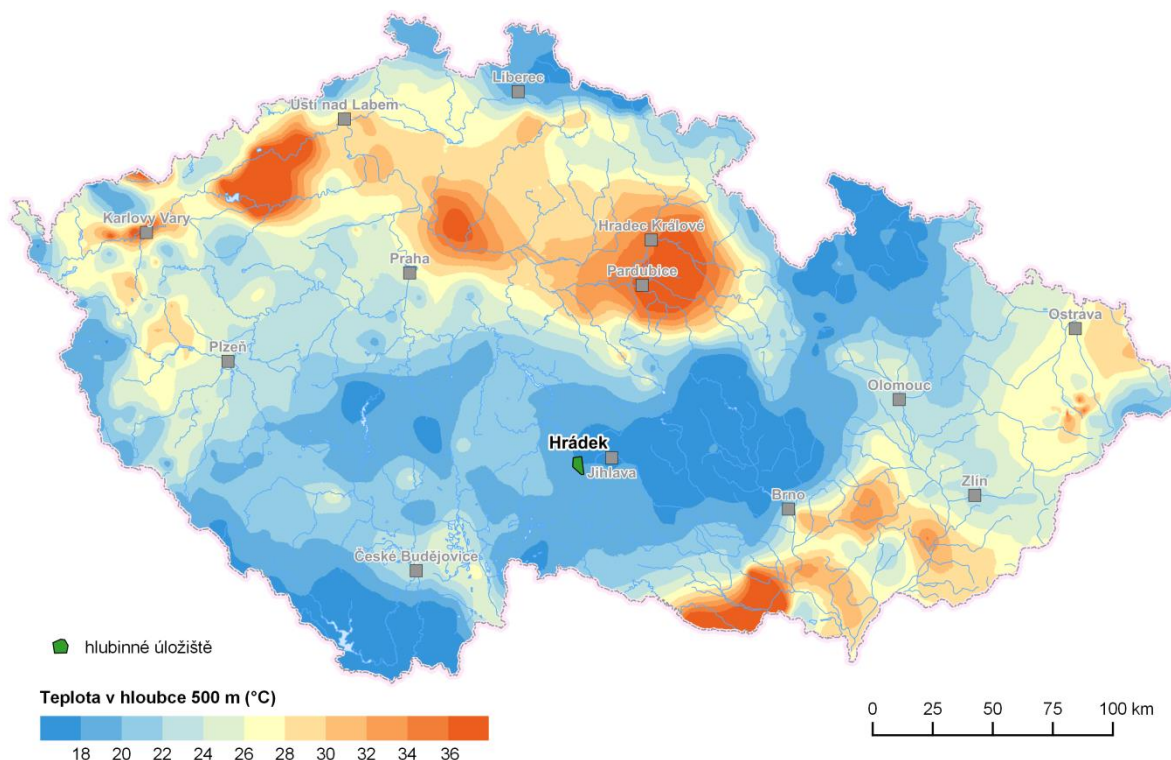
Je však nutné zdůraznit, že uvedená mapa vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota zemského tepelného toku pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.



Obr. 18 Mapa tepelného toku v ČR s vyznačením lokality Hrádek.

### 6.1.5 Teplota horninového prostředí

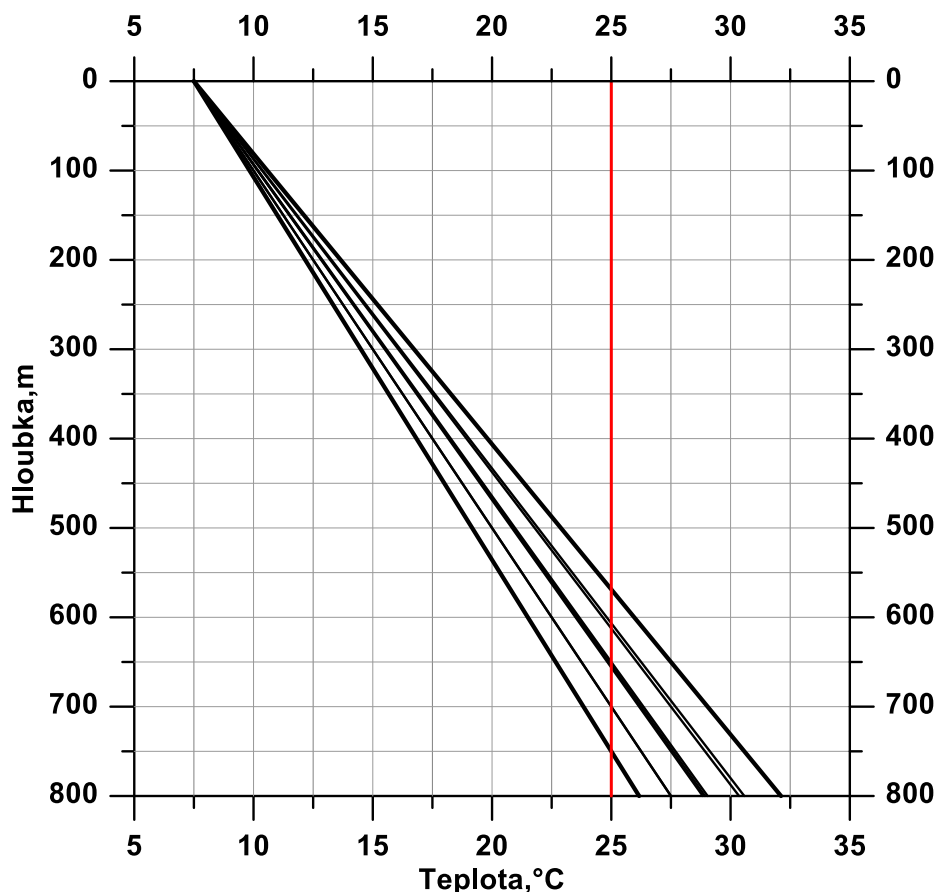
Dle mapy teploty v hloubce 500 m pod povrchem na území ČR (Obr. 19) by se teplota v této hloubkové úrovni na lokalitě Hrádek mohla pohybovat okolo 17–19 °C. Je však třeba zdůraznit, že uvedená teplotní mapa (Obr. 19) vychází jednak z mapy tepelného toku (Obr. 18), která je založena na omezeném počtu vrtů, a dále pak z průměrných hodnot tepelné vodivosti jednotlivých horninových typů v dílčích regionálně geologických jednotkách. Proto je nutné počítat se značnou mírou nepřesnosti odhadu.



Obr. 19 Mapa teploty v hloubce 500 m pod povrchem v ČR s vyznačením lokality Hrádek.

Detailnější pohled na podpovrchovou teplotu na lokalitě Hrádek nabízí scénáře nárůstu teploty s hloubkou (Obr. 20) založené na naměřených hodnotách tepelné vodivosti na dané lokalitě a na zemském tepelném toku vycházejícím z mapy tepelného toku v ČR (Obr. 18). Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné délce (Kubík 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly 2,6; 2,8 a 3,0  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , přičemž hodnota 2,6  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  odpovídá nejnižší naměřené tepelné vodivosti a hodnoty 2,8 a 3,0  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  berou v úvahu celkové rozpětí tepelné vodivosti měřených vzorků a taktéž možný nárůst vodivosti v neporušené části horninového masivu. Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 70, 75 a 80  $mW \cdot m^{-2}$ . Z výpočtů je patrné, že teplota v hloubce 500 m pod povrchem se pro jednotlivé scénáře pohybuje přibližně v rozpětí cca 19-23 °C (Obr. 20).

Dle SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000) je vhodné horninové prostředí pro HÚ VJP definováno jako prostředí s teplotou nižší než 25 °C v místě uložení kontejnerů. V případě kombinace nejnižší tepelné vodivosti (2,6  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku (80  $mW \cdot m^{-2}$ ) by tato hodnota byla překročena až v hloubce cca 570 m a pro kombinaci hodnot 3,0  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  a 70  $mW \cdot m^{-2}$  generujících nejnižší teplotní gradient by tato hranice byla překročena až v hloubce cca 750 m (Obr. 20).



Obr. 20 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti na lokalitě Hrádek.

### 6.1.6 Závěr

Lokalita Hrádek se vyznačuje slabě podprůměrnou tepelnou vodivostí hornin a pravděpodobně se nachází v místě s průměrnou až mírně nadprůměrnou hustotou zemského tepelného toku. Tepelná produkce posuzovaných horninových vzorků je průměrná. Na základě modelových výpočtů lze teplotu nižší než 25 °C předpokládat v hloubkách do cca 570–750 m. Z hlediska požadavků kladených na tepelné vlastnosti hostitelských hornin se tudíž lokalita jeví jako potenciálně vhodná pro umístění HÚ VJP. Tento předběžný závěr je však založený na omezeném množství aktuálně dostupných dat a výhradně na povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat, že prezentované poznatky o tepelných vlastnostech lokality Hrádek jsou zatíženy značnou mírou nejistoty a pro jejich zásadní upřesnění bude třeba provést nová, doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech.

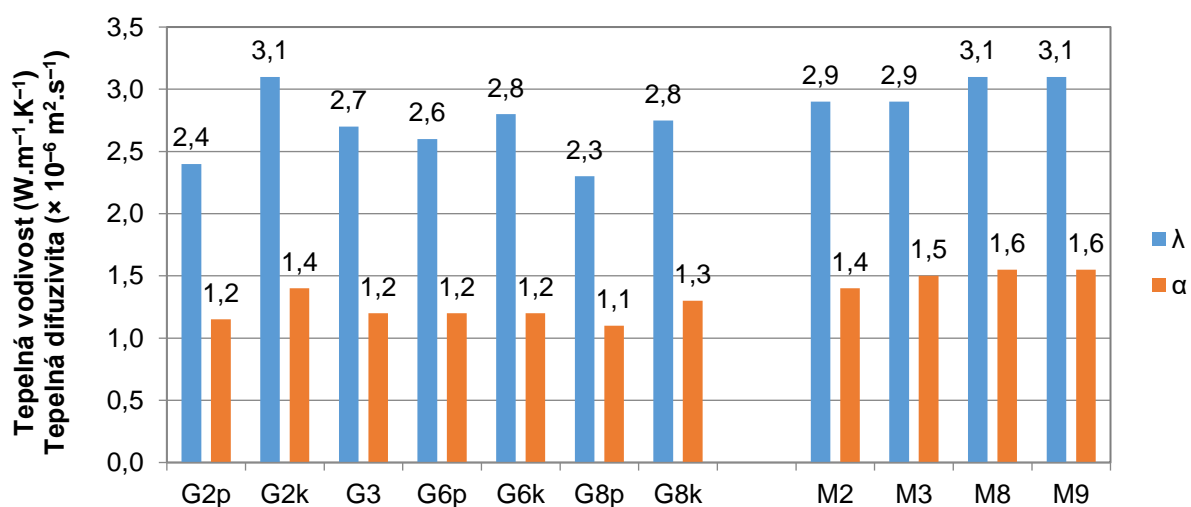
## 7 Kraví hora

### 7.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 7.1.1 Tepelná vodivost a tepelná difuzivita

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita hornin na lokalitě Kraví hora byla měřena na Oddělení geotermiky Geofyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i. na čtyřech vzorcích granulitu (G2, G3, G6, G8) z odběrové lokality Moravecké Pavlovice a na čtyřech vzorcích migmatitu v načervenalé (M2, M3) a modrošedé varietě (M8, M9) z odběrové lokality Věžná. Naměřené údaje byly publikovány ve zprávě Hanáka et al. (2017).

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita granulitů se vyznačuje poměrně velkým rozpětím hodnot  $2,3\text{--}3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,1\text{--}1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , přičemž jejich aritmetické průměry činí  $2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  (Obr. 21). To je dáno anizotropií jejich tepelných vlastností v závislosti na směru foliace či prostorovém uspořádání minerálních zrn, přičemž tepelná vodivost měřená kolmo na plochu foliace dosahuje hodnot  $2,3\text{--}2,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (průměr  $2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), zatímco ve směru foliace činí  $2,8\text{--}3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (průměr  $2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Rovněž v případě tepelné difuzivity je rozdíl zřejmý, neboť vzorky měřené kolmo na plochu foliace dosahují hodnot  $1,1\text{--}1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  (průměr  $1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ), zatímco ve směru foliace je difuzivita mírně vyšší,  $1,2\text{--}1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  (průměr  $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ).



Obr. 21 Tepelná vodivost ( $\lambda$ ) a tepelná difuzivita ( $\alpha$ ) granulitu (G) a migmatitu (M) na lokalitě Kraví hora dle Hanáka et al. (2017). Vzorky s označením p byly měřeny kolmo na foliaci, vzorky s označením k odpovídají měřením rovnoběžným s foliací.

Tepelná vodivost a tepelná difuzivita migmatitů má výrazně nižší rozpětí hodnot než v případě granulitů,  $2,9\text{--}3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,4\text{--}1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , přičemž jejich aritmetické průměry činí  $3,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  (Obr. 21). Na rozdíl od granulitů se totiž migmatity z hlediska tepelných vlastností chovají izotropně, což je značně netypické. Zřejmý rozdíl je však mezi načervenalou (M2, M3) a modrošedou (M8, M9) varietou. Načervenalé migmatity mají průměrnou tepelnou vodivost  $2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a tepelnou difuzivitu  $1,45 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , zatímco migmatity modrošedé dosahují průměrných hodnot  $3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . Dle Čermák a Rybach (1982) i dle dlouholetých zkušeností s měřením hornin podobného typu



v laboratoři Geofyzikálního ústavu, lze považovat naměřené hodnoty pro daný typ horniny za průměrné až mírně nadprůměrné.

Dle SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000) byla pro horninové prostředí HÚ stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin vyšší než  $2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což většina studovaných vzorků splňuje. V případě dvou vzorků granulitu (G2p, G8p) měřených kolmo na foliaci však bylo dosaženo mírně podlimitních hodnot (Obr. 21).

### 7.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita hornin na lokalitě Kraví hora byla stanovena nepřímo na základě znalosti tepelné vodivosti, tepelné difuzivity a hustoty čtyř vzorků granulitu (G2, G3, G6, G8) z odběrové lokality Moravecké Pavlovice a čtyř vzorků migmatitu (M2, M3, M8, M9) z odběrové lokality Věžná. Nejprve byla určena objemová tepelná kapacita jako podíl tepelné vodivosti a tepelné difuzivity. Měrná tepelná kapacita byla následně vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity a hustoty horninového vzorku.

Objemová a měrná tepelná kapacita vzorků granulitu se pohybuje v poměrně širokém rozmezí  $2087\text{--}2333 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $776\text{--}872 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž jejich aritmetické průměry dosahují  $2180 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $817 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Tab. 8). U vzorků migmatitu dosahuje objemová a měrná tepelná kapacita nižších hodnot než u granulitu a rozpětí naměřených hodnot je užší,  $1933\text{--}2071 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $725\text{--}782 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž aritmetické průměry dosahují  $2001 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $754 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Objemová a měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny žádné omezující limity. Tyto parametry vstupují do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 8 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) granulitu a migmatitu na lokalitě Kraví hora dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty s označením (AM) jsou aritmetické průměry.

lokality	označení vzorku	$c_v$	$c$
hornina		$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
G - granulit	G2p	2087	788
	G2k	2214	836
	G3	2250	840
	G6p	2167	810
	G6k	2333	872
	G8p	2091	776
	G8k	2115	785
	G (AM)	2180	817
M - migmatit	M2	2071	782
	M3	1933	725
	M8	2000	755
	M9	2000	755
	M (AM)	2001	754

### 7.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Kraví hora byla spočítána tepelná produkce jak pro základní hodnocenou horninu, granulit, tak pro okolní horniny reprezentované migmatitem, amfibolitem a hadcem. Protože na vzorcích hadce a amfibolitu nebyly měřeny tepelné vlastnosti, byly tyto horniny z dalšího zpracování vyřazeny. U granulitu a migmatitu dosahují průměrné obsahy  $eU(Ra)$  3,4 a 5,2 ppm,  $eTh$  11 a 14,9 ppm a K 3,88 a 4,02 %, čemuž odpovídá vypočtená průměrná tepelná produkce 2,3–2,5  $\mu W \cdot m^{-3}$  (Tab. 9). Tepelnou produkci hodnocených hornin lze ve vztahu k horninovému typu dle Čermák a Rybach (1982) označit jako nadprůměrnou v případě granulitů a průměrnou v případě migmatitů. Pokud však budeme tepelnou produkci uvedených hornin hodnotit z hlediska vlivu na tepelný tok zájmové lokality, lze ji označit jako nízkou.

Tab. 9 Průměrný obsah uranu (U,  $eU(Ra)$ ), thoria ( $eTh$ ) a draslíku (K) v horninách zastoupených na lokalitě Kraví hora dle Hanáka et al. (2017).

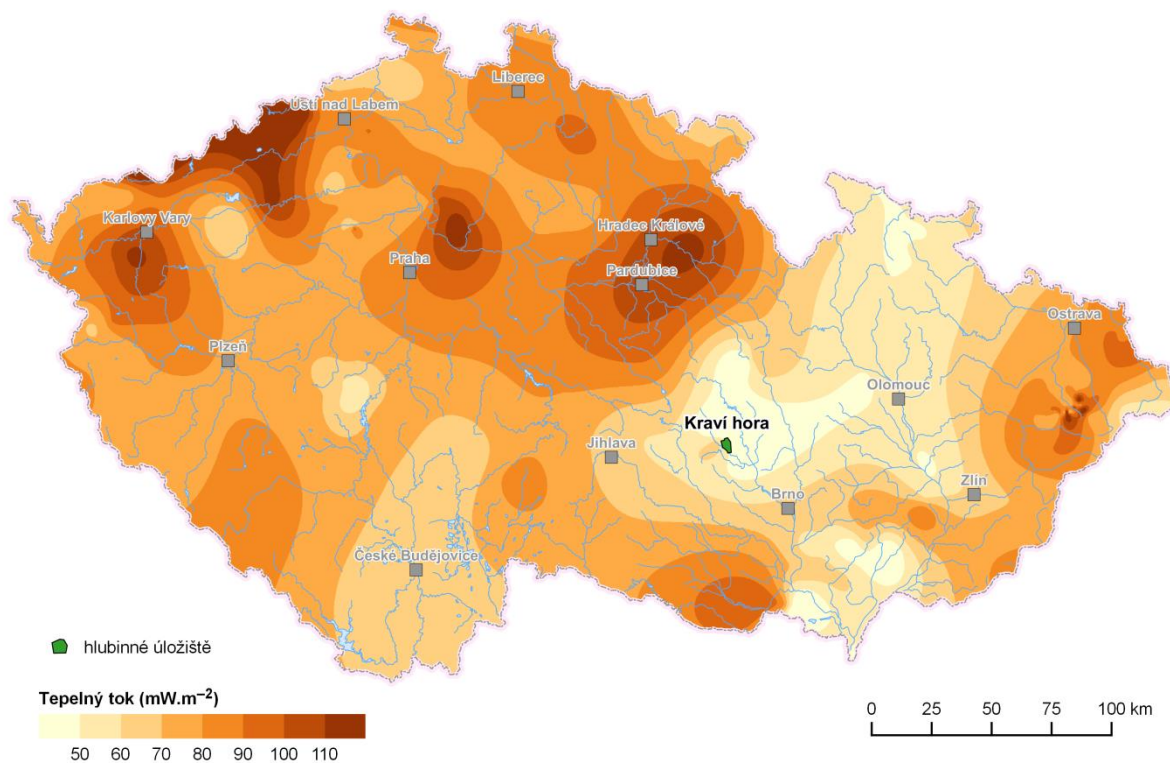
Hornina	U (ppm)	$eU(Ra)$ (ppm)	$eTh$ (ppm)	K (%)	Tepelná produkce ( $\mu W \cdot m^{-3}$ )
G – granulit	3,6	3,4	14,9	3,88	2,3
M – migmatit	5,4	5,2	11	4,02	2,5
H – hadec	2,1	1,5	0,1	0,01	0,4
A – amfibolit	0,6	0,8	1,5	0,92	0,4

### 7.1.4 Tepelný tok

Hustotu tepelného toku produkovaného horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků a postupným chladnutím Země lze určit z naměřeného teplotního gradientu ve vrtech a tepelné vodivosti hornin vrtem zastížených. Podle Čermáka (1979) je průměrná hodnota tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu ( $80\text{--}100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ) jsou vázány na vyšší radioaktivitu variských granitů smrčinsko-krušnohorského batolitu a krkonoško-jizerského kompozitního masivu (Obr. 22).

Dle mapy tepelného toku v ČR (Obr. 22) leží lokalita Kraví hora pravděpodobně v území s podprůměrným tepelným tokem cca  $50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Uvážíme-li výše uvedenou tepelnou produkci, tak by byl po odečtení vlivu horninového masivu v nadloží tepelný tok v hloubce 500 m nižší přibližně o hodnotu mírně nad  $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , což je zanedbatelné.

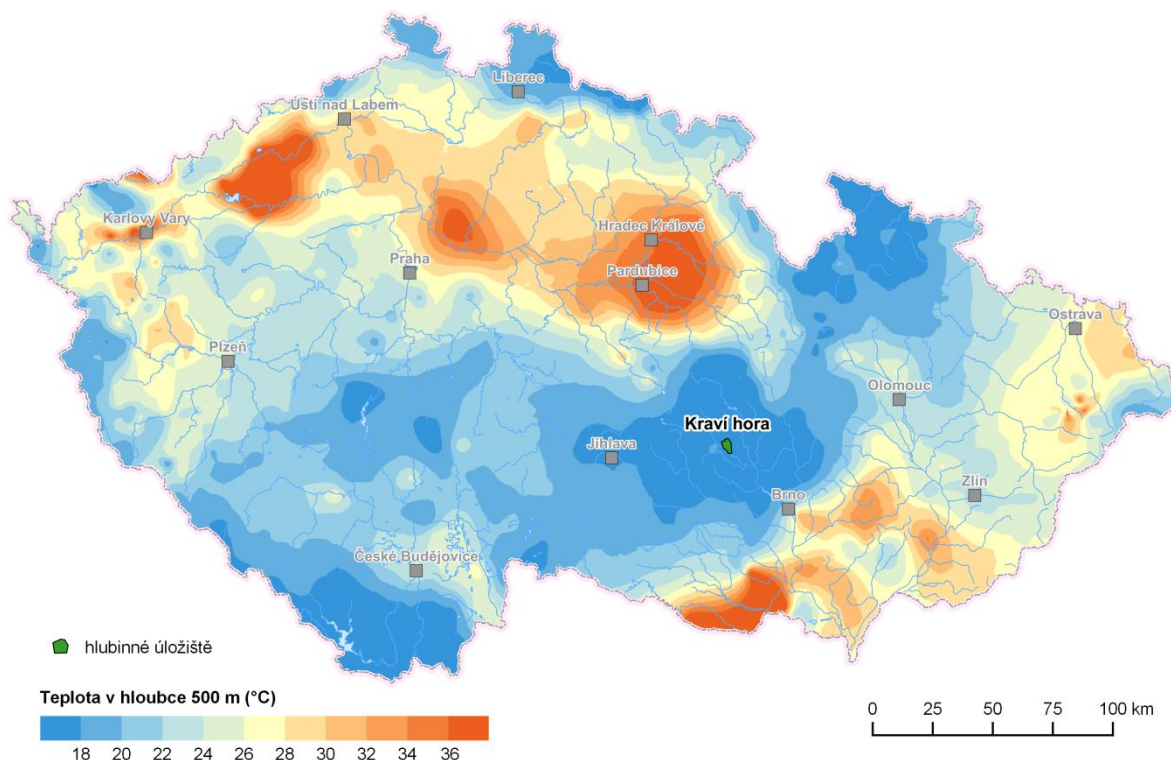
Je však nutné zdůraznit, že uvedená mapa vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota zemského tepelného toku pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.



Obr. 22 Mapa tepelného toku v ČR s vyznačením lokality Kraví hora.

### 7.1.5 Teplota horninového prostředí

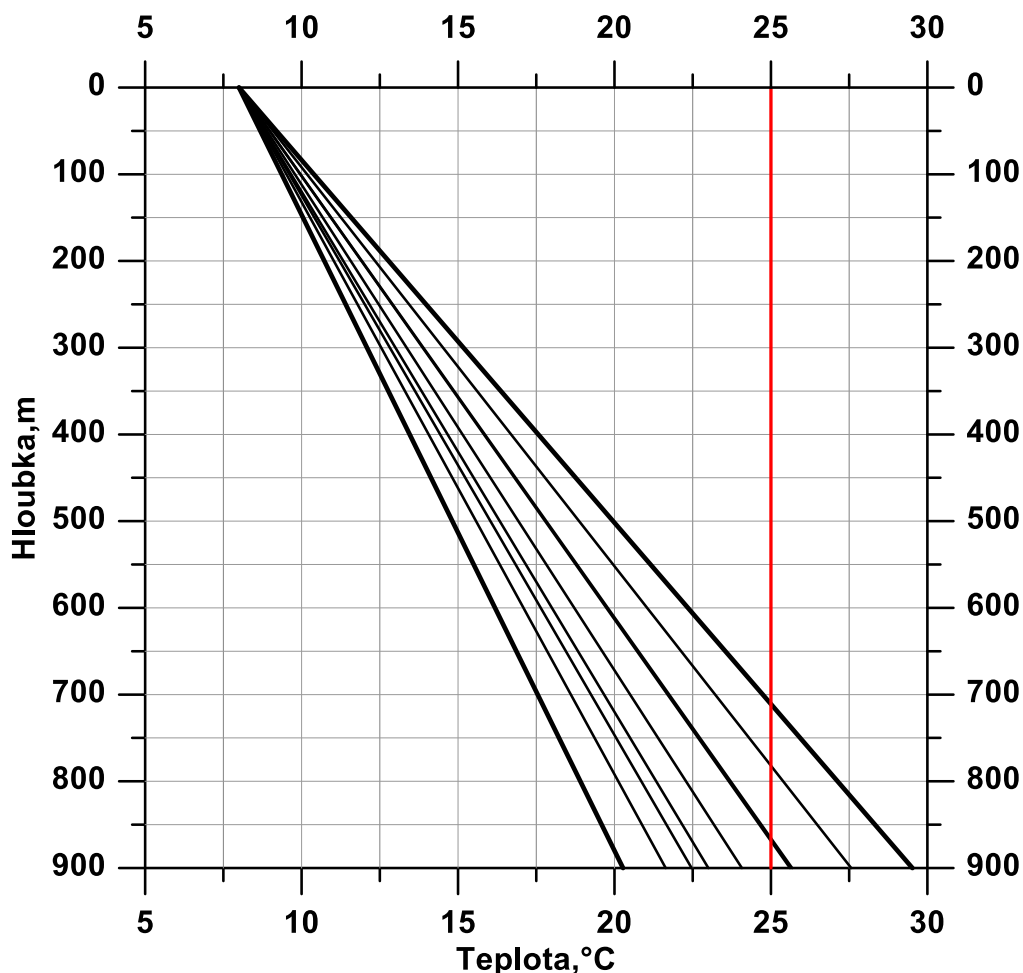
Dle mapy teploty v hloubce 500 m pod povrchem na území ČR (Obr. 23) by se teplota v této hloubkové úrovni na lokalitě Kraví hora měla pohybovat pod  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Je však třeba zdůraznit, že uvedená teplotní mapa vychází jednak z mapy tepelného toku (Obr. 22), která je založena na omezeném počtu vrtů, a dále pak z průměrných hodnot tepelné vodivosti jednotlivých horninových typů v dílčích regionálně geologických jednotkách. Proto je nutné počítat se značnou mírou nepřesnosti odhadu.



Obr. 23 Mapa teploty v hloubce 500 m pod povrchem v ČR (s vyznačením lokality Kraví hora).

Detailnější pohled na podpovrchovou teplotu na lokalitě Kraví hora nabízí scénáře nárůstu teploty s hloubkou (Obr. 23) založené na naměřených hodnotách tepelné vodivosti na dané lokalitě a na zemském tepelném toku vycházejícím z mapy tepelného toku v ČR (Obr. 22). Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné délce (Kubík 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly 2,3; 2,8 a 3,3  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , přičemž hodnota 2,3  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  odpovídá nejnižší naměřené tepelné vodivosti ve směru kolmém na plochu foliace granulitu a hodnoty 2,8 a 3,3  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  berou v úvahu celkové rozpětí tepelné vodivosti měřených vzorků a taktéž možný nárůst vodivosti v neporušené části horninového masivu. Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 45, 50 a 55  $mW \cdot m^{-2}$ . Z výpočtů je patrné, že teplota v hloubce 500 m pod povrchem se pro jednotlivé scénáře pohybuje v rozpětí cca 15–20 °C (Obr. 24).

Dle SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000) je vhodné horninové prostředí pro HÚ VJP definováno jako prostředí s teplotou nižší než 25 °C v místě uložení kontejnerů. V případě kombinace nejnižší tepelné vodivosti (2,3  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku (55  $mW \cdot m^{-2}$ ) by tato hodnota byla překročena až v hloubce cca 720 m a pro kombinaci hodnot 3,3  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  a 45  $mW \cdot m^{-2}$  generujících nejnižší teplotní gradient by tato hranice byla překročena až v hloubce cca 1260 m.



Obr. 24 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti na lokalitě Kraví hora.

### 7.1.6 Závěr

Lokalita Kraví hora se pravděpodobně nachází v místě s podprůměrnou hustotou zemského tepelného toku a měřené horninové vzorky se vyznačovaly poměrně nízkou tepelnou produkcí. Tepelná vodivost zkoumaných hornin je průměrná, v případě granulitů značně ovlivněna jejich anizotropií. Na základě modelových výpočtů lze teplotu nižší než 25 °C předpokládat v hloubkách do cca 720–1260 m. Z hlediska požadavků kladených na tepelné vlastnosti hostitelských hornin se tudíž lokalita jeví jako potenciálně vhodná pro umístění HÚ VJP. Je však třeba brát v úvahu, že díky anizotropii granulitů může lokálně docházet ke snížení tepelné vodivosti v určitém směru až pod limitní hodnotu uvedenou v SKB Technical Report TR-00-12 (Andersson et al. 2000). Tento předběžný závěr je však založený na omezeném množství aktuálně dostupných dat a výhradně na povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat, že prezentované poznatky o tepelných vlastnostech lokality Kraví hora jsou zatíženy značnou mírou nejistoty a pro jejich zásadní upřesnění bude třeba provést nová, doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech.

## 8 Magdaléna

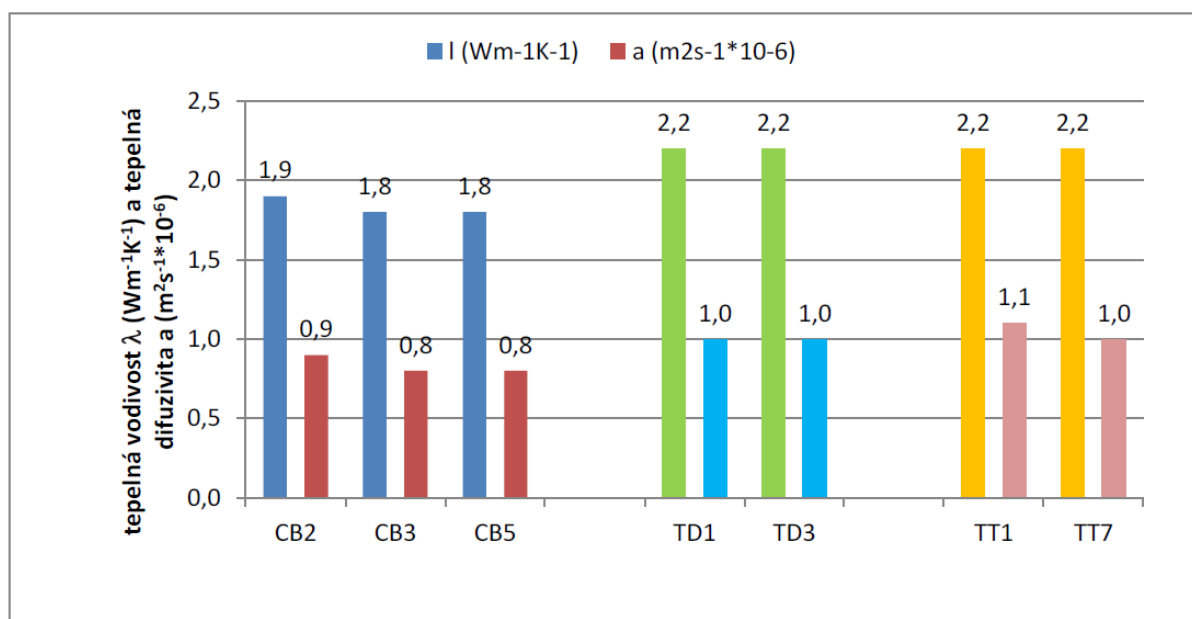
### 8.1 Tepelné vlastnosti lokality

#### 8.1.1 Tepelná vodivost a homogenita tepelné vodivosti

Dostupná data tepelné vodivosti hornin na lokalitě Magdaléna jsou publikována ve zprávě Hanáka et al. (2017). V rámci této studie byly na pracovišti Geofyzikálního ústavu AVČR proměřeny 3 vzorky hrubozrnného porfyrického amfibolicko-biotitického melagranitu až křemenného syenitu (CB – syenit typ Čertovo břemeno, užívaný název je také durbachit) z lokality Štěronín – Plazy, 2 vzorky střednězrnného biotit-pyroxenického (křemenného) melasyenitu (TD – tábořský typ varieta Dražice) z lomu Dražice a 2 vzorky střednězrnného biotit-pyroxenického (křemenného) melasyenitu (TT – Tábořský typ) z lokality Klokoty – Tábor. Tyto horniny jsou dále zjednodušeně nazývány jako syenity, nebo melasyenity.

Z Obr. 25 je zřejmé, že v případě všech vzorků byly naměřeny poměrně nízké hodnoty tepelné vodivosti i difuzivity, což ale koresponduje se zkoumaným horninovým typem poměrně chudým na křemen a bohatým na alkalické živce. Všechny horninové vzorky byly z hlediska tepelných vlastností izotropní, přičemž v případě syenitu typ Čertovo břemeno (CB) byly naměřeny hodnoty podstatně nižší ( $\lambda = 1,8\text{--}1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $a = 0,8\text{--}0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ), než v případě melasyenitů Tábořského typu (TD a TT), které se z hlediska tepelných vlastností shodují ( $\lambda = 2,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $a = 1\text{--}1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Pro horninové prostředí HÚ byla stanovena preferovaná hodnota tepelné vodivosti hornin  $>2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Andersson et al. 2000). Syenity na lokalitě Magdaléna tento požadavek nespĺňují, nicméně je nutné vzít v úvahu fakt, že žádný ze zkoumaných vzorků nebyl odebrán v místě plánovaného HU, jelikož se zde nevyskytují žádné horninové výchozy.



Obr. 25 Tepelná vodivost ( $\lambda$ ) a tepelná difuzivita ( $a$ ) vzorků syenitu a melasyenitu na lokalitě Magdaléna.

### 8.1.2 Měrná tepelná kapacita

Tepelná kapacita hornin na lokalitě Magdaléna byla stanovena nepřímo na základě znalosti tepelné vodivosti, tepelné difuzivity a hustoty tří vzorků hrubozrnného porfyrického amfibol-biotitického melagranitu až křemenného syenitu (CB2, CB3, CB5) z odběrové lokality Štěronín – Plazy a čtyř vzorků střednězrnného biotitického pyroxenického (křemenného) melasyenitu (TD1, TD3; TT1, TT7) z odběrových lokalit lom Dražice a Klokoty – Tábor. Nejprve byla určena objemová tepelná kapacita jako podíl tepelné vodivosti a tepelné difuzivity. Měrná tepelná kapacita byla následně vypočtena jako podíl objemové tepelné kapacity a hustoty horninového vzorku.

Objemová a měrná tepelná kapacita vzorků syenitu a melasyenitu se pohybuje v poměrně úzkém rozpětí 2069–2156  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 747–781  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž jejich aritmetické průměry dosahují 2110  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  a 761  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Tab. 10). Vzorky syenitu mají celkově mírně vyšší tepelnou kapacitu než vzorky melasyenitu. Rozdíl je však velmi malý, přičemž průměrné tepelné kapacity obou horninových typů se od sebe liší pouze přibližně o polovinu směrodatné odchylky.

Objemová a měrná tepelná kapacita hornin nemá z hlediska slučitelnosti horninového prostředí s inženýrskými bariérami stanoveny žádné omezující limity. Tyto parametry vstupují do výpočtů při modelování teplotního pole v okolí HÚ a při termálním dimenzování úložiště.

Tab. 10 Objemová tepelná kapacita ( $c_v$ ) a odvozená měrná tepelná kapacita ( $c$ ) syenitu a melasyenitu na lokalitě Magdaléna dle Hanáka et al. (2017). Hodnoty s označením (AM) jsou aritmetické průměry.

lokality	označení vzorku	$c_v$	$c$
hornina		$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
CB - syenit Čertovo břemeno	CB2	2156	781
	CB3	2123	765
	CB5	2082	750
	CB (AM)	2120	766
TD - melasyenit typ Dražice	TD1	2101	753
	TD3	2093	752
	TD (AM)	2097	752
TT - melasyenit typ Tábor	TT1	2069	747
	TT7	2149	777
	TT (AM)	2109	762

### 8.1.3 Radiogenní produkce tepla

Petrofyzikální vlastnosti hornin na potenciálních lokalitách HÚ byly zpracovány kolektivem Hanáka et al. (2017). Na lokalitě Magdaléna byla spočítána tepelná produkce pro všechny hodnocené horniny, tj. syenity a melasyenity. Koncentrace přirozených radioaktivních prvků jsou u všech vzorků poměrně vysoké, což odpovídá obdobným horninovým typům v rámci Českého masivu. Průměrné obsahy radioaktivních izotopů jsou s výjimkou thoria relativně homogenní, přičemž v tomto případě dosahují eU(Ra) 8,6–9,3 ppm, eTh 25–33,2 ppm a K 5,34–5,48 %. Vyšším koncentracím přirozených radioaktivních prvků odpovídá i zvýšená vypočtená průměrná tepelná produkce, která se pohybuje v rozmezí 4,9–5,4  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  (Tab. 11). To odpovídá průměrné hodnotě tepelné produkce syenitů uváděné v Čermák a Rybach (1982).

Tab. 11 Průměrný obsah uranu (U, eU(Ra)), thoria (eTh) a draslíku (K) v syenitu a melasyenitu na lokalitě Magdaléna dle Hanáka et al. (2017).

Hornina	U (ppm)	eU(Ra) (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	Tepelná produkce ( $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ )
CB - syenit Čertovo břemeno	9,5	8,9	33,2	5,47	5,4
TD - melasyenit typ Dražice	8,5	8,6	29,6	5,48	5,0
TT - melasyenit typ Tábor	9,1	9,3	25,0	5,34	4,9

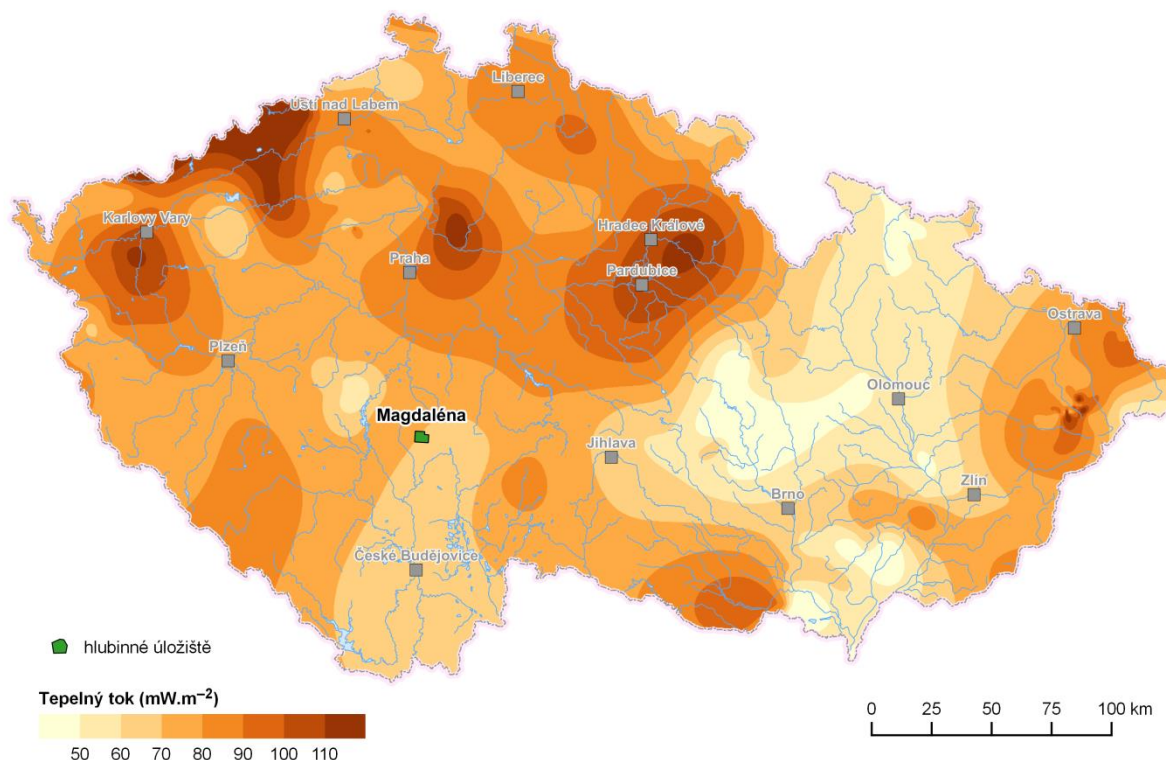
### 8.1.4 Tepelný tok

Hustotu tepelného toku produkovaného horninami v důsledku rozpadu radioaktivních prvků a postupným chladnutím Země lze určit z naměřeného teplotního gradientu ve vrtech a tepelné vodivosti hornin vrtem zastižených. Podle Čermáka (1979) je hodnota průměrného tepelného toku v Českém masivu  $68 \pm 24 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Nejvyšší hodnoty tepelného toku v severní části Českého masivu  $80\text{--}100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  jsou vázány na vyšší radioaktivitu variských granitů smršinsko-krušnohorského batolitu a krkonoško-jizerského kompozitního masivu (Obr. 26).

Dle mapy na Obr. 26 leží lokalita Magdaléna v území s průměrným tepelným tokem okolo  $70 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pokud by do hloubky 500 m nedošlo ke změně horninového typu, tak by po odečtu vlivu horninového masivu o výše uvedené tepelné produkci došlo v této hloubce k poklesu tepelného toku přibližně o  $2,5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Je třeba si uvědomit, že mapa vychází z omezeného počtu vrtů a pro přesné určení tepelného toku v dané lokalitě bude třeba provést měření v případných průzkumných vrtech. Limitní hodnota pro tepelný tok pro účely hodnocení slučitelnosti horninového prostředí s HÚ nebyla stanovena.



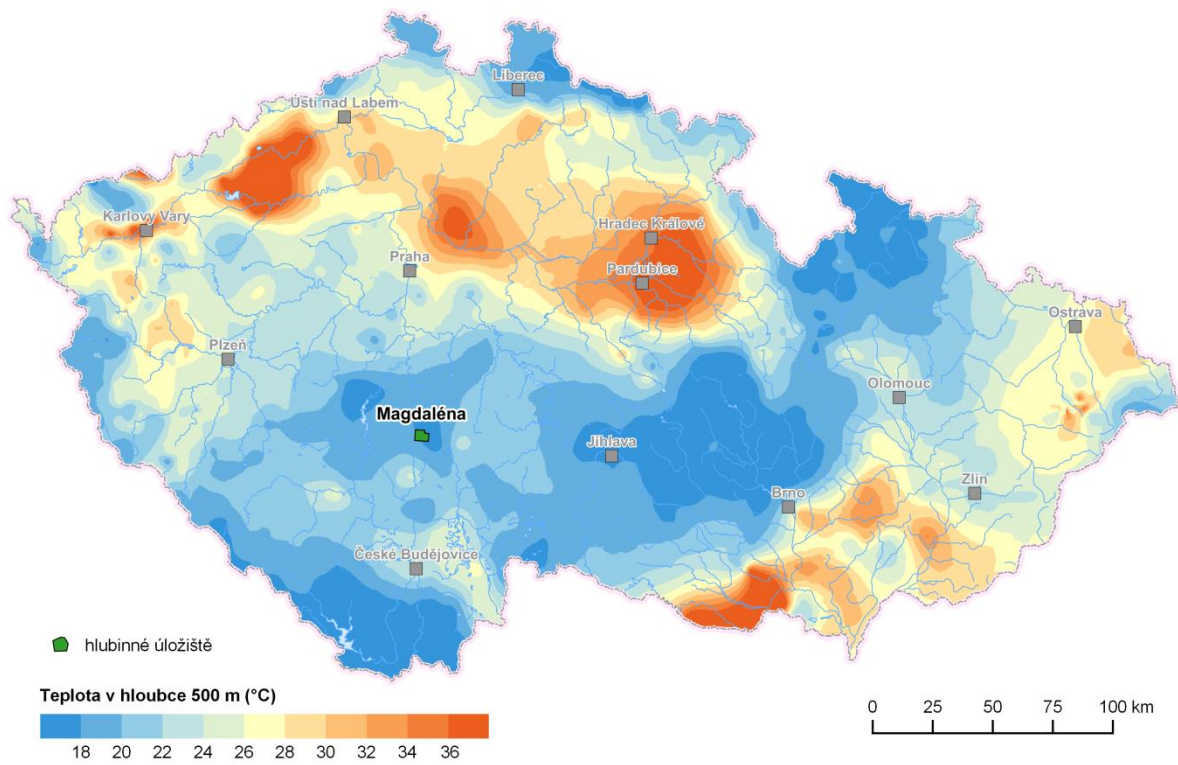


Obr. 26 Mapa tepelného toku ČR s vyznačením zájmové lokality.

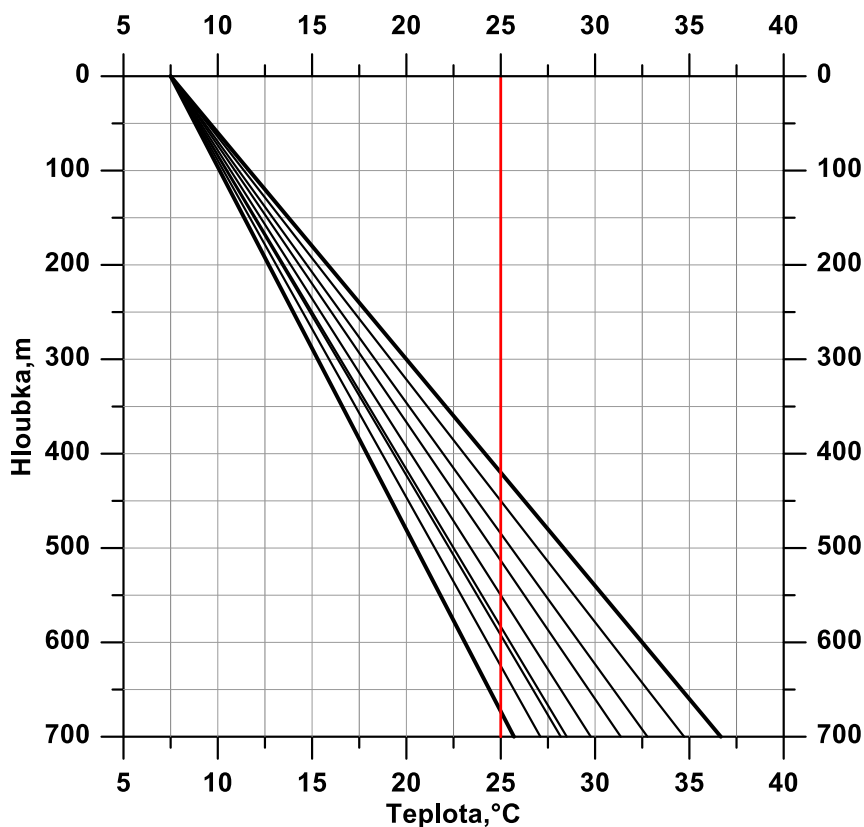
### 8.1.5 Teplota horninového prostředí

Andersson et al. (2000) v SKB Technical Report TR-00-12 definují vhodné horninové prostředí pro úložiště VJP jako prostředí s teplotou  $<25\text{ }^{\circ}\text{C}$  v místě uložení kontejnerů.

Na Obr. 27 je znázorněna mapa izoterm v hloubce 500 m pod povrchem. Z mapy je zřejmé, že v zájmové lokalitě by teplota v hloubce 500 m mohla být nižší než  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zde je třeba si však uvědomit, že zmíněná mapa vychází jednak z výše uvedené mapy tepelného toku a pak z obvyklých hodnot tepelné vodivosti pro daný typ horniny. Vzhledem k počtu vrtů použitých pro tvorbu map a zjednodušení zavedením průměrných hodnot tepelné vodivosti pro regionální geologické celky, je třeba v případě takto detailních studií počítat se značnou mírou nepřesnosti.



Obr. 27 Schéma izolinií teplot (°C) v úrovni 500 m pod povrchem na území ČR s vyznačením zájmové lokality.



Obr. 28 Prognózy nárůstu teploty s hloubkou pro různé hodnoty tepelného toku a tepelné vodivosti.

Na Obr. 28 je znázorněno několik možných scénářů nárůstu teploty s hloubkou, které vycházejí z naměřených hodnot tepelné vodivosti na dané lokalitě. Jedná se o jednoduchý model, kdy jako okrajová podmínka byla uvažována teplota závislá na nadmořské výšce a zeměpisné délce (Kubík 1990) a teplota pod povrchem byla počítána pro kombinace tří různých tepelných vodivostí a tří různých hodnot tepelného toku. Použité hodnoty tepelné vodivosti byly 1,8; 2,2 a 2,5  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , přičemž nejnižší hodnota korespondovala s nejnižší naměřenou hodnotou a nejvyšší pak brala v úvahu možný nárůst vodivosti v neporušené části masivu. Hodnoty tepelného toku byly zvoleny 65; 70 a 75  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Jak je z obrázku patrné, teplota 25 °C (červená čára) by v případě nejnižší tepelné vodivosti (1,8  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a nejvyššího tepelného toku (75  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) byla překročena v hloubce cca 420 m. Naopak pro hodnoty 2,5  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a 65  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  je tato hranice překročena až v hloubce zhruba 680 m. Je patrné, že modelované teploty v hloubce 500 m (20,5–28,5 °C) jsou vyšší než predikce vycházející z výše uvedené mapy, což je dáno nízkou naměřenou tepelnou vodivostí syenitu.

### 8.1.6 Závěr

Lokalita Magdaléna se nachází pravděpodobně v místě s průměrnou hustotou tepelného toku a vzorky syenitu vykazují vysoké hodnoty tepelné produkce. Naměřené hodnoty tepelné vodivosti byly podstatně nižší než preferovaná hodnota pro horninové prostředí HÚ. Zde je však třeba brát v úvahu fakt, že žádný ze zkoumaných vzorků nebyl díky absenci horninových výchozů odebrán přímo v místě plánovaného HÚ VJP a nelze tak tuto lokalitu na základě výše uvedeného vyloučit z dalšího průzkumu. Na základě výše popsaného modelu pak lze předpokládat teplotu <25 °C v hloubkách do 420–680 m a z hlediska teplotního se lokalita leví

jako potencionálně vhodná pro umístění HÚ VJP. Tento předběžný závěr je ale založený na aktuálně dostupných datech a pouze povrchových měřeních. Lze tedy předpokládat značnou míru nejistoty a pro zásadní upřesnění bude třeba provést nová doplňující měření, zejména v předpokládaných vrtech přímo v zájmové lokalitě.

## 9 Reference

- ANDERSSON J., STROEM A., SVEMAR CH., ALMEN K. E., ERICSSON L. O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation (SKB-TR-00-12). Sweden.
- ČERMÁK V. (1979): Geothermal studies and heat flow map of Czechoslovakia. – Čermák V. (ed): Geodynamic investigations in Czechoslovakia. – Final Report, Věda, Bratislava, 129-132.
- ČERMÁK V., RYBACH L. (1982): Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. – Geophysics and space research, 1, 305-343.
- DĚDEČEK P., ČERMÁK V., ŠAFANDA J., KREŠL M. (2017): Heat Flow map of the Czech Republic, revised, IAG-IASPEI, 30.7. - 4.8. 2017, Kobe, Japonsko.
- DORTMAN N. B., SCHON J. H. (2015): Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics, Elsevier, 512 s.
- EPELBAUM L., KUTASOV I., PILCHIN A. (2014): Applied Geothermics, Lecture Notes in Earth System Sciences, DOI: 10.1007/978-3-642-34023-9\_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- FIALA J., VAŇKOVÁ V., WENZLOVÁ M. (1983): Radioactivity of selected durbachites and syenites of the Bohemian Massif. – Čas. Mineral. Geol. 28, 1-16.
- HANÁK J., CHLUPÁČOVÁ M., ONDRA P., HROUDA F., SOSNA K., ŽIŽKA J., KAŠPAREC I., DĚDEČEK P. (2017): Stanovení petrofyzikálních charakteristik horninového prostředí pro území potenciálních lokalit HÚ. – MS SÚRAO, ZZ 103/2017, 170 str.
- KUBÍK J. (1990): Subsurface temperature field of the Bohemian Massif, Stud Geophys Geod 34: 110. <https://doi.org/10.1007/BF02295831>.
- RAŽNJEVIC K. (1969): Tepelné tabulky a diagramy (v soustavě technické i mezinárodní), nakladatelství ALFA, Bratislava.
- SUNDBERG J., BACK P. E., ERICSSON L. O., WRAFTER J. (2008): Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co Box 5864 SE-102 40 Stockholm Sweden.
- TZB-INFO.CZ, Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů, <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu#t18>, navštíveno 7.4.2020
- VAŇKOVÁ V., BARTOŠEK J., CHLUPÁČOVÁ M., MATOLÍN M. (1979): Radioactivity and heat production of rocks from the Bohemian Massif and the West Carpathians. In: Geodynamic Investigations in Czechoslovakia, 257-263. – Veda, Bratislava.
- WEDEPOHL K. H. (1969): Handbook of Geochemistry, Spriger-Verlag Berlin, 442 s.