

# MONITORING TEPLoty HORNINOVÉHO MASIVU – REŠERŠE PROBLEMATIKY

Autoři: Petr Dědeček, Milan Hokr,  
Petr Rálek, Jan Šafanda

Praha, 2022

**Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat názory SÚRAO.**

**NÁZEV ZPRÁVY:** Monitoring teploty horninového masivu – rešerše problematiky

**NÁZEV PROJEKTU:** Monitoring teploty horninového masivu v PVP Bukov a dolu Rožná I

**IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:** Průběžná zpráva

**ČÍSLO SMLOUVY:** SO2021-085

**AUTORSKÝ KOLEKTIV:** Dědeček P.<sup>1</sup>, Hokr M.<sup>2</sup>, Rálek P.<sup>2</sup>, Šafanda J.<sup>1</sup>

Geofyzikální ústav (GFÚ) Akademie věd ČR<sup>1</sup>, Technická univerzita v Liberci<sup>2</sup>

**BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS:** Dědeček P., Hokr M., Rálek P., Šafanda J. (2022): Monitoring teploty horninového masivu – rešerše problematiky, TZ 607/2022, SÚRAO, Praha.

**Jan Smutek**

Manažer projektu (SÚRAO)

*Podepsáno elektronicky*

**Petr Dědeček**

Manažer projektu (GFÚ)

*Podepsáno elektronicky*

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>12</b>
1.1	Cíl a struktura rešerše	12
<b>2</b>	<b>Experimenty v podzemních laboratořích</b>	<b>14</b>
2.1	Přehled zdrojů	14
2.2	Rozbor jednotlivých prací	17
2.2.1	Äspö Hard Rock Laboratory	17
2.2.2	Lokalita Beishan	26
2.2.3	Podzemní laboratoř Grimsel	31
2.2.4	Podzemní laboratoř KURT	35
2.2.5	Podzemní laboratoř Mizunami	40
2.2.6	Podzemní laboratoř ONKALO	40
2.2.7	Lokalita Whiteshell	48
2.3	Souhrnné vyhodnocení problematiky	53
2.4	Důsledky pro řešení projektu	54
<b>3</b>	<b>Technické řešení in-situ monitoringu teplot</b>	<b>56</b>
3.1	Přehled zdrojů	56
3.2	Rozbor jednotlivých prací	56
3.2.1	MODERN State of Art Report on Monitoring Technology (AITEMIN, 2013)	56
3.2.2	Monitoring System Design of Underground Repository for Radioactive Wastes – In Situ Demonstrator, (Farhoud a kol. 2015)	57
3.2.3	Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects, (Buhmann et al. 2016)	58
3.2.4	MODERN 2020 New sensors for repository monitoring (MODERN 2019)	58
3.2.5	Thermal Diffusivity of a Rock Mass Estimated from DrillHole Temperature Monitoring in the ONKALO, (Suppala a kol. 2013)	59
3.3	Souhrnné vyhodnocení problematiky	60
3.4	Důsledky pro řešení projektu	60
<b>4</b>	<b>Tepelné vlastnosti hornin</b>	<b>61</b>
4.1	Přehled zdrojů	61
4.1.1	Encyclopedia of solid earth geophysics (Gupta a James 2011)	61
4.1.2	Effect of thermal conductivity anisotropy of rocks on the subsurface temperature field (Šafanda 1995)	66
4.1.3	Estimation of the effective thermal properties of cracked rocks (Zhou et al. 2016)	



4.1.4	Thermal properties of gneisses and amphibolites high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples, (Seipold a Huenges 1997) .....	77
4.1.5	Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning, (Popov et al. 1999) .....	78
4.1.6	Thermal properties at Äspö HRL (Sunberg 2003).....	79
4.1.7	Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks (Mottaghy et al. 2007) .....	80
4.1.8	Experimental investigations on the thermal properties of Jalore granitic rocks for nuclear waste repository (Gautam et al. 2019).....	81
4.2	Souhrnné vyhodnocení problematiky .....	82
4.3	Důsledky pro řešení projektu.....	82
<b>5</b>	<b>Teploty horninových masivů krystalinika ČR.....</b>	<b>83</b>
5.1	Přehled zdrojů .....	83
5.2	Rozbor jednotlivých prací .....	83
5.2.1	Heat Transport Processes in the Earth's Crust (Clauser 2009) .....	83
5.2.2	Radioactivity and heat production data from several boreholes in the Bohemian Massif (Krešl et al. 1978) .....	84
5.2.3	Vliv topografie na podpovrchové teplotní pole .....	85
5.2.4	Subsurface temperature field of the Bohemian Massif (Kubík 1990) .....	90
5.2.5	Geology and geothermal potential in the eastern flank of Eger Rift (Litoměřice area, Czech Republic), (Šafanda a kol., 2020).....	92
5.2.6	Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia (Šafanda a Rajver 2001).....	94
5.2.7	Dříve publikované mapy teplot pod zemským povrchem .....	95
5.2.8	Atlas krajiny České republiky (2009) .....	97
5.2.9	Heat flow map of the Czech Republic (Dědeček a kol. 2018) .....	98
5.3	Souhrnné vyhodnocení problematiky .....	99
5.4	Důsledky pro řešení projektu.....	100
<b>6</b>	<b>Vývoj teplot v okolí důlních děl .....</b>	<b>101</b>
6.1	Přehled zdrojů .....	101
6.2	Vyhodnocení zdrojů.....	103
6.2.1	Temperature Prediction Model in the Main Ventilation System of an Underground Mine (Bascompta 2020).....	103
6.2.2	Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel (Liu 2019).....	104
6.2.3	Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine (Sasmito 2015).....	105

6.2.4	Study on the Radial and Axial Temperature Fields of Coal Roadway under Seasonal Fluctuation Boundary (Song 2019).....	106
6.2.5	Effects of seasonal air temperature variation on airflow and surrounding rock temperature of mines (Yi 2019).....	108
6.2.6	Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation (Zhang 2017) .....	109
6.2.7	A robust numerical method for modeling ventilation through long tunnels in high temperature regions based on 1D pipe model (Zhao, 2021) .....	110
6.2.8	Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures (Zhou 2021) .....	111
6.2.9	Study of the Influence of Ventilation Pipeline Setting on Cooling Effects in High-Temperature Mines (Zhou et al. 2019).....	112
6.2.10	Using seasonal temperature difference in underground surrounding rocks to cooling ventilation airflow: A conceptual model and simulation study (Zhu et al. 2020) ..	114
6.2.11	An Underground Air-Route Temperature Prediction Model for Ultra-Deep Coal Mines (Zhu et al. 2015).....	115
6.3	Shrnutí .....	116
6.3.1	Oblast „ventilace“ .....	116
6.3.2	Oblast „vymrzání tunelů“ .....	116
6.3.3	Doplnění.....	117
<b>7</b>	<b>Shrnutí závěrů z rešerše.....</b>	<b>118</b>

## Seznam příloh

Příloha 1 – komentované převzaté obrázky z citovaných prací kapitoly 6

## Seznam použitých zkratk

1D, 2D, 3D	jedno-, dvou-, tří-rozměrný
BCE	Buffer Container Experiment
CFD	computational fluid mechanics (výpočetní mechanika tekutin)
DTS	distributed temperature sensing (distribuované snímání teploty)
EDZ	excavation damaged/disturbed zone (zóna porušená/ovlivněná ražbou)
ETV	efektivní tepelná vodivost
ETR	efektivní tepelná roztažnost
GTS	Grimsel Test Site
HRC	heat regulation circle (oblast regulace tepla)
HRL	(Äspö) Hard Rock Laboratory
HÚ	hlubinné úložiště
KURT	Korea Underground Research Tunnel
MIU	podzemní laboratoř Mizunami
OP	okrajové podmínky
PFL	Posiva Flow Log (měřicí systém)
THM	thermo-hydro-mechanický (podvarianty TM, HM, TH)
TPS	transient plane source
TSX	Tunnel Sealing Experiment
UOS	ukládací obalový soubor
URL	underground research laboratory (podzemní výzkumná laboratoř)
WoS	Web of Science (databáze vědeckých publikací)

(poznámka: v seznamu zkratk nejsou zařazeny názvy institucí, z nichž některé už se nepoužívají ve významu zkratk, zkratky použité jen jednou rovnou s vysvětlením v kontextu odkazu do jedné konkrétní citace např. obrázku a dále jiné výrazy psané velkými písmeny, používané jako identifikátory bez potřeby porozumění kódu jako zkratce)

## Vysvětlení pojmů

### Tepelná vodivost

Fyzikální vlastnost materiálu: množství tepla, které za jednotku času projde přes jednotkový průřez při jednotkovém teplotním spádu.

### Měrná tepelná kapacita

Fyzikální vlastnost materiálu: množství tepla, které musíme dodat/odebrat 1 kg materiálu, aby se jeho teplota změnila o 1°C.

### Tepelná difuzivita

Fyzikální vlastnost materiálu: charakterizuje rychlost šíření teplotních změn, definována jako poměr tepelné vodivosti a tepelné kapacity.

### Anizotropie

Situace, kdy určitý kvantitativní parametr materiálu má různé hodnoty v různých směrech.

### Efektivní hodnota (parametru)

Pro případ heterogenního materiálu jde o hodnotu, kterou by měl fiktivní homogenní materiál se stejným kvantitativním chováním v dané situaci (v měřítku větším než heterogenity).

### **Zemský tepelný tok**

Množství tepla, které projde jednotkou plochy na zemském povrchu za jednotku času

### **Geotermický gradient**

Změna teploty s hloubkou v Zemi

### **Fourierův zákon**

Vztah určující úměrnost mezi teplotním gradientem a tepelným tokem s faktorem rovným tepelné vodivosti.

### **Přenos tepla vedením (kondukcí)**

Přenos způsobený mikroskopickými pohyby částic hmoty řízený Fourierovým zákonem.

### **Přenos tepla advekcí (konvekcí)**

Přenos způsobený makroskopickým pohybem části hmoty o určité teplotě (prouděním tekutiny).

### **Numerický model**

Způsob vyjádření fyzikálního děje pomocí numerického řešení popisujících diferenciálních rovnic. Umožňuje typicky řešit úlohu s libovolnou geometrií a heterogenitou materiálu.

### **Analytické řešení**

Způsob vyjádření řešení rovnice (popisující fyzikálního děj) pomocí explicitního vzorce pro funkci prostorových souřadnic a času. To je typicky možné jen pro jednoduchou geometrii a homogenní materiál.

### **Inverzní model/úloha**

Použití modelu fyzikálního děje tak, že z daných hodnot neznámé funkce v rovnici (obvykle měřených) jsou určovány hodnoty parametrů v rovnici (vlastnosti materiálu).

### **Okrajová podmínka**

Pro parciální diferenciální rovnici popisující rozložení fyzikální veličiny se jedná o hodnoty neznámé nebo odvozené veličiny na hranici řešené oblasti, které je nutné pro řešení zadat.

### **Termistor**

Polovodičový rezistor s odporem výrazně závislým na teplotě

### **Odporové teplotní čidlo**

Kovové teplotní čidlo (nejčastěji Pt, Ni) s lineární závislostí odporu na teplotě

### **Termočlánek**

Teplotní čidlo založené na principu termoelektrického jevu

**Záznamník dat (datalogger)**

Zařízení pro záznam a ukládání naměřených dat

## Abstrakt

Zpráva je rešerší problematiky vedení tepla v horninovém prostředí v relativně širokém kontextu měření a vyhodnocování teplotního pole v měřítku metrů v okolí důlních děl a měřítku stovek metrů do hloubky z povrchu. Jsou stanoveny hlavní tematické okruhy vyplývající z potřeby rešerše pro přípravu projektu monitoringu profilů teplot vedených z různě hlubokých a různě starých podzemních prostor dolu Rožná a PVP Bukov. Prvním tématem jsou experimenty monitoringu teplot v jiných podzemních laboratořích, což zahrnuje sledování přirozeného tepelného pole ovlivněného větráním, zahřívací experimenty a měření a vyhodnocování vertikálního gradientu v hlubokých vrtech a ke všem případům také použité metody numerického nebo analytického řešení. Druhé téma je zaměřeno na technické prostředky monitoringu – použití různých druhů čidel, instalace in-situ a záznam a přenos dat, otázky přesnosti a kalibrace. Třetím tématem jsou tepelné vlastnosti hornin, kde jsou vysvětleny obecné poznatky o parametrech a aktuální poznatky o vztazích mezi parametry, možnostech odvození pro heterogenní horniny, způsoby pozorování anisotropie. Čtvrtým tématem je přehled dostupných dat o teplotách v krystaliniku Českého masivu. Pátým tématem je problematika tepelného vlivu větrání podzemních děl, zahrnutý jsou studie s měřeními a výpočtem teploty vzduchu a teploty horniny. Témata se vzájemně prolínají a souvislosti jsou v textu zmíněny. V závěru jsou formulovány podněty pro zahajovaný projekt z hlediska využitelnosti metodik a dat z rešeršovaných prací.

## Klíčová slova

Monitoring teplot, podzemní laboratoř, in-situ experiment, tepelné parametry, geotermický gradient, větrání důlních děl, numerický model, tepelný tok, PVP Bukov

## Abstract

This literature-search report deals with the heat transport in the rock environment in a relatively broad context of measuring and evaluating the temperature field at a scale of meters around excavations and at a scale of hundreds of meters of depth from the Earth surface. The particular topics arise from the need of a project preparation for monitoring temperature profiles conducted from different depths and different old underground spaces of the Rožná mine and the Bukov URF. The first topic are temperature monitoring activities in other underground laboratories, which includes monitoring the natural thermal field affected by ventilation, heating experiments and measuring and evaluating the vertical gradient in deep boreholes together with numerical or analytical solution methods in the listed cases. The second topic focuses on the technical means of monitoring - the use of different types of sensors, in-situ installation and data recording and transmission, accuracy and calibration issues. The third topic is the thermal properties of rocks, where general knowledge about parameters and current knowledge about the relationships between parameters, derivation possibilities for heterogeneous rocks, methods of observing anisotropy are explained. The fourth topic is an overview of available data on temperatures in the crystalline rocks of the Bohemian massif. The fifth topic covers the thermal effect of underground workings ventilation, including studies with measurement and calculation of air temperature and rock temperature. The topics intersect and such context is mentioned in the text. In the end, suggestions for the launched project are formulated in terms of the usability of methodologies and data from the researched sources.

## Keywords

Temperature monitoring, underground laboratory, in-situ experiment, thermal parameters, geothermic gradient, mine ventilation, numerical model, Bukov URF

# 1 Úvod

Důvodem vypracování rešerše je vytvoření znalostní databáze pro úspěšnou realizaci výzkumného experimentu v PVP Bukov a přilehlých prostorách dolu Rožná. Cílem experimentu je navrhnout a realizovat teplotní monitoring ve vrtech v důlním díle Rožná a na základě získaných dat zpracovat numerické modely šíření tepla v horninovém masivu. S tím souvisí tematické celky rešerše, které byly zadavatelem dle Specifikace předmětu plnění navrženy takto:

- Porovnání přístupů a zhodnocení výsledků z obdobných experimentů ze zahraničních podzemních pracovišť, především v krystalinických horninách: Grimsel Test Site (Švýcarsko), Onkalo (Finsko), Äspö HRL (Švédsko), Mizunami (Japonsko), KURT (Korea), Beishan (Čína), Whiteshell (Kanada) apod.
- Rozbor způsobů monitoringu teplot v hornině v projektech v zahraničních laboratořích (technický popis instrumentace a měřících systémů). Zhodnocení potřeb Objednatele ve vazbě na přípravu Hlubinného úložiště (dále jen „HÚ“) a modelovacím aktivitám prováděným v rámci projektových činností například ve vztahu k dimenzování podzemních prostor HÚ).
- Rešerši vztahů mezi laboratorními hodnotami teplotních parametrů vzorků hornin a jejich využití pro modelování oblasti horninového masivu velkého měřítka. Dále budou zhodnoceny zkušenosti s tepelnými vlastnostmi anizotropních hornin (jaký je vliv anizotropie přeměněných hornin na tepelné vlastnosti).
- Přehled informací o teplotách horninových masivů krystalinika ČR – vývoj teplot s hloubkou (geotermický gradient).
- Informace o vývoji teplot v horninách v důlních dílech – ovlivnění původní teploty vytvořením otevřených podzemních prostor a jejich následným provozem (větráním).

## 1.1 Cíl a struktura rešerše

Jak bylo zmíněno v úvodu, cílem rešerše je podpora směřování projektu. Rešerše by tak měly pomoci s důležitými úkoly jako je volba míst měření v rámci důlního díla, zvolení a uspořádání aparatury pro teplotní monitoring a správu dat, vyhodnocením dějů uvnitř díla z hlediska jejich relevance a důležitosti pro průběh experimentu, s potřebnou znalostí parametrů, a v poslední řadě také s cíli a možnostmi matematického modelování.

Při zpracování bylo snahou použít jednotnou strukturu textu napříč všemi kapitolami – tedy vytyčenými dílčími tématy rešerše zadáním. Kapitoly začínají podrobnější specifikací metodiky rešerše, tj. rozsahem použitých zdrojů, způsobem hledání a charakterizací rozsahu použitých zdrojů. To je chápáno jako důležité pro případnou navazující rešeršní práci doplňujících témat nebo kontrolovatelnost úplnosti zpracování. Dává to také obrázek o rozsahu zájmu o dané téma odbornou komunitou a potřebě určené téma pojmout v širším nebo užším kontextu. Hlavní část textu je pak strukturována typicky podle jednotlivých citovaných prací (v třetí úrovni kapitol), případně dle projektů nebo aktivit, které mají charakter komplexního celku s výstupy do více citovaných prací typicky s průnikem spoluautorů (to je případ prací z podzemních laboratoří). Podle toho je buď použit přímo název citované práce do názvu podkapitoly v originálním jazyce, nebo je přeformulován do podoby zastřešující celé téma. V případě experimentů v podzemních laboratořích je použito o jednu úroveň struktury navíc – třetí úroveň je dle laboratoří nebo lokalit a čtvrtá pro jednotlivé práce nebo témata.



V případech, kdy celá sekce třetí nebo čtvrté úrovně je citací (výtahem) z jedné konkrétní publikace, je citace uvedena přímo jako součást nadpisu a nejsou v textu dále reference opakovány. To je případ i obrázků – obrázky v příslušné sekci jsou automaticky chápány jako převzaté z práce citované v nadpisu a ta už není citována v titulku.

To, že podoba uspořádání kapitol má částečně různý charakter, je podmíněno obsahem – dílčí témata jsou různě široká a jiný je např. vztah mezi jednotlivými citovanými pracemi. Vedle toho se promítá zpracování jednotlivými spoluautory celé zprávy, každá kapitola jako celek byla psaná jedním autorem. Témata se zároveň částečně prolínají a vazby byly do textu promítnuty následně, přičemž případné citace stejné zdrojové práce byly zjištěny předem, práce zhodnocena jen v jedné kapitola a do druhé použita stručnější reference.

Rešeršované práce jsou jak ty, které obsahují obecné znalosti učebnicového charakteru, tak ve většině případů práce s konkrétními dílčími novými poznatky nebo metodami v době vzniku. Zpracování rešerše v druhém případě předpokládá znalost kontextu čtenáře. Jako vhodný úvod do problematiky při čtení zprávy lze doporučit kapitolu 4.1.1.

## 2 Experimenty v podzemních laboratořích

Nadpis kapitoly vychází z technického zadání projektu, je ale vhodné si význam přizpůsobit potřebě rešerše. Nechápeme v užším smyslu „experiment“ jako umělý řízený proces, ale obecně jako téma monitoringu a modelového vyhodnocení zásahů do přirozeného tepelného pole a identifikace vlastností horniny. Vazba na podzemní laboratoře (URL) byla v některých případech zobecněna na obecný kontext in-situ výzkumu pro hlubinné úložiště (HÚ).

### 2.1 Přehled zdrojů

Obecně se dá výběr použitých zdrojů (Tab. 1) charakterizovat tak, že tam, kde provozovatel URL nebo jiná národní agentura pro HÚ, prezentuje seznam svých výsledků, který lze považovat za úplný, je použit jako jediný zdroj pro vyhledání jednotlivých prací. Naopak tam, kde takový zdroj není nebo působí dojmem neúplnosti, je primárně použito hledání vědeckých publikací přes databázi Web of Science (WoS) (přístup do ní může být limitován pro akademické instituce na základě předplatného). Vyskytlo se minimum případů, kdy pro referenci nebyl získán plný text – některé nejsou dohledatelné vůbec (např. starší konferenční příspěvky) některé jsou mimo rozsah předplatného instituce a vyžadují samostatný poplatek. Pokud nešlo o klíčovou práci, nebyly takové plné texty opatřovány, přičemž v případě budoucí potřeby během řešení projektu lze takový zdroj doplnit.

V této kapitole jsou specificky použity znaky <> jako závorky místo uvozovek, aby bylo možné rozlišit použití klasických uvozovek jako součást vyhledávacího řetězce, tj. hledání celé fráze místo jednotlivých slov, při popisu postupu hledání podle klíčových slov.

Pro hledání aktivit a výsledků z podzemní laboratoře Äspö měli autoři dřívější dobrou zkušenost přímo s vyhledávacím nástrojem vlastní publikací provozovatele SKB na jejich webu, databáze technických zpráv celého programu hlubinného úložiště včetně zahraničních příspěvků je velmi obsáhlá. Vyhledáváno bylo přes klíčová slova: vyhledání <temperature> dalo 1998 výsledků, orientačně byla zjištěna šíře tematik: hydrologie, paleoklima a glaciace, zahřívací experimenty, určení referenční teplota, geofyzikální karotáž, geotermální tok, průzkum teplotních vlastností, jednotlivě vybrány práce z období 2017-2021 (většina byla zahrnuta i v dalším specifičtějším hledání). Zúžení hledání bylo problematické, hledání přímo spojením <„temperature experiment“> a <„thermal experiment“> dalo jeden nerelevantní výsledek. Vyhledání dvou slov <temperature AND experiment> poskytlo 610 výsledků, zahrnujících např. i témata bentonitu, koroze, hydrogeologie). Tituly byly jednotlivě dle názvů klasifikované dle možné relevance (tepelné pole v žule, existence měřených dat teplot nebo použití modelového výpočtu tepelného pole). Některé výsledky souvisejí i s tématem II (technika) a tématem III (tepelné parametry). Další použité kombinace klíčových slov byly: <„tunnel temperature“> (4 výsledky, zahrnuto v předchozím), <tunnel AND temperature> (726), <thermal AND experiment> (410), skladba výsledků byla obdobná a procházeny byly jen nejnovější namátky.

Tab. 1 Přehled podzemních laboratoří dle abecedního řazení a shrnutí použitých zdrojů pro rešerši

URL	Provozovatel a související	Zdroje
Äspö HRL (Švédsko)	SKB (původní význam: švédská správa jaderného paliva a odpadu)	Laboratoř má vlastní stránku na webu SKB jen se souhrnnými informacemi. Použito bylo hledání publikací (zpráv) na webu SKB.
Beishan (Čína)	Nezjištěno (publikace odkazují např. na China Atomic Energy Authority)	Vlastní web nenalezen (Google vyhledavač najde mediální zprávy a přímo odborné publikace)  Zdroje přes Wang et al. (2018) a přímé hledání ve Web of Science.
Grimsel Test Site (GTS) (Švýcarsko)	Nagra (dříve zkratka „die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle“)	Web Grimsel (GTS) omezeně a bez plných textů.  Databáze zpráv Nagra obsáhá, ale není jistá kompletnost u Grimselu.
Korea Underground Research Tunnel (KURT) (Jižní Korea)	KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute)	Google nenajde samostatnou webovou stránku KURT, na webu KAERI jen široká zmínka o programu úložiště.  Použito hledání WoS.
Mizunami (Japonsko) – podzemní laboratoř – od 90. let	JAEA (Japan Atomic Energy Agency)	Web laboratoře Mizunami (MIU) s omezeným obsahem. Weby agentur NUMO a JAEA s částečnou dostupností výzkumných zpráv z větší části mimo relevanci, použity dvě shrnující.
ONKALO (Finsko)	Posiva (Posiva Oy Olkiluoto)	Použito bylo hledání publikací (zpráv) na webu Posiva.
Whiteshell (Kanada)	Atomic Energy of Canada Limited (AECL), část Whiteshell Laboratories  Regulátor: CNCS	Vlastní web nenalezen, ani relevantní informace na AECL, omezeně na CNCS. Čerpáno z odkazů na Wikipedii a především z přímého hledání WoS.

V případě laboratoře Beishan neměli autoři předchozí informace o provozovateli a výchozím rozcestníku, např. vlastní webové prezentaci laboratoře. Google vyhledavač poskytl dva typy výsledků – zprávy z médií o významných krocích přípravy (nejaktuálnější o zahájení ražby) a přímo některé hlavní odborné publikace. Jako klíčová byla použita práce (Wang et al. 2018) shrnující výběr lokality a charakterizaci. Přestože tedy zřejmě nemohou být k dispozici žádné reference na in-situ experimenty, je poměrně hodně souvisejících prací s vzorky z lokality, průzkumu i teoretického modelování souvisejícího s teplotou horniny. Jednotlivě byly z citovaných referencí (celkem 46) vybrány relevantní podle názvu a obdobně zpracovány články citující dle WoS (celkem 103). Další reference byly nalezeny samostatným hledáním WoS <beishan temperature> (celkem 123 výsledků) s částečným překryvem s předchozími. Jako relevantní pro konkrétní studium (tj. měření a modelování tepelného pole v žule) bylo použito devět, z toho jedna také v rámci tématu tepelných parametrů (kapitola 4.1.6), některé jsou generické studie relevantní v celém kontextu rešerše. Počet relevantních je proti celkovým nižší, protože velká část související s teplotou se týká spíše mechaniky horniny (typicky porušení vzorků vysokou teplotou). Od některých i relevantních prací nelze získat plný text, některé tvoří sérii týkající se jedné studie nebo dílčího tématu. Na webu CAEA (zodpovědná instituce dle mediálních článků) nebyla žádná informace nalezena.

Pro laboratoř Grimsel (GTS) existuje samostatná webová doména s přehledovými informacemi o jednotlivých projektech. Výstupy jsou jen ve formě seznamu, bez přímé dostupnosti plných textů, klíčové slovo <temperature> se vyskytuje jen v jednom titulu týkajícím se experimentu FEBEX. Podle názvů projektu v seznamu se žádný netýká monitoringu teplot, ty jsou přirozeně součástí experimentů se zahříváním včetně bufferu. Podrobné hledání problematiky tepelného pole v hornině bylo provedeno přes vyhledavač v archivu zpráv NAGRA, kde jsou nabízeny plné texty ke stažení, ale podle zkušenosti z jiných projektů nemusí být ve vztahu k aktivitám Grimsel kompletní, což se ale vzhledem k uvedenému seznamu projektů nezdálo omezující.

KURT: Vyhledavač Google nenajde samostatnou webovou stránku KURT, žádný odkaz není ani na tištěné brožury, na webu organizace KAERI je jen široká zmínka o programu úložiště a existenci laboratoře. Link ve zprávě NEA/RWM/R(2013)2 s přehledem URL již není platný: <http://ehome.kaeri.re.kr/snsd/eng/institution/institution3.htm>. Vyhledání v publikacích WoS pomocí <KURT temperature> poskytlo 27 výsledků, z nichž jen cca polovina se týká KURT laboratoře a 5 bylo určeno jako alespoň částečně relevantních – zahrnuje studium přestupu tepla mezi vzduchem a horninou, zahřívací experimenty s bufferem i bez a odhady prostorového rozložení tepelné vodivosti.

Mizunami: Webová stránka laboratoře Mizunami (MIU) jako součást portálu JAEA ([https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu\\_e/](https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu_e/)) obsahuje jen shrnující a plánovací zprávy do roku cca 2006 (cca 10), není explicitní zmínka monitoringu teploty (i když z přehledové podoby informací nelze určit, zda je součástí např. hydrochemie, mechaniky), zmíněna je teplotní karotáž vrty z povrchu. Agentura NUMO (Nuclear Waste Management Organization of Japan) má zprávy 2004-2021, širší kontext, není explicitně zmíněna teplota ([https://www.numo.or.jp/en/reports/new\\_eng\\_tab01.html](https://www.numo.or.jp/en/reports/new_eng_tab01.html)). Nabídka publikací JAEA mimo strukturu Mizunami je členěna na více částí, „JAEA papers“ a „papers“ obsahují větší seznamy výzkumných zpráv bez odkazu na plný text. V seznamu byla nalezena shrnující zpráva aktivit Mizunami a samostatná zpráva k průzkumu pomocí vrtů z povrchu (včetně teplotní karotáže), plné texty se podařilo získat přímým hledáním Google s odkazem do jiné webové stránky v rámci JAEA.

Onkalo: Podobně jako v případě laboratoře Äspö a švédského programu výzkumu HÚ je dlouhodobá zkušenost s komplexní dostupností výsledků výzkumu v podobě zpráv Posiva na jejich webu. Vyhledání klíčového slova <temperature> v poli „name/content“ (mělo by vyhledávat kromě názvu v klíčových slovech a abstraktu) dalo 31 výsledků. Některé byly součástí jedné série (projekt monitoringu mechaniky hornin), vyloučeny pak byly nerelevantní případy jiné než týkající se tepelného pole v hornině (teplota jako sekundární údaj pro jiné měření, procesy v bentonitu a jiných materiálech).

Z laboratoře Whiteshell měli autoři předchozí informace o experimentech Buffer Cointainer Experiment (BCE) a Tunnel Sealing Experiment (TSX). Vyhledávač Google našel jako obecný informativní zdroj o laboratoři pouze stránku na Wikipedii, kde bylo možné se seznámit s časovou linií a tedy i s informací o ukončení provozu laboratoře (uzavření technicky realizováno 2006-2010) a ponechání monitoringu průsaku vody přes zátku. Dále byl uveden jeden z klíčových odkazů na shrnující článek o 20 letech aktivit v laboratoři (Chandler 2003), kde ale nebyl zmíněn žádný experiment nebo monitoring primárně zaměřený na tepelné pole v hornině a v dalších aktivit nebyly podrobnější informace o měření teplot, ani v seznamu referencí. Vyhledavačem byl nalezen také přehledový článek (Fairhurst 2004) s odkazem na termo-hydraulický experiment (Detournay et al. 2004), oba součástí speciálního čísla časopisu týkajícího se URL, ale bez dalšího příspěvku týkajícího se tepelného pole. Na stránkách AECL byly zveřejněny pouze zprávy administrativního charakteru. Na stránkách CNSC jsou uvedeny seznamy odborných prací podle časových období, laboratoř Whiteshell je zmíněna u tří a ty se týkaly problematiky hydro-mechanických procesů, z celého seznamu 68 referencí byla dále hledána klíčová slova v souvislosti s teplotou, přičemž šlo až na výjimku o sdružené děje ve vazbě na mechaniku. Čerpáno bylo z vyhledání odborných publikací přes WoS – klíčová slova <"underground research laboratory" canada temperature> a <whiteshell canada temperature>. Celkem šlo o 21 výsledků, mezi nimiž bylo zastoupeno více prací k experimentům BCE a TSX a mimo to několik jednotlivých dalších, včetně už výše jmenovaných.

## 2.2 Rozbor jednotlivých prací

### 2.2.1 Äspö Hard Rock Laboratory

V rámci hledání databáze zpráv SKB byly práce jak přímo týkající se podzemní laboratoře, tak související měření teplot mimo laboratoř a obecné práce zabývající se modelováním tepla. Mezi zdroji nebyl nalezen žádný experiment nebo monitorovací program, který by zahrnoval měření teplot v profilu od stěny důlního díla zachycující primárně efekt ovlivnění větráním prostor. Typické zastoupené studie jsou experimenty s umělým zahříváním, jejichž součástí je měření teplot v hornině, laboratorní měření tepelných vodivostí a vyhodnocení souvislostí a studium vertikálního tepelného pole bez důlních prostor z hlubokých vrtů. Modelování navazuje na zahřívací experimenty i na měření vertikálních profilů teplot.

#### 2.2.1.1 Prototype Repository Experiment

Jedná se o komplexní experiment, který je v kontextu programu HÚ v krystalické hornině všeobecně známý – 6 vrtů s topidly v konfiguraci konceptu KBS-3V v plném měřítku. Zahnut

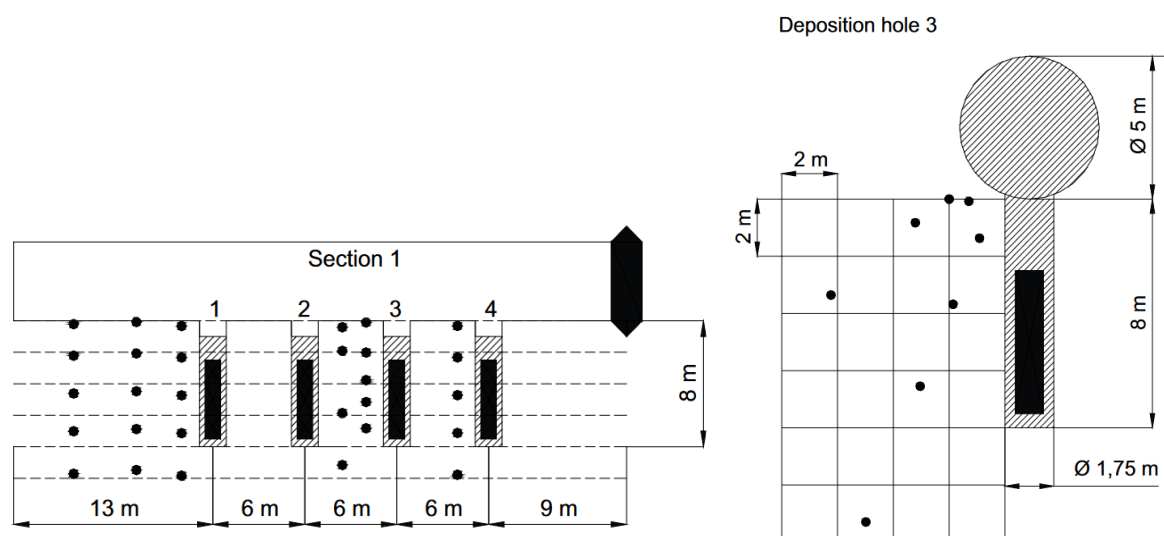
je v realistické podobě celý systém interakce bariér, s termo-hydro-mechanickými procesy, včetně okolní horniny. Instrumentace je ale dominantně zaměřená na bentonit, v případě horniny jsou v kontextu podobných experimentů detailně zkoumány hydraulické podmínky. V textu dále, soustředěném na měření teplot v hornině a jeho vyhodnocení, je tedy rozebírána velmi malá, sekundární, podoblast celého experimentu a výzkumu kolem něho.

Z celé série několika desítek vydaných zpráv jsou použity následující: IPR-02-23 (Börgesson et al. 2002) popisující instalaci experimentu a instrumentaci v sekci 1 (experimentální vrtů 1-4), P-20-33 (Goudarzi 2021) jako nejaktuálnější z pravidelných „Sensor Data Report“ s holou informací o rozsahu běžícího monitoringu a naměřenými daty a dvě zabývající se modelovým vyhodnocením – IPR 07-01 (Kristensson a Hökmark 2007) a R-13-10 (Lönnqvist a Hökmark 2015).

Dle IPR 02-23 bylo v hornině umístěno 37 termočlánků o průměru 4.0 mm (Cupronickel) v okolí experimentálních vrtů č. 1 a 3 (nesymetricky, pozice znázorněny na Obr. 1), dále pak 24 termočlánků u každého z vrtů 5 a 6 (sekce 2). Ve zprávě je popsán způsob řešení průchodu svazků kabelů ze sousedního tunelu, což má za cíl zajištění tlakové izolace instrumentace od podmínek v bentonitovém bufferu a výplni experimentálního tunelu, tj. složitějších podmínek než se očekává u monitoringu teplot v hornině bez dalších součástí experimentu.

Způsob umístění teplotních senzorů v hornině není přesně popsán – zda je podél průchodu svazků kabelů další instrumentace nebo v samostatných vrtech. Uspořádání na Obr. 1 by odpovídalo samostatným vertikálním nebo šikmým vrtům vedeným z experimentálního tunelu před instalací. Způsob upevnění ve vrtu ale není v použitých pramenech uveden. Zmíněno je to, že na rozdíl od jiných typů senzorů nebyla použita další ochranná vrstva navíc k Cu-Ni pouzdru z výroby.

Zpráva dále zmiňuje použití optického kabelu pro distribuované měření teploty na povrchu topidla (kovového „kanystru“), 16 kusů kabelu pro 4 topidla, kabel zn. Inconel průměru 2 mm, tvořící dvě smyčky tj. 4 svislé profily v určených nepravidelných úhlech válcového souřadného systému, celkem se jedná o 20-30 m kabelu. Optický kabel byl sice použit přímo na topidle, tj. mimo kontext zájmu, ale vzhledem k omezeným zkušenostem s tímto typem měření také stojí za pozornost – níže je komentována životnost.

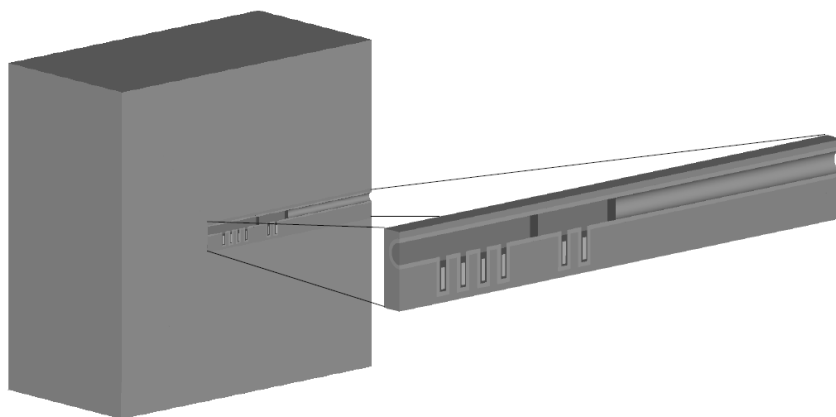


Obr. 1 Pozice senzorů teplot v hornině (Goudarzi 2020) – seznam v Tab.4-9 str 24 citovaného zdroje.

Ze zprávy P-20-33 je dostupná informace o životnosti senzorů (za dobu téměř 20 let v sekci 1) a vůči zprávě z instalace navíc grafické schéma umístění senzorů teplot v hornině. Podíl funkčních senzorů teploty je podobný jako u senzorů celkového a pórového tlaku, zatímco u relativní vlhkosti byla míra poruch vyšší a v době vzniku zprávy nebyl funkční žádný. Na poruchy měly jednorázově efekt skokové změny tlaku v souvislosti s otevřením a zavřením drenáže. Životnost v hornině byla vyšší než v bentonitu, z teplotních senzorů je v provozu 23 z původních 37 v sekci 1 (sekce 2 byla dříve demontována). Vzhledem k tomu, že se jedná o termočlánky, tj. jiný typ než uvažovaný Pt100 v monitoringu dolu Rožná a PVP Bukov, nelze z životnosti dělat přesnější predikce. Blíže je o možnostech jednotlivých teplotních čidel pojednáno v kapitole 3.2.1.

Funkčnost optického kabelu je komentována v textu i znázorněna v grafech v příloze zprávy P-20-33: U vrtu DH1 postupně došlo k poruchám jednotlivých bodů nebo částí kabelu a po cca 3 letech k celkovému výpadku. U vrtu DH3 byla životnost cca 4 roky, také s dílčími výpadky nějakou dobu předtím.

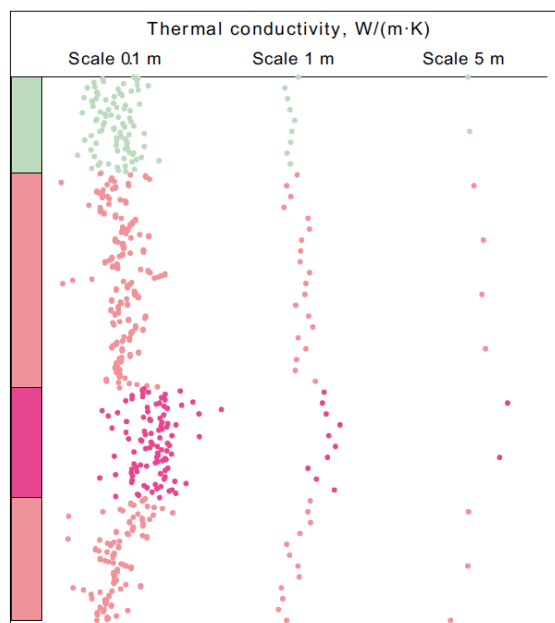
Model dle (Kristensson a Hökmark 2007) měl za cíl výpočtem s homogenními parametry ve velkém měřítku určit okrajové podmínky pro detailní THM model bufferu – teploty na stěně ukládacích vrtů. Modelová oblast byla krychle o hraně 200 m a počítána byla symetrická polovina podle svislé roviny osou experimentálního tunelu (Obr. 2). Parametry jsou převzaty ze starší zprávy (Sundberg et al 2005), fakticky získány inverzním modelem. Byly porovnávány další úpravy modelu: předpoklad zvýšené tepelné vodivosti (porušené) zóny na spodní části obvodu tunelu, tepelná vodivost jako průměr hodnot z laboratorních měření na vzorcích a pokles teploty horniny vlivem větrání v období před instalací experimentu (definovaný časový gradient). Teploty na povrchu ukládacích vrtů bylo možné s dobrou přesností predikovat i s výchozím homogenním modelem, ale úprava vodivosti zóny pod počvou tunelu shodu modelu s měřením zlepšila, přestože fakticky může jít o příspěvek advekce vodou k transportu, ne fakticky vyšší tepelnou vodivost. Hodnota efektivní tepelné vodivosti okolního masivu vyplývající z inverzního modelu byla cca o 7 % vyšší než průměr laboratorních měření (které samy o sobě naznačovaly nehomogenitu). Pro plánovaný monitoring je ale třeba uvážit, že pro Prototype s rozdíly teplot v desítkách stupňů je shoda v řádu jednoho stupně (dosažitelná homogenním modelem) dobrá, zatímco pro přirozené pole ovlivněné jen důlním dílem bude potřeba uvažovat jemnější rozdíly. Užitečné může být pozorování s nehomogenitou vodivosti nebo nestejnými vlivy drenáže okolo obvodu tunelu – tj. porušení rotační symetrie.



Obr. 2 Geometrie modelu pro program CODE\_BRIGTH (Kristensson a Hökmark 2007)

Druhý model (Lönqvist a Hökmark 2015) vychází ze stejných dat a obdobných předpokladů a soustředí se na sekci 2 (vnější) s dvěma vrty č. 5 a 6. Cílem je pak hodnocení mechanických projevů v hornině, zejména vlivem tepelné roztažnosti. Zpráva vychází z předpokladu, že teploty v hornině při ukončení experimentu dosahovaly hodnot jen 5-10 stupňů nižších než dle projektovaného tepelného podle skutečného úložiště, proto by mělo být dosaženo i relevantního efektu na mechaniku horniny. Pro potřeby TM modelování pomocí programu 3DEC je jako pomocný krok provedeno porovnání mezi zdrojem tepla reprezentovaným 3D (půl)válcem v tepelném modelu a liniovým zdrojem v kombinaci s bodovými zdroji na koncích. Vedle homogenního modelu je použit i model s diskretními puklinami, ale jejich efekt je uvažován jen pro mechaniku, nikoli pro transport tepla.

Výše citovaná zpráva (Sundberg et al. 2005) je pak sama o sobě předmětem tematické oblasti III – zabývá se vlivem prostorového měřítka na hodnoty tepelné vodivosti a postupy pro upscaling, mj. ve vazbě na data z experimentu Prototype Repository. Zpracována jsou statistická rozložení různých podskupin vzorků a identifikována s pozicemi ve vrtech. Porovnány jsou hodnoty v třech úrovních měřítka (Obr. 3), rozptyl hodnot s růstem měřítka klesá. Ukázáno je také použití metody VOIA (Value Of Information Analysis) hodnotící efektivitu využití různých jednotlivých měření – např. poměr finančních nákladů k míře redukce nejistoty v měřené veličině. Zkoumán je dále možný vztah tepelné vodivosti s dalšími parametry jako hustota a pórovitost (proloženy regresní vztahy) a s minerálním složením horniny. Takové hodnoty sice neposkytnou přesnější údaj než přímé laboratorní měření vodivosti na vzorku, ale mohou být využity např. pro jednodušší odhad prostorové variability karotáží ve vrtu.



Obr. 3 Příklad aplikace metody upscalingu na data tepelné vodivosti horniny (Sundberg et al. 2005)

### 2.2.1.2 Temperature Buffer Test

Zpráv a publikací bylo k experimentu více, nahlíženo bylo do souhrnných IPR-05-20 (Goudarzi et al. 2005) a TR-12-04 (Åkesson 2012). Experiment má za cíl zkoumat chování bentonitu při teplotách nad 100 °C. Jinak je princip obdobný jako u Prototype Repository, s jiným prostorovým uspořádáním (dvě topidla nad sebou). Monitoring teploty v hornině je v celém

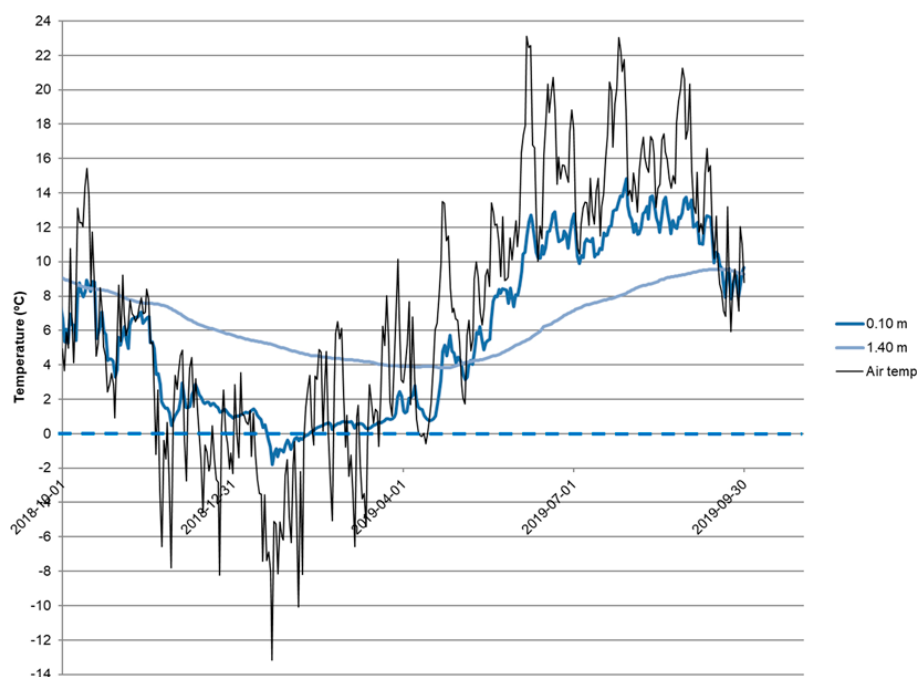


kontextu sekundární, komentována je odchylka od rotační symetrie působením experimentu Canister Retrieval Test v několikametrové vzdálenosti ve stejné chodbě. Teplotní senzory jsou termočlánky zn. Pentronic. Způsob umístění ve vrtech (po 4 senzorech v různých vzdálenostech ve vrtu) není v použité zprávě komentován, ani průměr vrtu pro teplotní senzory.

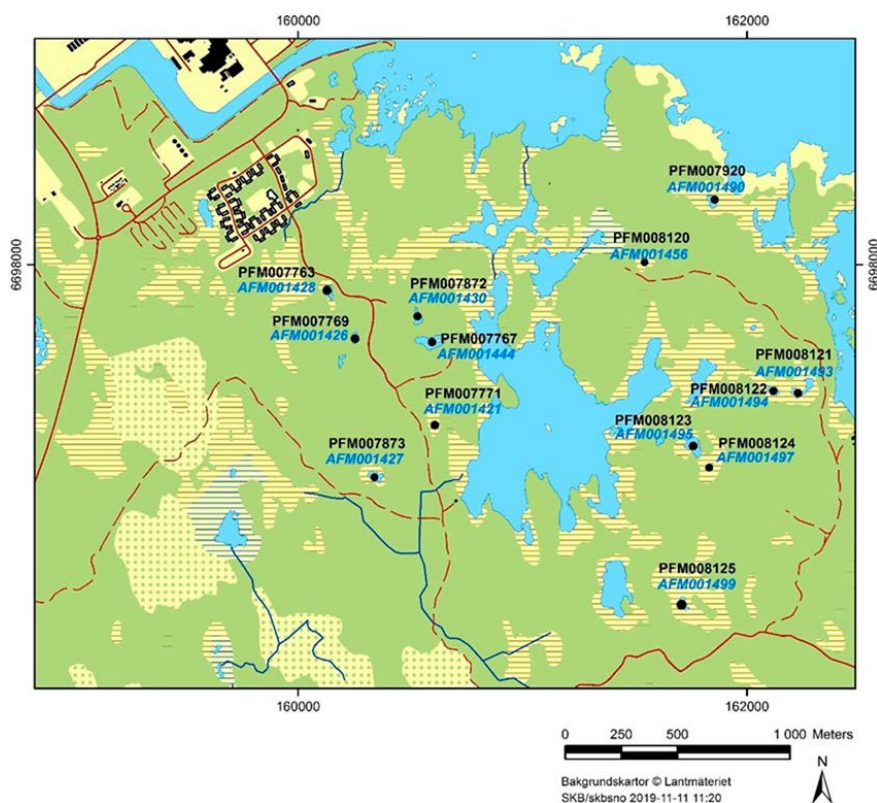
### 2.2.1.3 Monitoring teplot na lokalitách

Měření teplot na povrchu, v půdě a ve vodě, může mít význam jako přesnější okrajová podmínka pro teplotní pole v masivu v měřítku mezi povrchem a důlními prostory. Taková měření jsou součástí hydrologického monitoringu na lokalitě Forsmark. Jedná se o jinou lokalitu než uvažovaná podzemní laboratoř Äspö, ale jde o související aktivitu SKB orientovanou na výzkum kandidátní lokality. Pro potřeby projektu v Rožné/PVP Bukov je relevantní metodická otázka, nikoli konkrétní hodnoty dat, proto nebyly dále zjišťovány vazby Äspö HRL. Z monitoringu jsou vydávány každoroční zprávy, použity byly poslední dvě P-19-08 (Werner 2019) a P-20-10 (Werner 2020) s popisem metodiky lišícím se o opravy, doplnění apod. v daném roce a odpovídajícím časovým intervalem dat.

Měření byla instalována nejčastěji v období 2016-2017. Monitoring teploty vody byl prováděn v 14 resp. 13 jezírcích nebo nádržích. Statistické charakteristiky ročního běhu jsou napříč všemi podobné, kromě velkého rozsahu minimálních teplot. Na 4 pozicích po 2 vrtech, s různým typem půd a rostlinného pokryvu, je kombinované měření půdních vlhkostí a teplot, do hloubky 0,7 m až 1 m, na dalších dvou pozicích pak měření profilu půdních teplot do hloubky 1,4 m. Interval záznamu je 1 hodina případně 3 hodiny, pro vyhodnocení obvykle stačily denní průměry. Z měření nevyplývá žádná nečekaná pozorování. Promrzání bylo v citovaných dvou sezónách omezené, do hloubky max. 0,2 m po doby několika týdnů. Rozmístění stanic a průběh teplot jsou ilustračně na obrázcích Obr. 4 a Obr. 5.



Obr. 4 Ukázka z výsledků (Werner 2020) průběhu půdních teplot ve dvou hloubkách v porovnání s teplotou vzduchu (vše jako denní průměry)



Obr. 5 Rozmístění monitorovacích bodů teplot vody na povrchu v lokalitě Forsmark (Werner 2020)

### 2.2.1.4 Vertikální tepelné pole a paleoklimatické studie

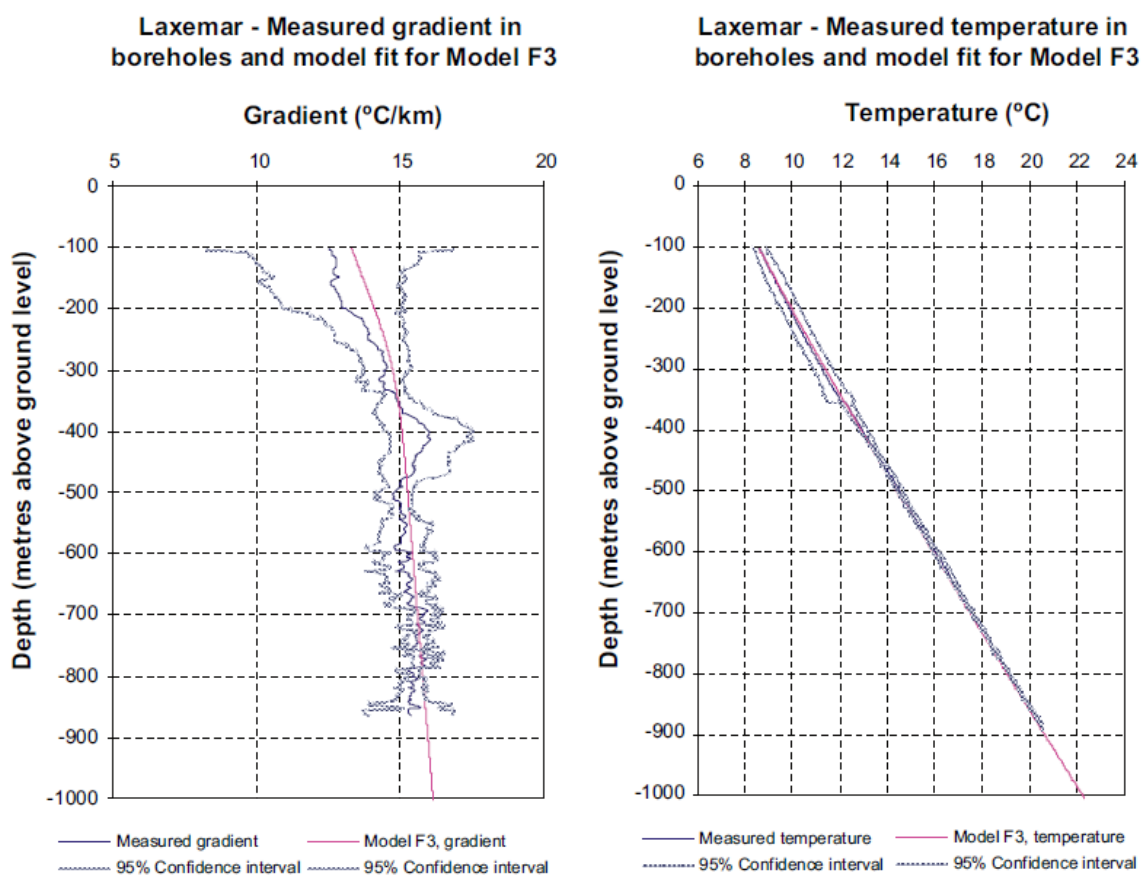
Průběh teploty v hlubokém vrtu je primárně obrazem zemského tepelného toku (ideálně lineární gradient), ale zahrnuje v sobě projevy dalších vlastností a dějů jako je nehomogenita a průběh klimatických změn na povrchu v minulosti (paleoklima). V rámci studia rozšířené lokality Äspö i v rámci celého švédského programu bezpečnosti HÚ jsou zahrnuty studie na interpretaci dat ve vrtu i na klimatické modely historické a budoucí. Metodické postupy vyhodnocení teplot ve vrtech a tepelného toku jsou podrobně zpracovány také v kapitole 5 v rámci vyhodnocení teplotních podmínek krystalinika v ČR, zde jsou citovány konkrétní případové studie v souvislosti s podmínkami a aktivitami podzemní laboratoře Äspö.

Zpráva TR-09-14 (Sundberg et al. 2009) se zabývá interpretací hloubkových profilů teplot na dvou kandidátních lokalitách HÚ, Forsmark a Laxemar. Podle mapových podkladů ve zprávě je území rozmístěných 5 vrtů lokality Laxemar v těsné blízkosti podzemní laboratoře Äspö – ve vzdálenosti cca 2-5 km, tj. srovnatelné se vzájemnou vzdáleností vrtů. Studované tepelné pole ale není v práci interpretováno v kontextu laboratoře a měřených teplot v důlních prostorech (kromě zhodnocení tepelných vodivostí vzorků v rámci jejich shromáždění v databázi). Ve zprávě je zahrnuta kapitola popisující teorii v podobě 1D rovnice vertikálního tepelného pole a z ní odvozených vztahů pro interpretaci dat a různé typy vlivů nad rámec vedení tepla v homogenním prostředí. Za zmínku stojí vztah pro výpočet tepelné produkce ze zastoupení radioaktivních prvků a orientační vztah pro vyhodnocení odeznění tepelného efektu vrtání vrtu (pokles teplotní výchylky v prostoru a čase). Práce zdůrazňuje to, že jednotlivá data vstupující do výpočtu (teplotní gradient, tepelná vodivost/difuzivita, tepelný tok, tepelná produkce, paleoklima) nelze vyhodnocovat samostatně, odhad jedné veličiny je vždy podmíněn správnými vstupy pro zbývající veličiny. Aplikací různých typů modelů a volitelných

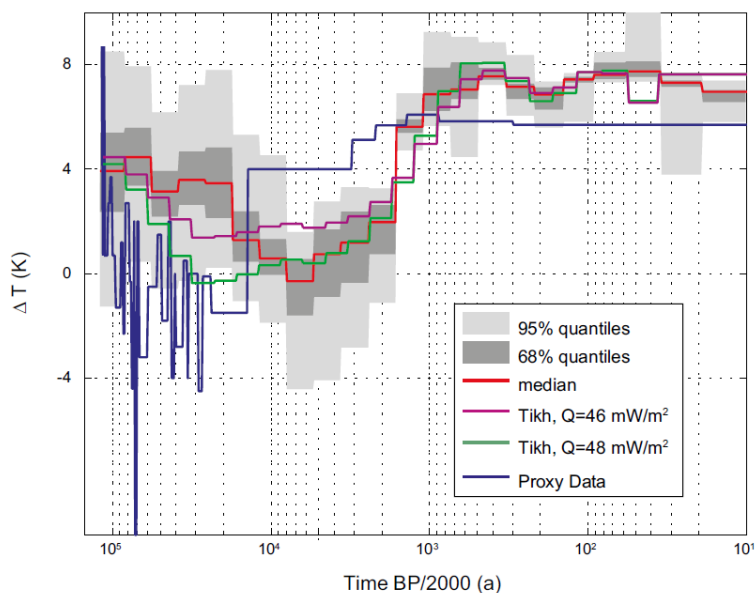
vstupních dat (extrapolace povrchové teploty, velikost tepelné produkce, nehomogenita vodivosti) řeší práce inverzní úlohu optimální shody pro průběhy teploty i gradientu. Úpravou modelu je dosaženo podstatných zlepšení shody a získání konzistentních hypotéz o tepelném poli. Model F3 dosahující nejlepší shody pro lokalitu Laxemar na Obr. 6 je ze skupiny rozšiřujících modelů, kde byly přípustné větší změny parametrů, než by odpovídalo jiným nezávislým zdrojům dat, zejména dílčích úseků historického vývoje klimatu. V diskusi je hodnocena míra projevu klimatu za různá období: vypočtené průběhy jsou významně citlivé na průběh teplot za posledních 10000 let a ovlivnění průběhem starším než 240 tis. let je do hloubky 1000 m velmi malé. Výpočty jsou prováděny vlastní implementací rovnic v programu Mathcad. Vstupní průběh klimatu má podobu po částech konstantní funkce aproximující detailnější zdrojová data, uvažována je homogenní tepelná vodivost v celém profilu bez nelineárních vlivů. Novější zpráva TR-18-06 (Rath et al. 2019) navazuje na výše diskutovanou (Sundberg et al. 2009). Podrobněji vyhodnocuje citlivost modelu na parametry také s použitím metod typu Monte Carlo, příklad výsledku na Obr. 7.

Klimatem jako takovým se zabývá zpráva TR-06-35 (Moberg et al. 2006), kde jde o mnohem širší pohled na nepřímá data (proxy) o vývoji klimatu v minulosti a využití jako přímé součásti bezpečnostního rozboru HÚ, kde je potřeba řešit otázku vývoje klimatu v budoucnu. Překvapivě mezi zdroji dat nejsou vyhodnocovány hloubkové profily ve vrtu. Studie tohoto typu jsou ale zdrojem modelových průběhů teplot (paleoklimatu), které se pak používají jako vstupy do výpočtů časoprostorového vývoje tepelného pole v souvislosti s vyhodnocením hloubkových profilů teplot, např. ve výše citované a hodnocení práci (Sundberg et al. 2009). Rovněž se nepředpokládá, že obdobný postupy by byly součástí vyhodnocení teplot v projektu na PVP Bukov.

Přestože na lokalitě Rožná/Bukov není hluboký vrt z povrchu s měřením teplotního profilu, výše zmíněné studie jsou pro projekt metodicky relevantní. Hodnocení vertikálního vývoje teploty je součástí zadání, přirozené pole teploty je „pozadím“ pro studium vlivu vyražených prostor a cílem bude upřesnit odhad vertikálního profilu i extrapolací průběhů teplot v měřicích vrtech z různých pozic v rámci dolu.



Obr. 6 Porovnaní vybranej varianty modelu vertikálneho transportu tepla s mērením teplot ve vrtech a odvodeným vyhlazeným prūběhem gradientu (interval spoľehlivosti vyplýva z kombinácie dat vŕech 5 vrŕtū) (Sundberg et al 2009).

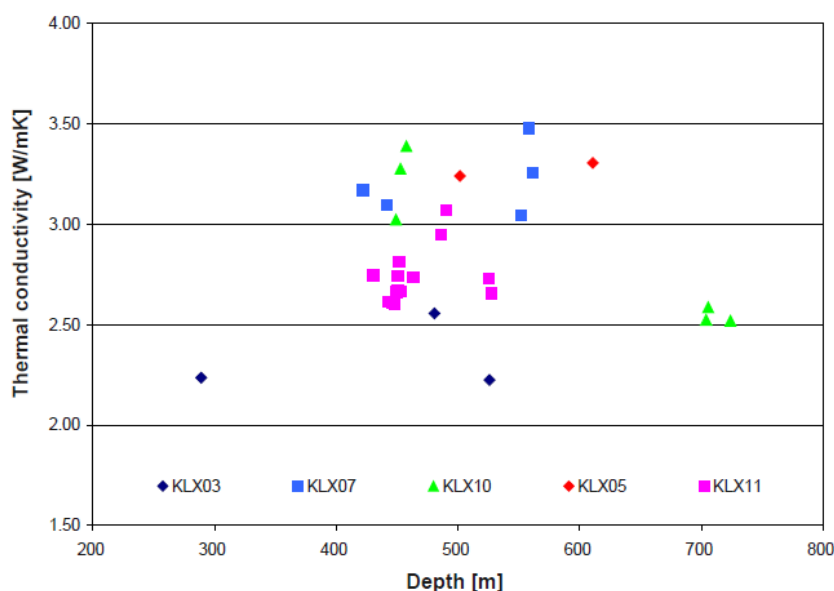


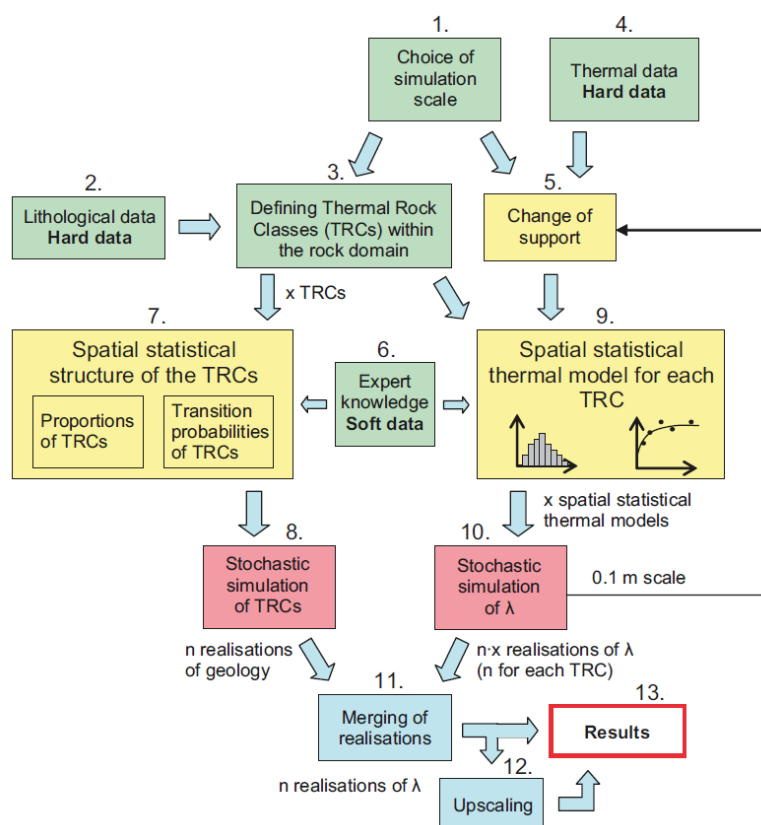
Obr. 7 Znáozornění výsledkū inverzního modelu pro jeden vrŕt lokality Laxemar dle (Rath et al 2019) – historického prūběhu teplot na povrchu s rozdíl proti předpokladu vývoje klimatu dle „proxy dat“

### 2.2.1.5 Tepelné parametry

V rámci průzkumu lokality bylo provedeno mnoho měření tepelných vodivostí vzorků a jejich vyhodnocení z hlediska statistiky, predikovatelnosti a způsobu využití konkrétních hodnot pro různé aplikace. Publikované práce jsou prezentovány jak v kontextu podmínek podzemní laboratoře Äspö, tak v kontextu hodnocení celého území Oskarshamn (Simpevarp-Laxemar) jako jedné z kandidátních lokalit HÚ. Zpráva R-03-17 (Sundberg 2003) vyhodnocuje 22 vzorků z prostoru experimentu Prototype a vrtu KA2599G01 vertikálního délky 129 m z úrovně -344 m dolů. Jsou klasifikovány jednotlivě jako částečně různé typy horniny. Vedle statistického zpracování je analyzován odhad tepelné vodivosti z minerálního složení: proti měření metodou TPS, metoda geometrického průměru (jednodušší) podhodnocuje vodivost o cca 10% metoda „self-consistent approximation“ o cca 7%, v obou případech jsou stejně seřazené vzorky s nižší a vyšší vodivostí. Pro vztahy mezi hustotou a tepelnou vodivostí a hustotou a tepelnou kapacitou byly nalezeny regresní vztahy, hodnoty  $R^2$  jsou cca 0,9 v prvním případě a 0,3 v druhém. Na modelu vedení tepla v prostoru periodického segmentu HÚ je ukázán efekt rozptylu hodnot vodivosti na průběh teploty. Vliv měřítka je podrobněji rozebrán v další zprávě P-05-82 (Sundberg et al. 2005) komentované zvlášť v kontextu experimentu Prototype.

Zpráva SKB P-07-62 (Adl-Zarrabi 2007) analyzuje vzorky z 5 vrtů z povrchu v prostoru ve vzdálenosti 2-5 km západně od laboratoře Äspö (lokality Laxemar). Vzorky jsou z hloubek v rozsahu 300-700 m. Podrobněji je popsán postup měření metodou „Transient Plane Source – TPS“ a kalorimetrem. Ve zprávě jsou vloženy fotodokumentace vzorků a další parametry, hustota a pórovitost. Neobsahuje žádné další hodnocení kromě samotných výsledků měření – grafické shrnutí pro tepelné vodivosti na Obr. 8. Na tato data navazuje obsáhlejší vyhodnocení spolu s dalším měřením ve zprávě R-08-61 (Sundberg et al. 2008), kde se využívají postupy a vztahy diskutované výše z práce (Sundberg 2003) s jinou menší sadou vzorků z prostoru podzemní laboratoře. Je také definován formalizovaný komplexní postup zpracování a zhodnocení dat včetně modelů – Obr. 9





Obr. 9 Schematické znázornění použitého postupu pro „modelování“ tepelné vodivosti, tj. odvození odhadů hodnot z dílčích měřených dat (Sundberg et al. 2008)

### 2.2.1.6 Modely tepelného dimenzování

Zpráva TR-03-09 (Hökmark a Fälth 1993) používá koncept superpozice analytických řešení v různém měřítku i numerický model v detailu jednoho UOS, proveden je výpočet pro vertikální i horizontální ukládání. Podrobně je zpracována problematika přestupu tepla přes montážní spáry. Analytické řešení pro liniový zdroj je korigováno o bodové zdroje na koncích jako efekt podstavy skutečných válců. Ve větším měřítku pak jsou uvažovány celé chodby jako liniové zdroje. Na jednotlivé prvky konceptu řešení se často navazuje v modelech tepelného dimenzování v jiných národních programech.

Zpráva R-08-30 (Lönnqvist a Hökmark 2008) zpracovává výpočet pro konkrétní lokalitu Olkiluoto a zahrnuje tepelné pole i napjatost. Použit je 3D numerický model v lokálním měřítku okolo jednoho horizontálního ukládacího vrtu.

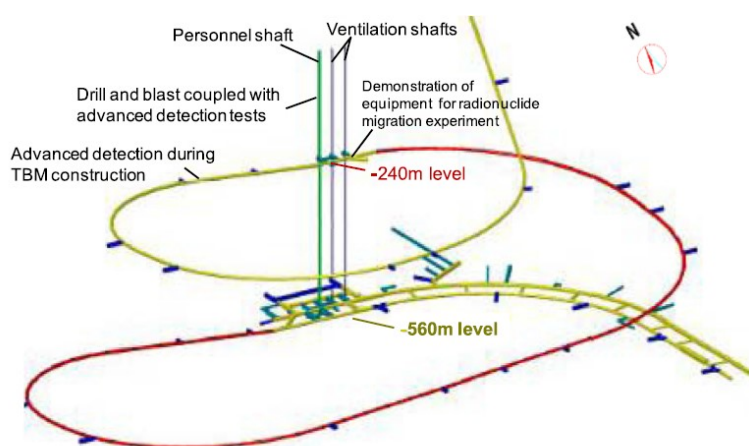
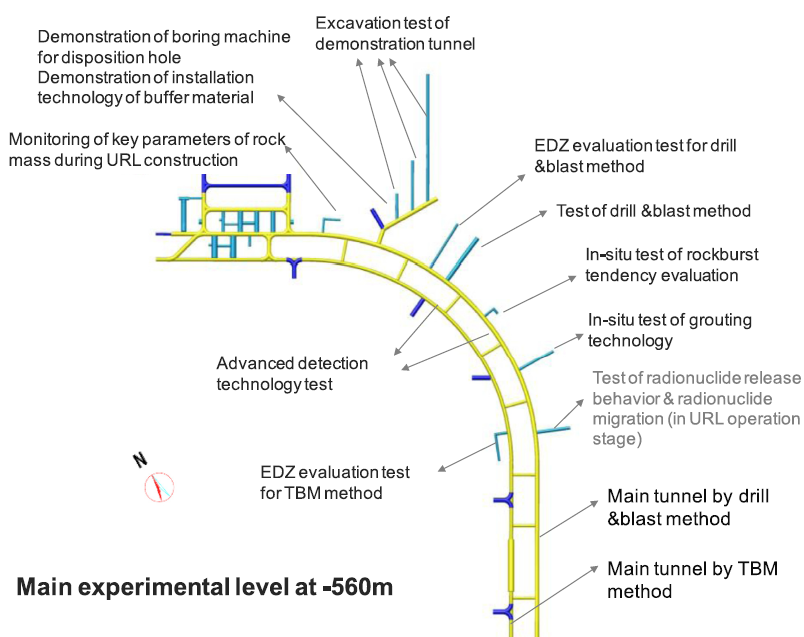
### 2.2.2 Lokalita Beishan

V tomto případě se nejedná přímo o in-situ experimenty nebo data, ale o studie s nějakou souvislostí s lokalitou budované URL – původ vzorků horniny, organizační vztah autorů k čínskému programu HÚ apod.



### 2.2.2.1 Obecný článek Wang et al. (2018)

V článku jsou shrnuty obecné informace a technické údaje o připravované URL (Obr. 10) a samostatná kapitola podrobně seznamuje s metodikou výběru lokality s hodnotícími kritérii. Je zmíněn „Beishan Exploration tunnel“ (BET) – pilotní podzemní pracoviště jako součást technické přípravy, v lokalitě blízké plánované URL, cca 400 m chodeb vedených šikmo z povrchu. Tabulka uvádí seznam in-situ aktivit, mezi nimiž se ale žádná netýká tepelného pole, většina je zaměřena na mechaniku a porušení horniny. Dále je uveden časový plán budoucích aktivit. Nejsou uvedeny přímo studie transportu tepla, ale dá se předpokládat, že budou měření teplot alespoň částečně součástí „Baseline monitoring stage“ (st.0), následně pak v dalších etapách dlouhodobého monitoringu prostředí URL (etapa výstavby i etapa demonstrující ukládací proces).



#### The whole construction process:

- Geological mapping
- 3D laser scanning
- Geophysical survey
- Advanced borehole exploration
- Rock mass quality evaluation
- Video documentation

#### Geological condition and depth dependent tests:

- TBM penetration test
- In-situ stress measurement
- Hydraulic tests
- Rock deformation monitoring
- EDZ evaluation test
- Groundwater sampling and testing

Obr. 10 Plánované uspořádání experimentů a aktivit v podzemní laboratoři Beishan v Číně

### 2.2.2.2 Vliv teploty na hydraulické vlastnosti pukliny (Peng et al. 2020)

Práce se nezabývá přímo tepelným polem horniny, ale efektu tepelného pole na hydraulické vlastnosti, konkrétně jednotlivé pukliny. Použity jsou vzorky žuly z lokality Beishan pro laboratorní experiment doprovázený modelováním. Relevance k projektu monitoringu je spíše nepřímá, nepředpokládají se tak velké změny teplot ani možnost pozorovat obdobné jevy in-situ i s hydraulickými projevy. V obecném kontextu dějů v úložišti může ale jít o zajímavý přístup ke zkoumání sdružených THM procesů. Válcová žulová jádra jsou uměle rozštěpena za vzniku podélné pukliny. Vzorky jsou v cele s řízeným omezujícím tlakem, zahřívány na teploty v několika krocích do 150 °C a měřen průtok vody podél pukliny. Uvažovány jsou vlivy: přímý efekt tepelné roztažnosti na uzavírání pukliny, změna mechanických parametrů s teplotou a nevratné změny nerovností pukliny vlivem redistribuce tlaku. Matematický model uvažuje mířku elastoplastických bloků reprezentující oba povrchy pukliny dle měření. Při opětovném ochlazení nedocházelo k návratu k původnímu hydraulickému rozvětvení. Model umožnil predikovat uzavírání, ale jen omezeně další procesy související s nevratnými změnami.

### 2.2.2.3 Analytické řešení tepelného pole úložiště (Liu a Xiang 2020; Liu et al. 2020)

Jde o generickou studii vycházející z konceptu ukládání KBS-3V v krystalické hornině, která vznikla jako součást čínského programu HÚ, proto byla nalezena skrze vzájemnou citaci s plánovanou URL. Model vychází z podobné myšlenky jako jiné modely pro tepelné dimenzování úložiště: principu superpozice příspěvku tepelného pole jednotlivých ukládacích vrtů (resp. obalových souborů) a přidává navíc okrajovou podmínku na povrchu, která úlohu definuje v nekonečném poloprostoru. To je provedeno uvažováním zrcadlového obrazu a provedením diskretizace plochy povrchu na systém obdélníků a následnou superpozicí. Proveden je výpočet s časovým průběhem tepelného výkonu a spočítanými složkami tenzoru napětí vlivem tepelné roztažnosti.

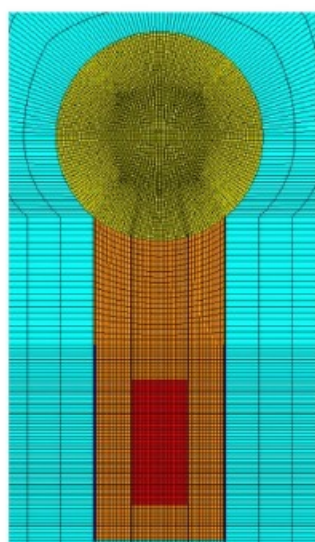
Pro modelové vyhodnocení měření teplot v PVP Bukov nepředpokládáme přímo využití analytických řešení z důvodu nepravidelné geometrie a možného nehomogenního rozložení horniny, je možné se ale u podobných prací inspirovat v metodice upscalingu, např. převodu efektu jednotlivých ukládacích vrtů do efektu úložiště jako „deskového“ zdroje v měřítku celé hloubky od povrchu. Použití zrcadlového obrazu pro zahrnutí vlivu povrchu je bez citace zmíněno také v českém řešení tepelného dimenzování (Kobylka, 2017) se závěrem, že efekt se projeví v časech stovek let teplotou nižší max. o jeden stupeň a lze ho tedy konzervativně zanedbat.

### 2.2.2.4 Citlivostní analýza modelu tepelného pole (Chaudhry et al. 2021)

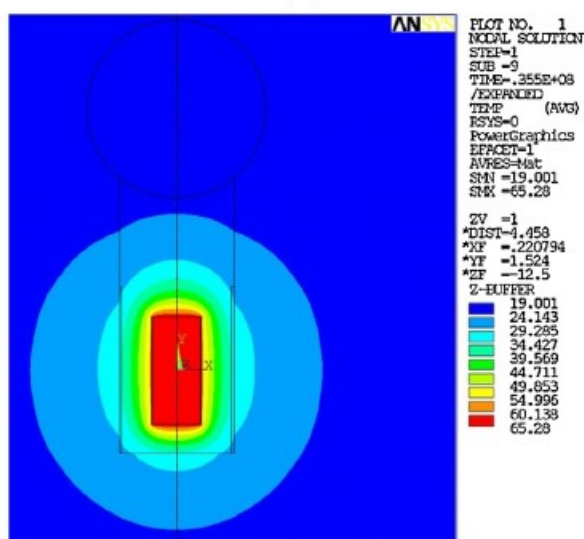
Vazba práce je pouze skrze citaci lokality Beishan jako příkladu programu in-situ výzkumu v souvislosti s přípravou hlubinného úložiště. Jako obecný příspěvek k metodikám modelování tepelného pole má význam jednak pro program úložiště obecně a v částečné míře i pro vyhodnocování monitoringu v rámci projektu. Úloha bodového zdroje tepla ve sférické symetrii reprezentuje např. jeden ukládací obalový soubor v nekonečné homogenní hornině. Je použito analytické řešení zjednodušeného sdruženého THM modelu z jiné práce. Předmětem je provedení citlivostní analýzy v různých variantách. Je uvažováno 8 parametrů s určeným pravděpodobnostním rozdělením. Provedena je tzv. lokální analýza citlivosti (OVAT, tj. každý



parametr zvlášť) a globální analýza citlivosti přes celý parametrický prostor. Vyhodnocení je demonstrováno pomocí různých grafických vyjádření, včetně rozložení míry citlivosti parametrů v prostoru a čase. Výsledky potvrzují, že jednodušší metody, méně výpočetně náročné, jsou vhodné pro základní screening a pro úplnou charakteristiku systému je třeba kombinovat lokální i globální analýzy. Prostorovo-časové mapy je možné také využít jako podklad pro volbu umístění senzorů při monitoringu tak, aby poskytly co nejvyšší kvantitativní informaci o požadovaných parametrech prostředí.



(a)



(b)

Obr. 11 Model transportu tepla v okolí jednoho ukládacího vrtu (Zhao et al. 2014)

### 2.2.2.5 Model tepelného dimenzování s daty Beishan (Zhao et al. 2014)

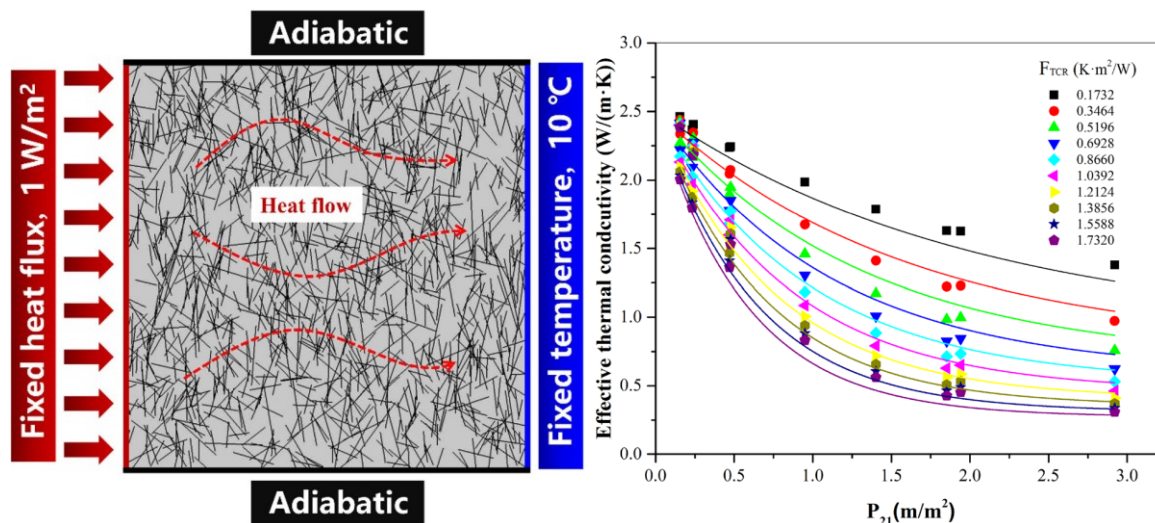
Práce řeší „klasickou“ úlohu tepelného dimenzování HÚ, tj. prostorovo-časové rozložení teploty v blízkém okolí ukládacích souborů a vzdáleném okolí úložiště jako celku. Vychází z koncepčních modelových řešení a výpočetní metodiky použitých ve švédském a finském programu, ale výpočet je proveden s parametry dle čínského programu – žula lokality Beishan, bentonit GMZ, vlastní rozměry HÚ. Pro jeden ukládací vrt je proveden výpočet 2D osově

symetrického modelu v programu ANSYS (bez zahrnutí přístupové chodby) – schéma a diskretizační síť na Obr. 11. Uvažovány jsou montážní spáry mezi komponenty s přenosem tepla vyzařováním. Výsledky jsou zpracovány v návaznosti na analytické řešení pole liniového zdroje, které je pak možné použít pro výpočet pole ve velkém měřítku pomocí superpozice příspěvků jednotlivých vrtů. Zhodnocena je citlivost na vstupní data, která nepřináší nic překvapivého.

### 2.2.2.6 Predikce efektivní tepelné vlastnosti rozpukané žuly (Li et al 2021)

Jedná se o teoretickou práci, která se snaží na základě numerického modelu vedení tepla v hornině se sítí diskontinuit predikovat efektivní tepelnou vodivost prostředí jako homogenizovaný model (Obr. 12). Práce vznikla v rámci čínského programu HÚ a odkazuje se na data žuly Beishan, ale zároveň používá také jiná i generická data z další literatury. Diskontinuity (pukliny) jsou uvažovány jako plochy se zadaným tepelným odporem (data z práce (Bahrami et al, 2006)) vycházející z představy, že přenos tepla napříč plochou je nižší než neporušenou horninou. Efektivní tepelná vodivost je určena zpětným výpočtem tepelného toku z lineárního 1D vztahu. Jsou proloženy závislosti efektivní tepelné vodivosti na hlavních vstupních parametrech (vodivost neporušené horniny, hustota puklin  $P_{21}$ , tepelný odpor nasycené a suché pukliny – Obr. 12). Vyhodnocena je anizotropie při zvoleném příkladu jedné orientace puklin. Omezením je neexistence laboratorního měření tepelného odporu pukliny a varianty modelu jen pro krajní případy plně nasycenou a suché pukliny.

Metodika zpracování a naitované funkční závislosti mohou být užitečné při kalibraci modelu transport tepla v měřítku jednotek metrů při vyhodnocování teplot PVP Bukov, jako upscaling tepelných vodivostí naměřených v laboratoři na neporušených vzorcích (bez puklin) v centimetrovém měřítku.



Obr. 12 Model vedení tepla blokem horniny se sítí puklin s okrajovými podmínkami umožňujícími zpětný výpočet efektivní vodivosti z vypočteného celkového toku. Určené teoretické závislosti efektivní tepelné vodivosti na hustotě puklin a na hodnotě tepelného odporu puklin.

### 2.2.2.7 Laboratorní model proudění a vedení tepla v síti puklin

Laboratorní experimenty a modelování jsou zmiňovány v podobné formě v několika pracích, které obsahem i autorským týmem na sebe zřejmě úzce navazují – Lu et al. (2011), Lu & Xiang (2010), Zhang & Xiang (2010), Gao & Xiang (2016). Dostupné byly abstrakty na WoS, ale nepodařilo se k žádnému získat plný text v angličtině (dva jsou časopisové články v čínštině, dva starší konferenční sborníky v angličtině). Zmiňujeme tedy základní informace z abstraktů. V laboratoři byl realizován experiment na bloku žuly z lokality Beishan s rozměrem 150 × 90 × 30 cm, složeném z devíti menších bloků (v druhé variantě jiný rozměr z více bloků se šikmými puklinami), a je současně měřeno sadou senzorů tepelné pole od zdroje a průtok vody puklinami. Reportována je dobrá shoda mezi experimentem a numerickým modelem.

### 2.2.3 Podzemní laboratoř Grimsel

Na rozdíl od zdrojů ostatních laboratoří (resp. národních programů HÚ) byly v případě zdrojů NAGRA dostupné i starší zdroje, což je pravděpodobně dáno jen rozdílným časovým rozsahem na webu indexovaných zpráv s plnými texty v porovnání s jinými institucemi. Zdroje až do 80. let byly rovněž uvažovány pro rešerši v případech, kdy nebyly obdobné typy studií uváděny jako novější zdroje.

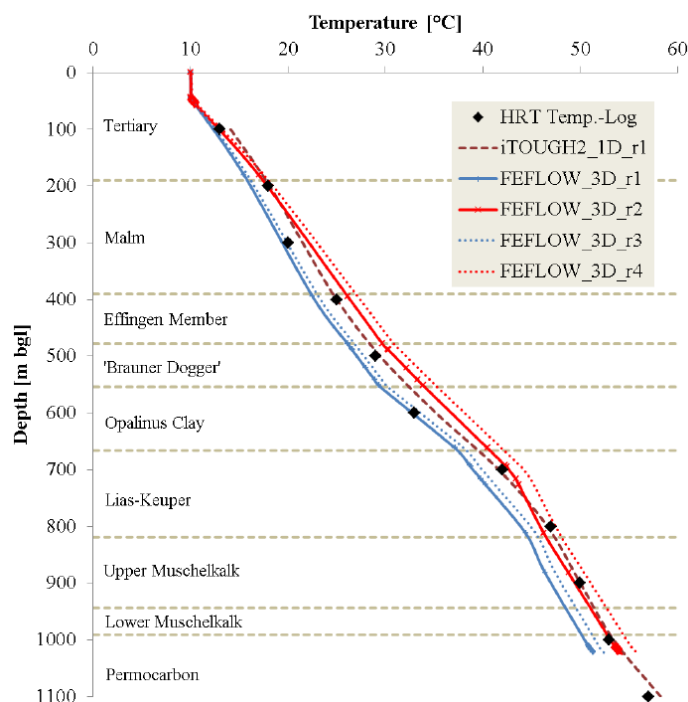
#### 2.2.3.1 Průzkum teplot ve vrtech

Část výsledků hledání ve vztahu k teplotě byly různé realizace průzkumných vrtů zahrnující teplotní karotáž. Samotné údaje o teplotním gradientu na jiných lokalitách nejsou pro potřeby rešerše relevantní. Jen pro úplnost je zde uvedeno, že zpráva číslo 81-07 (není zahrnuta do referencí) s průzkumnými vrty do boku z tunelu Grimsel měla zahrnovat teplotní karotáž, ale text zmiňuje, že nebyla kvůli technickým potížím realizována.

#### 2.2.3.2 Modely vertikálního rozložení teplot pod povrchem

Mezi zprávami NAGRA bylo několik zabývajících se podrobněji výzkumem rozložení teploty v hloubce na základě měření a geologických podmínek konkrétních lokalit. To je orientováno spíše na kandidátní lokality, nikoli na laboratoř Grimsel, ale stručně jsou zde zmíněny z metodických důvodů aplikace numerických modelů na tepelné pole s dalšími vlivy. Zpráva NAB 13-56 (Papafotiou a Senger 2014) v úvodu uvádí na mapě přehled lokalit, které jsou všechny v jílové hornině, proto je tato zpráva pro lokalitu Nördlich Lägern v podstatě jen náhodně vybraný příklad.

Modely vycházejí z podrobných geologických a hydrogeologických dat včetně hlubokých vrtů. Pro teploty jsou dostupné měření z vrtu do hloubky 2500 m přes jílové sedimenty, permokarbon až do krystalinika. Z celého rozsahu vrtu jsou vzorky s laboratorně měřenou tepelnou vodivostí a radiogenní tepelnou produkcí (ta je velmi nerovnoměrná). Teplotní gradient není rovnoměrný. Model je nejprve realizován 1D vertikálně v programu iTOUGH2, následně ve 3D programem FEFLOW jako sružený termo-hydraulický model. Oba typy modelů dokážou zachytit hlavní tvary křivky průběhu teploty s hloubkou (Obr. 13).

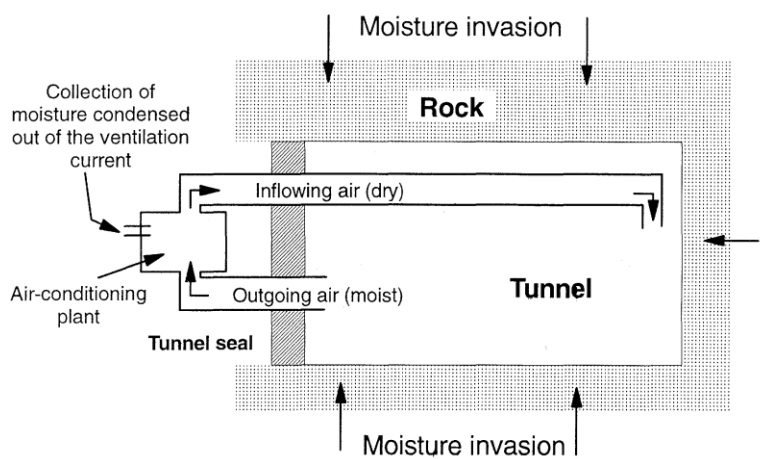


Obr. 13 Porovnání variant modelu vůči měřenému profilu teploty (Papafotiou a Senger 2014), varianty predikce před zahrnutím úprav parametrů a konfigurace pro kalibraci.

### 2.2.3.3 Interakce vzduchu a stěny tunelu

Zpráva NTB 94-04 (Kull a Mieke 1995) je primárně zaměřena na hydraulický efekt – vysoušení horniny zvýšenou teplotou v tunelu. Fakticky ale podmínky jsou předmětem zájmu rešerše i z pohledu teplot jako efekt větrání vzduchem určité teploty na podmínky (i tepelné) v okolní hornině. Experiment je proveden v laboratoři Grimsel v úseku 80 m tunelu do málo ovlivněné části podzemních prostor. Podél tunelu jsou kolmo či šikmo umístěné vrty pro monitorování. Konfigurace větrání je znázorněna na Obr. 14. Pro vzorky horniny byla změřena podrobná data hydrauliky včetně režimu proměnlivé saturace. V rámci celkového trvání cca 1 rok byla v úsecích navyšována regulovaná teplota vhněného vzduchu a v rámci jedné teploty vystřídán vzduch s nízkou a vysokou relativní vlhkostí.

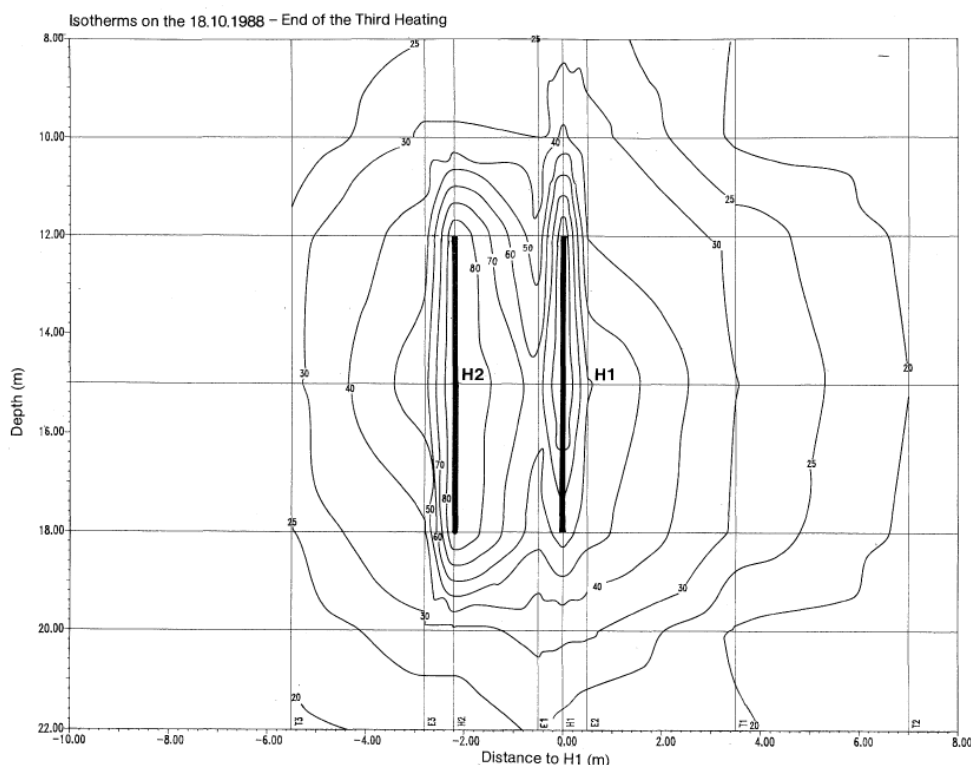
Prezentovány jsou především monitorované tlaky, pro teploty je průběh teploty výstupního vzduchu. Vypočten byl 3D model proudění vody s využitím konceptu dvojí porozity pro reprezentaci systému pukliny-matrace a model označený jako difúzní. Není v souvislosti s tím zmíněna závislost na teplotě. Teplota je nejspíše uvažována jen jako součást uvedených teoretických vztahů řídících proces odpařování z povrchu. Experiment mohl mít i potenciál studia tepelného pole, pokud měly např. použité tlakové senzory integrované kompenzační teploměry. Vzhledem ke stáří práce a sekundárnímu významu pro projekt už nemá smysl podrobněji pátrat. V kontextu hydraulického efektu s 3D modelem muselo jít v té době o ambiciózní projekt.



Obr. 14 Konfigurace experimentu tepelně-hydraulické efektu ventilace v tunelu (Kull a Miehe 1995).

### 2.2.3.4 Experiment ohřívání horniny ve vrtu

Jedná se o experiment přímého ohřevu horniny, podobně jako další realizované době počátků výzkumu in-situ než se přešlo ke komplexním zahřívacím experimentům s bentonitem. Popsán je ve zprávě NTB 88-40 (Schneefuss et al. 1989). Instalována byla dvě topidla do vrtů o průměru 30 cm, v úseku vzdálenosti 12 m až 18 m od ústí. Zahřátí na cílovou teplotu 90 °C proběhlo v několika krocích. Experiment byl monitorován velkým množstvím senzorů v okolních vrtech – uváděno je 127 kusů Pt100 a další termočlánky. Zpráva uvádí i údaje o životnosti, nejvíce případů selhání bylo výbojem po úderu blesku. Výsledky jsou zpracovány v podobě časových průběhů teplot a teplotních map v řezech (Obr. 15). Zpráva také uvádí 2D osově symetrický konečněprvkový model termoelasticity, ale bez dalších podrobností, grafický výstup ukazuje relativně velký rozdíl numerického výpočtu, analytického řešení a měření. Lze soudit, že model uvažovat maximální zjednodušení, homogenní prostředí, konstantní okrajové podmínky. Uvedeny jsou hodnoty tepelné vodivosti a tepelné kapacity pro model, jinak nejsou tepelné parametry ve zprávě diskutovány.



Obr. 15 Experiment zahřívání dvou vrtů v laboratoři Grimsel (Schneefuss et al. 1989).

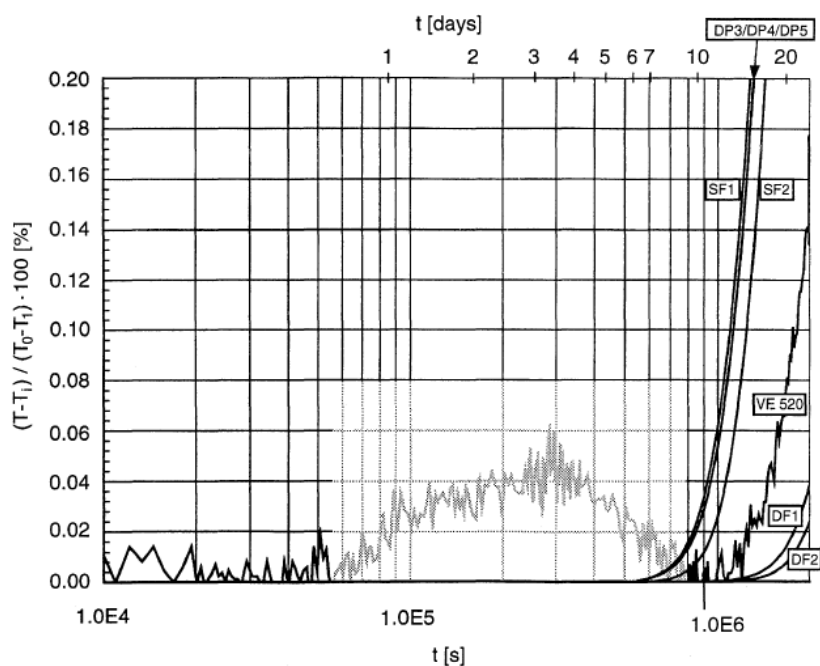
### 2.2.3.5 Experiment proudění s teplotou jako stopovačem

Zpráva NTB 93-47 (Marschall a Vomvoris 1995) popisuje rozsáhlý program studia proudění vody v puklinových systémech a jako jedna z experimentálních metod bylo použito teploty jako stopovače (podobně jako rozpuštěná látka ve vodě). V kontextu obecného studia transportních mechanismů tepla v hornině a možnosti jejich měření a modelování jde o odlišnou konfiguraci od jiných citovaných experimentů.

Stopovací experiment pro sůl i teplo je proveden mezi dvěma paralelními úseky vrtů v kolmé vzdálenosti 10 m. Proudění je uvažováno dominantně po puklině kolmé na oba vrtů. Před experimentem byl proveden modelový citlivostní výpočet pro zjištění potřebného průtoku. Na rozdíl od „klasického“ stopovače soli byla detekovatelnost teploty výrazně nižší, kvůli efektu retence vedením v hornině současně s advektivním transportem po puklině (v porovnání s difúzí rozpuštěné látky do matrice je tepelná difuzivita řádově vyšší). Injektována byla voda o teplotě 60 °C. Predikovaná detekce byla v desetinách až jednotkách procent rozdílu teploty injektované vůči přirozené. Na hranici detekovatelnosti byl i měřený rozdíl teplot v čerpacím vrtu.

Byly použity různé konfigurace modelu a koncepční řešení – tvary pukliny, jedna versus více puklin, model s dvojí porozitou, 2D i 3D. Mezi sebou měly modely pro tepelnou úlohu velké rozdíly, měřený průběh ale zapadal do rozmezí různých variant modelu.





Obr. 16 Porovnání různých variant modelu proti měření pro experiment průniku ohřáté vody po puklině mezi vrty (Marschall a Vomvoris 1995).

### 2.2.3.6 FEBEX in-situ test

Jedná se o všeobecně známý experiment analogu horizontálního ukládání v plném měřítku – shrnutí např. ve zprávě NTB 15-04 (Lanyon a Gaus 2016) a článku (Gens et al. 2009). Modelování proběhlo dokonce ve více projektech s porovnáním mezinárodních týmů.

Zde je uvedeno spíše pro úplnost, podobně jako v jiných podobných případech, teplota v hornině není primárním cílem studia pro experiment. V tomto případě je relativně méně čidel teploty v hornině a při vyhodnocení je věnována pozornost teplotě jen nepřímo (např. nebyla součástí porovnání v projektech Task Force EBS a DECOVALEX). Významná se při numerickém vyhodnocení ukazuje žíla lamprofyru s efektem na tepelnou vodivost, jako možná příčina jiného tepelného výkonu topidla nutného k regulaci předepsané teploty v jedné části experimentu proti druhé, tedy projev různého celkového efektivního odvodu tepla.

### 2.2.3.7 Modely pro tepelné dimenzování

Zpráva NTB 83-20 (Hopkirk et al. 1983) používá tři samostatné modely pro různá prostorová a časová měřítka: 1 UOS bez interakce, segment s interakcí a úložiště jako celek jako kruhový disk. Jde vesměs o maximální zjednodušení odpovídající tehdejšími možnostem.

Zpráva NTB 94-13 (Obayashi Corp 1998) je výpočet pro konkrétní konfigurace horizontálního ukládání, je uvažován periodický segment jednoho UOS v rámci jednoho ukládacího vrtu, s vertikálním rozsahem modelu až k povrchu, což následně vyžaduje poměrně hrubou diskretizaci okolo ukládacího vrtu.

## 2.2.4 Podzemní laboratoř KURT

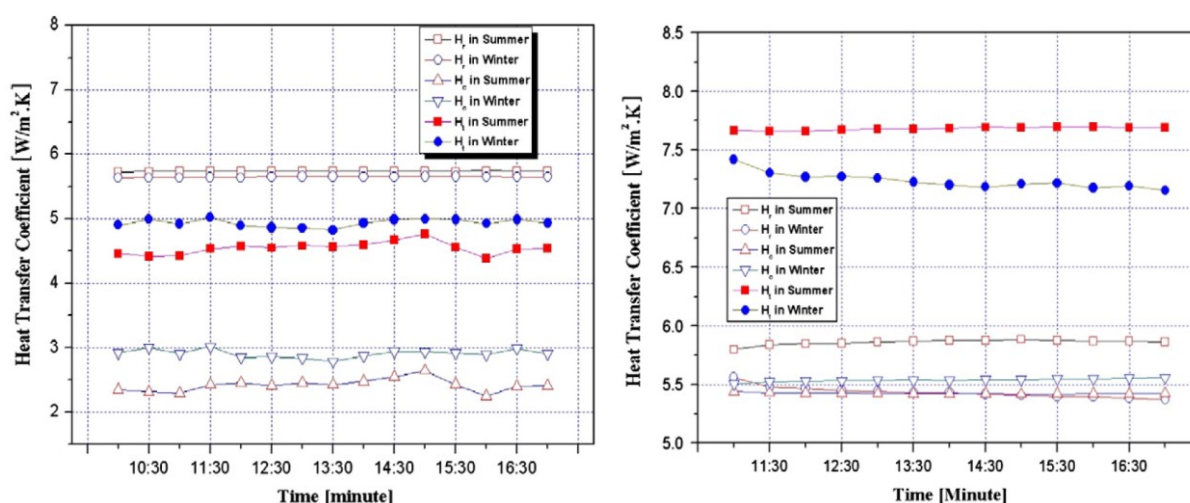
Komentovány jsou podrobně 4 články v časopisech nalezené v databázi WoS s různými relevantními tématy k problematice transportu tepla v hornině v důlních podmínkách. Pro

úplnosť je zmíněn jen zde v úvodu zahřívací experiment zahrnující bentonitovou bariéru (Lee et al. 2021), který je obdobou experimentů v jiných podzemních laboratořích, přičemž primárně je instruován prostor bentonitu, doplněný o vertikální vrt v hornině s teplotami, které nejsou v článku vyhodnocovány.

### 2.2.4.1 An experimental study regarding the determination of seasonal heat transfer coefficient in KURT by convection conditions (Yoon et al. 2013)

Článek popisuje komplexní měření koeficientu přestupu tepla mezi vzduchem v tunelu a povrchem horniny a interpretaci pomocí teoretických vztahů založených na mechanice tekutin (proudění vzduchu). Kontext práce je vysvětlen jako nezbytný vstup pro řízení teplotních podmínek v hlubinném úložišti (experiment také pracuje se zahřívanou horninou „zevnitř“ jako analogem), čemuž jinak není věnována pozornost, protože v rámci tepelného dimenzování pro uzavřené úložiště už žádné volné povrchy horniny s tepelnou konvekcí nejsou. Pokud by ale zjištěné vztahy bylo zobecnitelné i pro jiné poměry teplot a vlhkosti než při uměle zahřátém povrchu horniny, bylo by relevantní a dobře využitelné pro samovolnou výměnu tepla mezi horninou a větranými podzemními prostory.

Experiment je provozován ve stěně uzavřené koncové části tunelu délky cca 12 m, profil tunelu je cca 6 m × 6 m. Vrt v boční stěně je zahříván 2 m dlouhým topidlem výkonu 5 kW, což je samostatný experiment komentovaný rovněž v rámci rešerše (Kwon et al. 2013), jehož pouze doplňkem je tato studie s přestupem tepla. Měření probíhalo v kratších kampaních po několik hodin jednou v letním a jednou v zimním období. Rozlišeny byly dále podmínky s přirozenou konvekcí (vypnuté větrání laboratoře) a nucenou konvekcí (dle dokumentovaného režimu větrání). Pro aplikaci teoretických vztahů bylo třeba určit specifické geometrické a termodynamické parametry. Stanovení faktoru tření mezi stěnou a vzduchem bylo založeno na měření proměnlivosti sklonu povrchu speciálním přípravkem. Měřeny byly teploty suchého a mokrého teploměru, tlak vzduchu, určena hustota a viskozita vzduchu, Reynoldsovo číslo. Celkový přestupový koeficient byl určen z příspěvku konvektivní výměny tepla a radiace (Obr. 17). Rozdíl mezi hodnotami koeficientu v létě a v zimě je způsoben rozdílnými podmínkami vlhkosti a teploty vzduchu, ale je menší než se předpokládalo.



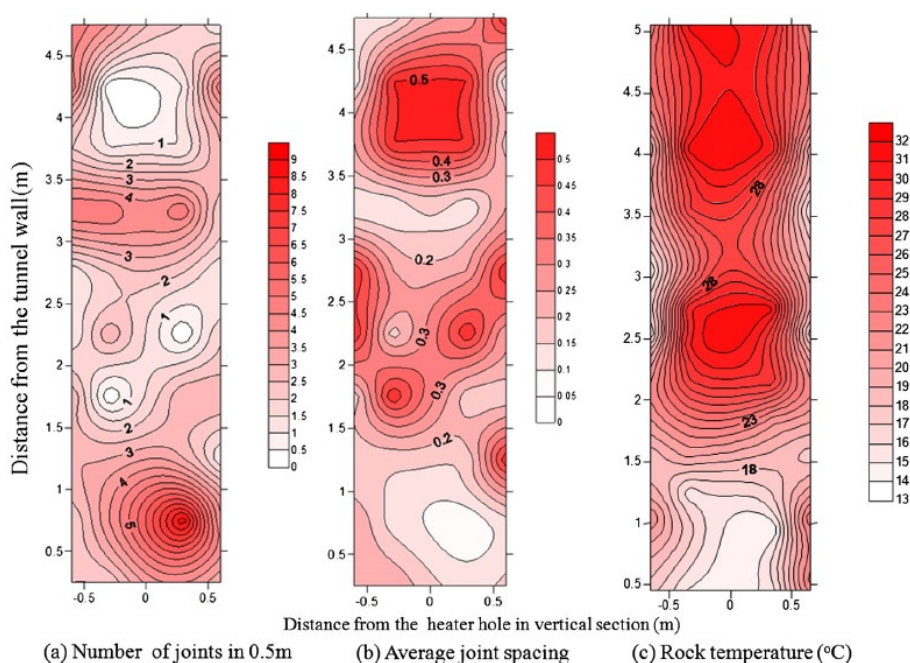
Obr. 17 Určení koeficientů přestupu tepla při přirozené konvekcii (vlevo) a nucené konvekcii (vpravo) během dvou experimentálních měření v zimním a letním období (Yoon et al. 2013).



### 2.2.4.2 In situ borehole heater test at the KAERI Underground Research Tunnel in granite (Kwon et al. 2013)

Předmětem experimentu je pozorování termo-mechanických dějů při ohřívání horniny, i když se konfigurací nejedná o analog podmínek úložného vrtu. Topidlo je umístěno v horizontálním vrtu průměru 11 cm v boční stěně koncové části tunelu s profilem cca 6 m × 6 m. Topná část, s celkovým výkonem 5 kW, délky 2 m, je umístěna s odstupem 1,2 m od stěny tunelu. Měření teplot je umístěno v sadách vrtů ve vzdálenostech cca 30 cm a 60 cm do všech 4 směrů. V bližších vrtech je po 12 senzorech s rozestupy 0,3 až 1 m, ve vzdálenějších je po 9 senzorech s rozestupy 0,5 až 1 m. Další vrty byly pro senzory měření napětí. Měřeny byly dále teploty vzduchu a experimentální i protější stěny tunelu. Celkové trvání experimentu bylo 4 roky, doba s regulovanou cílovou teplotou 90 °C byla cca 2,5 roku.

Vyhodnocení dává do souvislosti hodnoty teploty s množstvím puklin detekovaných v jádrech vrtů. Bodovými hodnotami byly proloženy plošné mapy ve vodorovných a svislých řezech (Obr. 18). Nižší měřené teploty korespondují s vyšší hustotou puklin (menšími rozestupy). V těchto částech tedy dochází k většímu transportu tepla od topidla, ale není to interpretováno přímo jako rozdíl v tepelné vodivosti, ale pro zónu kolmo na vrt ve vzdálenosti cca 3 m jako efekt advekce proudící podzemní vodou a pro zónu při stěně tunelu jako efekt konvektivního ochlazování v tunelu. Příčina porušení v této části je interpretována jako EDZ ražby. V tomto článku nebylo prováděno numerické modelování experimentu.

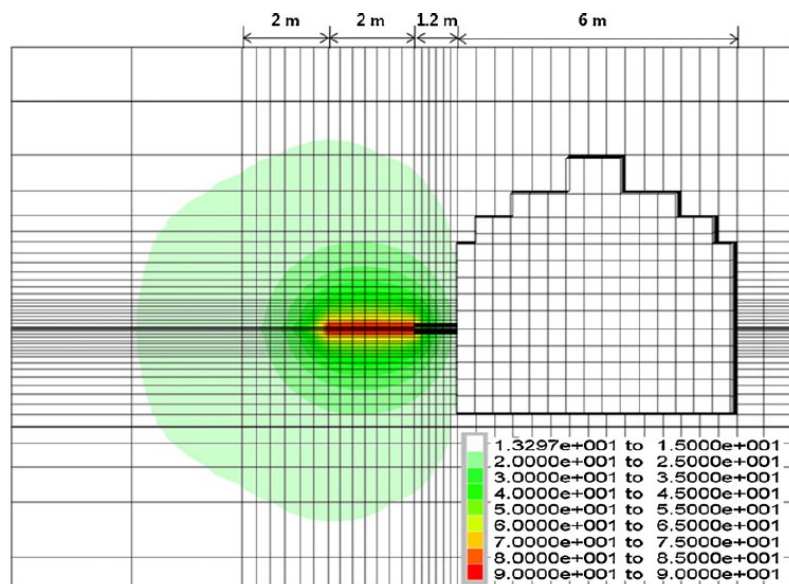


Obr. 18 Porovnání rozložení míry porušení horniny a rozložení měřených teplot ve svislém řezu podél topného a 4 měřících vrtů (Kwon et al. 2013).

### 2.2.4.3 In situ experiments on the performance of near-field for nuclear waste repository at KURT (Cho et al. 2012)

Práce vyhodnocuje vlastnosti EDZ v různých částech tunelu KURT. Jednou součástí je hodnocení termo-mechanických procesů experimentu s topidlem ve vrtu (článek rešeršovaný v samostatné sekci – Kwon et al., 2013). Prezentován je numerický model vedení tepla v programu FLAC3D, ve svislé rovině kolmo na tunel, zahrnující i protější stěnu (Obr. 19).

Model je ve dvou variantách, s EDZ a bez EDZ. Parametry nejsou detailně uvedeny, lze tedy usuzovat kromě zóny EDZ, že jde o homogenní kontinuum s referenční hodnotou parametrů, okrajové podmínky jsou zadané jednoduše konstantní teplotou ve vrtu a konstantní teplotou na stěně tunelu (průměr v čase z měření). Zahrnutím EDZ se shoda modelu s měřením částečně zlepšuje, ale přesto jsou rozdíly mezi modelem a měřením výrazné. Jako vlastní interpretace autora rešerše lze dodat, že z výsledků měření je na pohled patrný velký vliv heterogenity nebo anizotropie a případné další efekty (např. rozdíly teplot v různých směrech ve stejné vzdálenosti až 15 °C).



Obr. 19 Model tepelného pole okolo zahřívacího experimentu ve vrtu v laboratoři KURT (Cho et al. 2012).

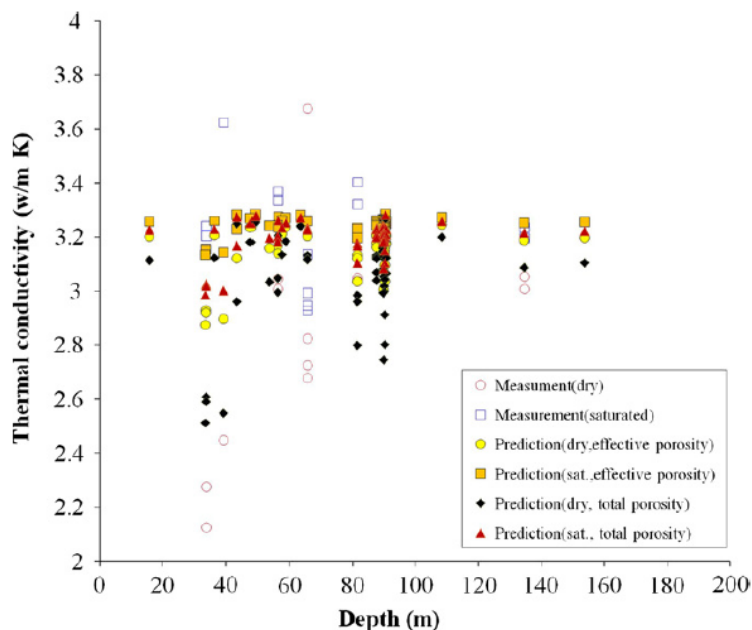
#### 2.2.4.4 Initial thermal conditions around an underground research tunnel at shallow depth (Kwon et al. 2011)

Článek zkoumá více aspektů souvisejících s tepelnými procesy a vlastnostmi horniny v podzemní laboratoři KURT. Je zpracováno rámcové vyhodnocení závislosti tepelných, mechanických a hydraulických parametrů na hloubce, některé do 90 m, což je hloubka dosažená přímo tunelem laboratoře, některé do 150 m. Druhá část je model tepelného ovlivnění horniny v časovém měřítku celého období ražby tunelu.

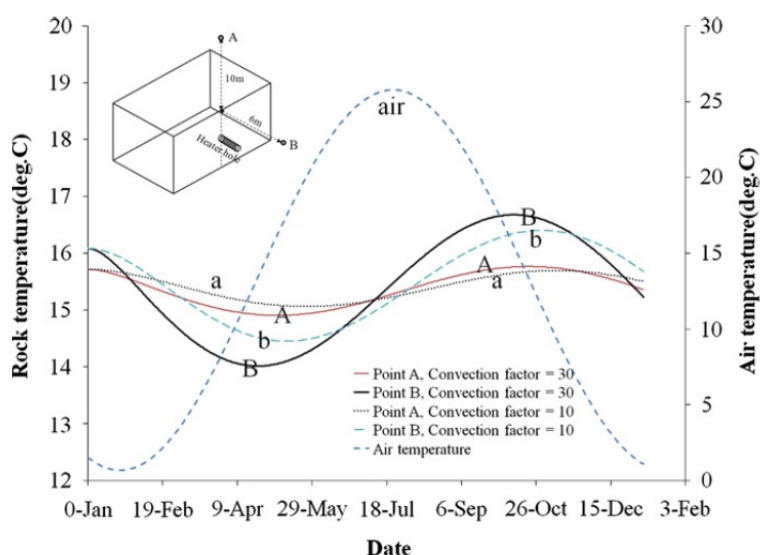
Tepelné parametry jsou porovnány mezi přímým laboratorním měřením vzorků a teoretickým odvozením různými metodami. Jsou aplikovány tři typy průměrování hodnot tepelné vodivosti pro jednotlivé minerály z jejich procentního zastoupení v každém jednotlivém vzorku (Obr. 20). Tepelná kapacita je predikována převzatým vztahem z hustoty, pórovitosti a jednoosé pevnosti horniny v tlaku. Pomocí průměrování (třífázového) i měření je vyhodnocována závislost tepelné vodivosti na nasycení.

Efekt tepelného ovlivnění horniny je predikován 3D modelem v programu FLAC3D, v bloku o rozměrech 600 až 700 m, s digitálním modelem terénu. Zahrnuto je vertikální rozložení hodnot parametrů. Je modelována ražba v sekvenčních krocích, reprezentována je celá struktura chodeb laboratoře. Explicitně je předepsán geotermický gradient. Průběh teplota vzduchu v čase je aproximován z měření proložením goniometrickou funkcí. Vypočten je efekt změn na vertikální profil procházející ve vzdálenosti 6 m od tunelu – je vidět sezónní efekt od povrchu

do cca 20 m hloubky a v úrovni tunelu v rozmezí cca 40 m, s menší amplitudou a časovým posunem proti změnám u povrchu. Přímý efekt ražby a větrání laboratoře je pak znázorněn s pomocí průběhu ve dvou pozorovacích bodech A a B v různé pozici vůči tunelu (Obr. 21). V citované práci není k tomuto modelu žádné porovnání s měřením. Dle názoru autorů rešerše je útlum výkyvů teploty v souladu s jinými podobnými studiemi. Vedle toho je v článku prezentováno rozložení teploty stěny vrtu v závislosti na metrži, ze kterého lze usuzovat na postupné vyrovnání s větracím vzduchem, ale jsou dle názoru zpracovatele rešerše patrné i další jevy nejasného původu.



Obr. 20 Porovnání mezi měřenou a predikovanou tepelnou vodivostí v závislosti na hloubce a na nasycení (Kwon et al. 2011).



Obr. 21 Predikce vlivu sezónních změn teploty na horninu ve dvou pozorovacích bodech (A 10 m od tunelu vertikálně a B 6 m od tunelu horizontálně) pro dvě varianty koeficientu konvektivní tepelné výměny (Kwon et al. 2011).

## 2.2.5 Podzemní laboratoř Mizunami

Na základě referencí od provozovatele JAEA byly identifikovány jen dvě souhrnné práce obsahující zmínku o výzkumu v souvislosti s teplotním polem.

### 2.2.5.1 Final Report on the Surface-based Investigation (Saegusa a Matsuoka 2010)

Jedná se o shrnující zprávu o výzkumu včetně celkového konceptu URL Mizunami, povrchového průzkumu, výstavby a samotných experimentů. Jako součást bylo měření vertikálního teplotního gradientu a laboratorní měření tepelných parametrů vzorků z vrtného jádra. Výsledky jsou prezentovány v kontextu postupných kroků průzkumu lokality: sběr dat karotáže existujících vrtů, jeden vrt na lokalitě do 500 m a další vrt do cca 1250 m. Konstatována je shoda gradientu (i když z grafu je patrný odstup hodnoty teploty vrtů na lokalitě od průměru dřívějších) a hodnoty parametrů v souladu s histogramy dat z jiných zdrojů. Závěr je, že pro určení vlastností stačí provedení teplotní karotáže v jednom vrtu za předpokladu, že v lokalitě není zdroj tepla např. vulkanického původu. Obdobně, laboratorní stanovení tepelných parametrů na vzorcích z jednoho vrtu je dostačující, s uvážením možné heterogenity v závislosti na zastoupení minerálů v hornině a charakteru pórového prostoru. V porovnání s výzkumy na lokalitách v jiných zemích se jedná o překvapivě jednoduché závěry, což může být dáno kontextem výzkumu pouze pro získání orientačních informací před detailním stanovením vstupů pro hodnocení bezpečnosti. Co se týká samotného měření a zdrojů dat, zpráva odkazuje na další zdroje v japonštině.

### 2.2.5.2 Synthesized Research Report in the Second Mid-term Research Phase (Mizunami, Horonobe) (Hama et al. 2016)

Zpráva je dle názvu shrnutím výzkumných aktivit za dané období ve vztahu k dvěma lokalitám URL. Rekapitulovány jsou stejné závěry ohledně tepelného gradientu a měření tepelných vlastností vzorků horniny dle zprávy (Saegusa a Matsuoka 2010).

Mimo relevanci této rešerše je ve zprávě zmíněn monitoring změn teploty a vlhkosti v hornině vlivem větrání v podzemní laboratoři Horonobe v jílové hornině a větší pozornost je také věnována vývoji teplot v „geologické“ historii a termochronologii pro interpretaci minerálního složení.

## 2.2.6 Podzemní laboratoř ONKALO

Rešerše byla podobně jako v předchozím případě směřována na všeobecné in-situ studium teplot nad rámec aktivit přímo v podzemní laboratoři, naopak upozaděny byly experimenty se zahříváním. Nalezené práce v databázi zpráv Posiva odpovídaly podobné struktuře výzkumných oblastí jako v případě SKB: studium tepelných vlastností hornin lokálně, analýza vertikálního profilu teplot z povrchu v souvislosti s klimatem. Specifickými tématy s relevancí pro projekt Bukov je dlouhodobý program monitoringu mechaniky hornin zahrnující i teploty a in-situ měření tepelných parametrů horniny ve vrtu.

### 2.2.6.1 Aktivity monitoringu teplot

Souhrnné informace o monitoringu teplot jsou prezentovány jako součást monitoringu mechaniky hornin (od roku 2012), k němuž jsou vydávány pravidelné zprávy každý rok. Pro rešerši byla použita poslední WR 2021-47 (Haapalehto et al. 2021). Cílená starší studie na vyhodnocení monitorovaných dat teplot je WR 2013-58 (Sedighi et al. 2013). Hlavní sady teplotních dat jsou uváděny: (1) teploty ve vrtech z povrchu, profil z karotáže (2) teploty vzduchu v různých bodech ukloněné přístupové chodby (3) teploty vzduchu a půdy na povrchu. Vrtů z povrchu s teplotní karotáží je uveden velký počet, podle číslování cca 20, hloubka je obvykle 600 m nebo 1000 m. Část teplotních profilů je získána aparaturou Posiva Flow Log (PFL) pro hydraulické zkoušky úseků vrtů. Ze zdroje není zřejmé, zda jde z hlediska získaných hodnot teplot o ekvivalentní podmínky měření karotáží a jak rozumět prezentovaným datům PFL „with pumping“ a „without pumping“. Výsledky jsou na Obr. 24, podrobněji je komentováno v následující kapitole. Teploty v přístupové chodbě (celková metráž 4580 m) jsou měřeny v 12 místech (Obr. 22), společně s měřením vlhkosti a odečítány manuálně jednou měsíčně. Na povrchu jsou v provozu 4 meteorologické stanice.

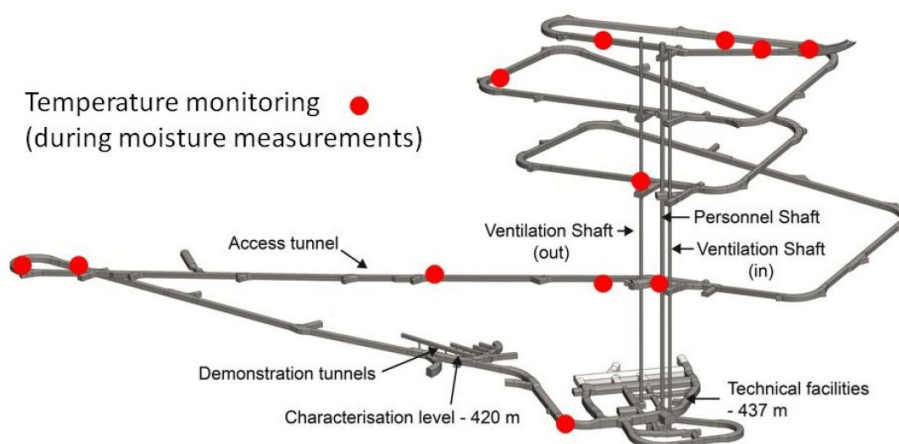
Specifické měření teplot v hornině je z roku 2012 uváděno v hloubce 140 m v průzkumném výklenku ve 3 vrtech a nichž jeden je nefunkční. Monitoring byl zahájený 2009, automatický záznam je s intervalem 20 minut. Vrty jsou 5 resp. 10 m dlouhé, rozmístění senzorů ze zprávy není patrné, možné jde o graficky znázorněné dílky, což by i odpovídalo celkovému počtu 16 senzorů s prezentovanými daty. Další sada je měření extenzometrů v hloubce 435 m (technická místnost), jde o 2 vrty, v každém teploměry v hloubkách 7 m a 12,8 m. V roce 2020 není uváděno měření ve výklenku -140 m a jsou uváděny navíc další 3 měření s extenzometry (poblíž původního a v hloubce 422 m), s různými pozicemi senzorů, typicky 2 m, 5 m, 7 m nebo až v 14 m. Měření na pozici „demonstration tunnel 3“ (-422 m) za jeden tok je ukázáno na Obr. 23. Překvapivě téměř není zřetelný útlum výchylek teplot se vzdáleností ve vrtu. Ve zprávě chybí zakres pozice vrtu (senzorů) vůči chodbám, z obrázku polohy chodeb v celém podzemním pracovišti nelze vyloučit, že vrt směřuje k jiné chodbě. Tomu by odpovídal obrázek vrtu a senzorů pro pozici „technická místnost“.

Prezentovaná měření teplot ve vrtech z větraných chodeb mají podobné podmínky jako plánovaný monitoring dolu Rožná / PVP Bukov v rámci projektu. Vyhodnocení v kontextu polohy senzorů ale v textu zpráv není věnována pozornost. V případě měření ve vrtech z výklenku na -140 m (Sedighi et al. 2013) jsou záznamy jednotlivých senzorů prezentovány jako samostatné malé grafy, takže z čar není jednoduše vidět jejich vzájemný vztah, prostým hodnocením měřítka svislé osy se zdá být rozsah průběhu u všech senzorů podobný (mírný útlum je vidět proti teplotě vzduchu a stěně tunelu), což ovšem v tomto případě spíše nelze vysvětlit interakcí s jiným blízkým otevřeným prostorem. Zpráva toto nijak nekomentuje. Jako prostředek vyhodnocení všech dalších dat používá fourierovskou analýzu časových řad pro detekci periodických složek a neperiodických trendů v průběhu teplot.

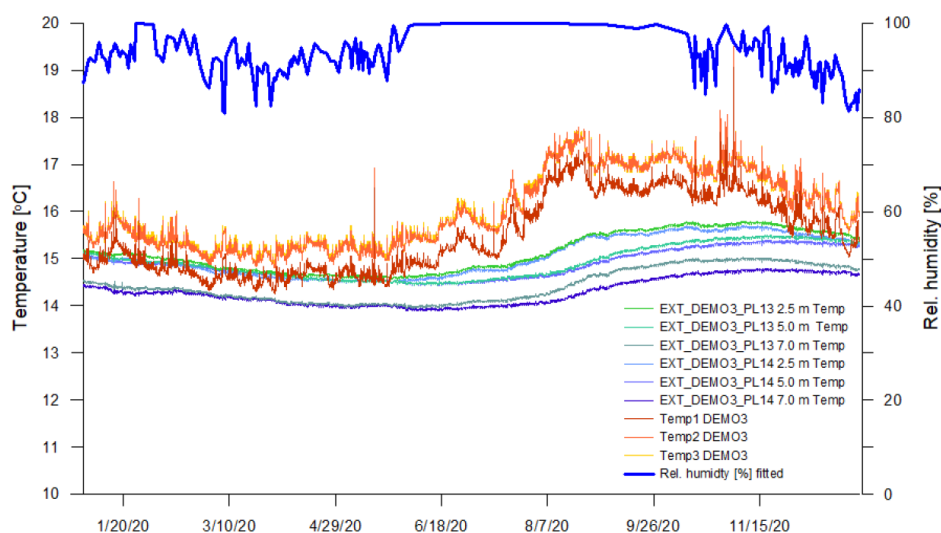
Teploty jsou měřeny i jako součást programu monitorování prostředí, kde je cílem hodnocení případného dopadu výstavby a provozu finálního HU, aktuální zpráva je WR 2021-45 (Alho et al. 2021). Dominantně je výzkum zaměřen na hydrologická data, u nichž byly zjištěny drobné odchylky, nejsou interpretovány jako dopad výstavby. Meteorologická stanice (OL-WOM1) je provozovaná v souvislosti s jadernou elektrárnou (povinně). Citovaná zpráva zhodnocuje konkrétní průběh v jednom roce (vůči normálu), statistiky po měsíci od 1993. Porovnává dále dvě stanice státní meteorologické služby, 30 km a 45 km. Dále je komentována hloubka promrzání na třech místech různého povrchu, což může být v širším kontextu zajímavý údaj



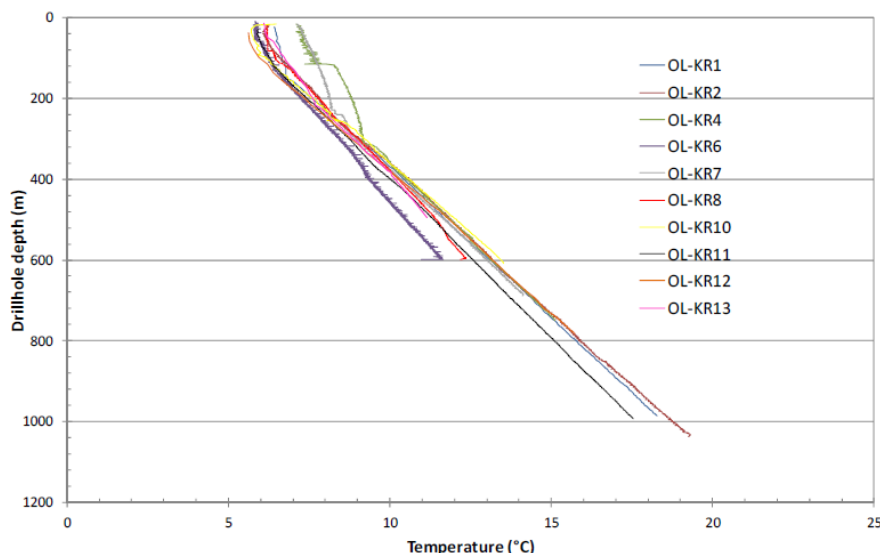
pro vztah mezi teplotou vzduchu a původní teplotou, jako upřesnění okrajové podmínky pro modely vertikálního tepelného toku.



Obr. 22 Rozmístění monitoringu teploty vzduchu v přístupové chodbě ONKALO (Haapalehto et al. 2021).



Obr. 23 Průběh měřených teplot a vlhkosti jako součást extenzometru, senzory v uvedených hloubkách od stěny chodby (Haapalehto et al. 2021).



Obr. 24 Vertikální profily teplot v 10 různých vrtech v lokalitě Olkiluoto (Sedighi et al. 2013)

### 2.2.6.2 Vertikální tepelné pole a paleoklimatické studie

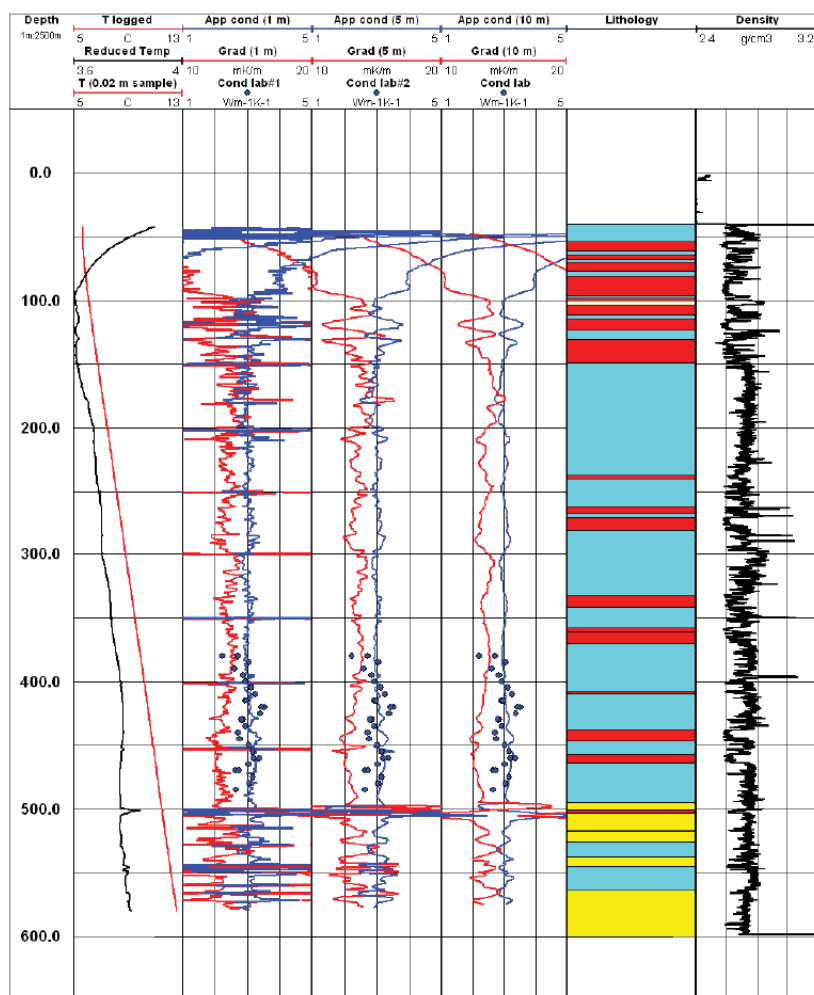
Ve výše citované zprávě (Sedighi et al. 2013) je provedena jen základní interpretace vertikálních profilů – zobrazení shluků více měřených profilů, lineární regrese pro výpočet gradientu z karotážních a PFL dat, časového vývoje z opakovaných měření s nepravidelným intervalem a horizontálních mapy teplot v hloubkových úrovních. Přestože se nepředpokládá vliv sezónních změn na měření a zpráva to tak komentuje, z grafů jsou patrné změny teplot (spíše nepravidelné) ze kterých není zřejmé, v jakém smyslu případně jde o nepřesnost nebo ovlivnění měření, což by byla podstatná informace pro uvažování nejistot z tohoto typu dat.

Detailnější vyhodnocení ukazují zprávy WR 2011-79 (Kukkonen et al. 2011) a WR 2015-49 (Kukkonen et al. 2015).

V práci (Kukkonen et al. 2011) jsou použita data z jednoho vrtu do cca 580 m hloubky. Jsou odvozeny tepelné vodivosti z Fourierova zákona při konstantním tepelném toku, tj. nepřímo úměrné změřenému gradientu. Pro zachycení prostorových variací je nutná karotáž s vysokým rozlišením měření teploty (zde 1 mK) a co nejmenším prostorovým krokem měření (zde 2 cm, koresponduje s časováním posunu sondy 1 s). Graficky shrnuté výsledky jsou na Obr. 25, přímo ve zprávě je také graf tepelné vodivosti na pozadí rozvinutého kamerového snímku stěny vrtu. Dále je na 2D numerickém modelu testován vliv ukloněné zóny vyšší tepelné vodivosti a případná potřeba korekce při tepelném toku odchýleném od vertikálního směru a měření v ukloněném vrtu. Je konstatováno, že zdánlivá tepelná vodivost (odvozená z nepřímé úměrnosti) je v souladu s měřeními laboratorních vzorků (na části úseku vrtu), ale hodnoty nejsou zcela identické. Je vypočtena korelační délka prostorové variability vodivosti cca 7 m. Závěrem je konstatováno, že metoda inverze gradientu nenahrazuje ostatní metody měření, nelze použít pro získání absolutních hodnot tepelné vodivosti, ale je užitečná pro určení lokálních variací a jejich měřítka. Z vyhodnocení bylo také třeba vynechat hloubky do cca 100 m kvůli dosahu vlivu změn v klimatu.

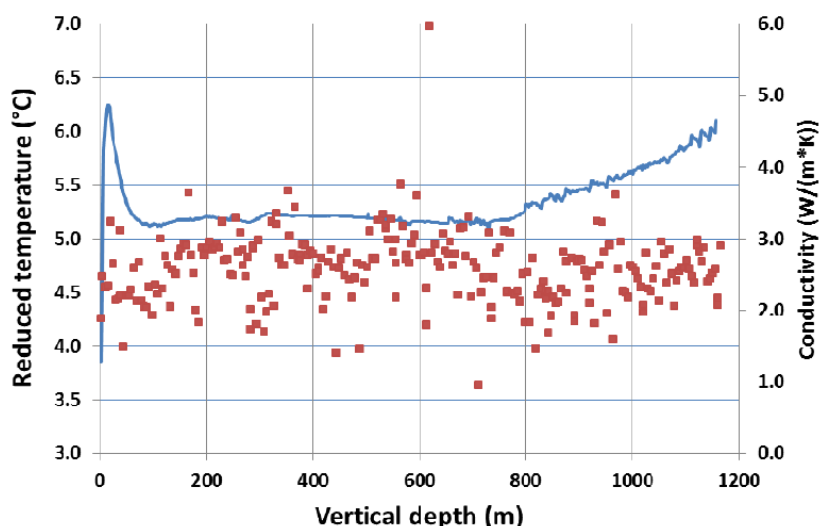
V práci (Kukkonen et al. 2015) jsou použita data z jiného konkrétního vrtu do 1190 m hloubky a teplotní profil v jednom čase, vzorky pro laboratorní měření parametrů po 5 metrech v celé délce (v příloze zprávy je tabulka, zaznamenává i směr foliace). V profilu na Obr. 26 je znázorněna odchylka od lineárního profilu, kde je vidět efekt sezónní změny a vyšších teplot

poslední dekády a v hloubce pod 800 m možný efekt jak paleoklimatický, tak hydrogeologický. Jsou uvedeny podrobné údaje o přesnosti aparatury pro karotáž a časování při měření. Dá se spekulovat, že jde o precizněji provedené měření, než ta „hromadná“ uváděná v (Sedighi et al. 2013). Cílem studie bylo určit vstupní parametry úlohy 1D vertikálního vedení tepla, což zahrnuje mj. prostorové rozložení parametrů horniny i historický časový průběh teploty na povrchu (paleoklima). Citovány jsou práce vysvětlující úlohu inverze jako špatně podmíněnou a jsou aplikovány pro tento typ problému odvozené matematické metody (tři různé): Singulární rozklad (Singular Value Decomposition – SVD) s analytickým řešením lineární úlohy, Tichonovova regularizace pro nelineární řešené konečnými diferencemi a Bayesovská metoda s použitím Monte Carlo pomocí Markovova řetězce (MCMC). Příklad je na Obr. 27. Obdobná metodika, rozpoznatelná na úrovni klíčových slov a charakteru grafických výstupů hodnocení nejistot apod., byla použita i pro inverzi profilů ve švédském programu, jak je zmíněno výše (Rath et al 2019). Vyhodnocován je také efekt upscalingu pro vertikální distribuci tepelných parametrů. Spočtené průběhy paleoklimatu různými metodami nejsou v zásadním rozporu a citlivost např. na diskretizaci není problematická. Ukazuje se, že čas 2000 let je zhruba hranicí, po jakou lze průběh teplot spolehlivě zjistit, ze staršího období jen „znaménko“ odchyly.

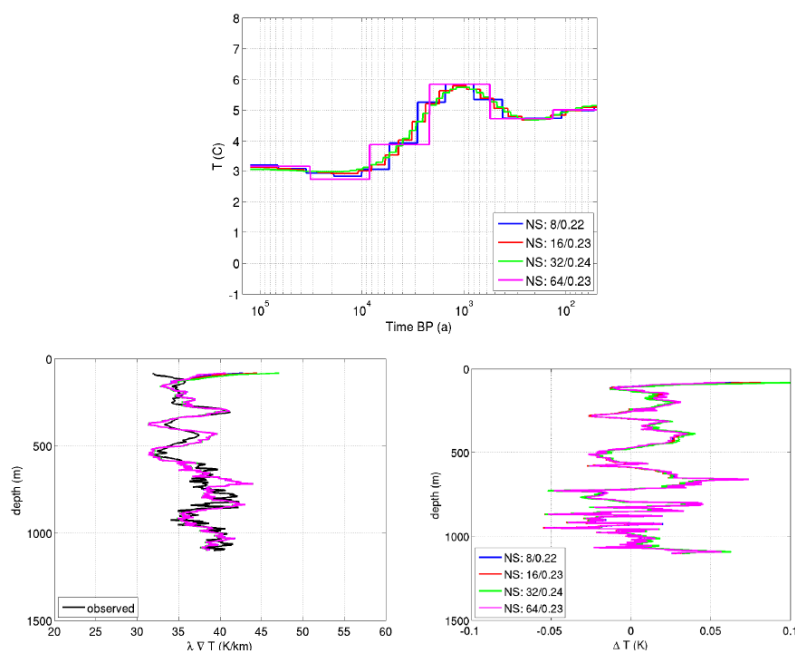


Obr. 25 Výsledky interpretace inverze teplotního gradientu ve vrtu OL-KR46 (Kukkonen et al. 2011): Porovnání gradientu, vypočtené vodivosti, vodivosti laboratorních vzorků, vliv měřítka průměrování (1 m, 5 m, 10 m) a vztah k horninovému typu.





Obr. 26 Hlavní výchozí data pro práci (Kukkonen et al. 2015): redukovaná teplota jako odchylka od lineárního gradientu a tepelné vodivosti jednotlivých odebraných vzorků z vrtného jádra (vrt OL-KR56).



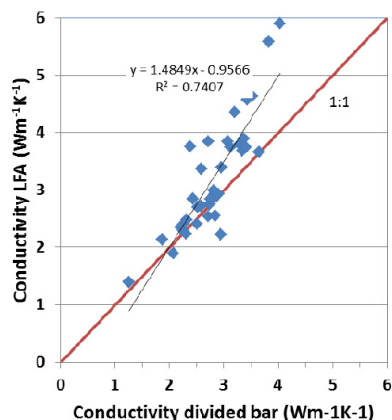
Obr. 27 Příklad výsledků inverzního modelu (Kukkonen et al. 2015) pro různé varianty časové diskretizace: Fitovaný paleoklimatický průběh, vertikální rozložení tepelného toku a odchylky teploty.

### 2.2.6.3 Měření tepelných parametrů vzorků pulsním zahřátím

Ve zprávě je WR 2015-48 (Kukkonen 2015) je popsána a aplikována metoda pulsního měření pro určení tepelných parametrů laboratorních vzorků („flash method“). Z odezvy čas-teplota je nejprve určena tepelná difuzivita a porovnáním s referenčním vzorkem známé tepelné kapacity pak dopočtena tepelná kapacita a tepelná vodivost. Změřeno je 35 vzorků z různých vrtů. Součástí měření je také určení závislosti tepelné vodivosti a kapacity na teplotě (do 300 °C). Měření je pro referenční teplotu také porovnáno se standardním laboratorním měřením („divided bar“). Numerickým modelem je analyzován vliv heterogenity v měřítku pod

rozměry vzorku (jednotlivé minerály), kdy se v transienčním poli více projeví výrazně vodivější struktury ve směru šíření tepla.

Metoda se ukazuje výhodná pro měření teplotních závislostí, kdy je snadněji proveditelná pro různé teploty. Omezení je v případě vzorků s efektivní vodivostí nad 3 W/m/K, podmíněnou přítomností minerálů nebo struktur s vyšší vodivostí, které se podílejí na zrychleném přenosu tepla (Obr. 28). U hodnot tepelné difuzivity není efekt tak kritický.



Obr. 28 Porovnání tepelné vodivosti horninových vzorků určené dvěma různými metodami (každá z os) (Kukkonen 2015)

#### 2.2.6.4 Experiment určení parametrů z efektu změn teploty chodby

Ve zprávě WR 2013-35 (Suppala et al. 2013) jsou vyhodnocovány teploty ve vrtech zmíněné už výše v rámci shrnutí (Sedighi et al. 2013). Z teplotních pulsů větraného tunelu a jejich pronikání do horniny je odvozována tepelná difuzivita horniny. To je chápáno jako metoda měření ve větším měřítku než laboratorní vzory, i než experimenty nebo měření se zachycením efektu ohřívání horniny z vrtu. Provedení je blízké zahajovanému projektu monitoringu v PVP Bukov.

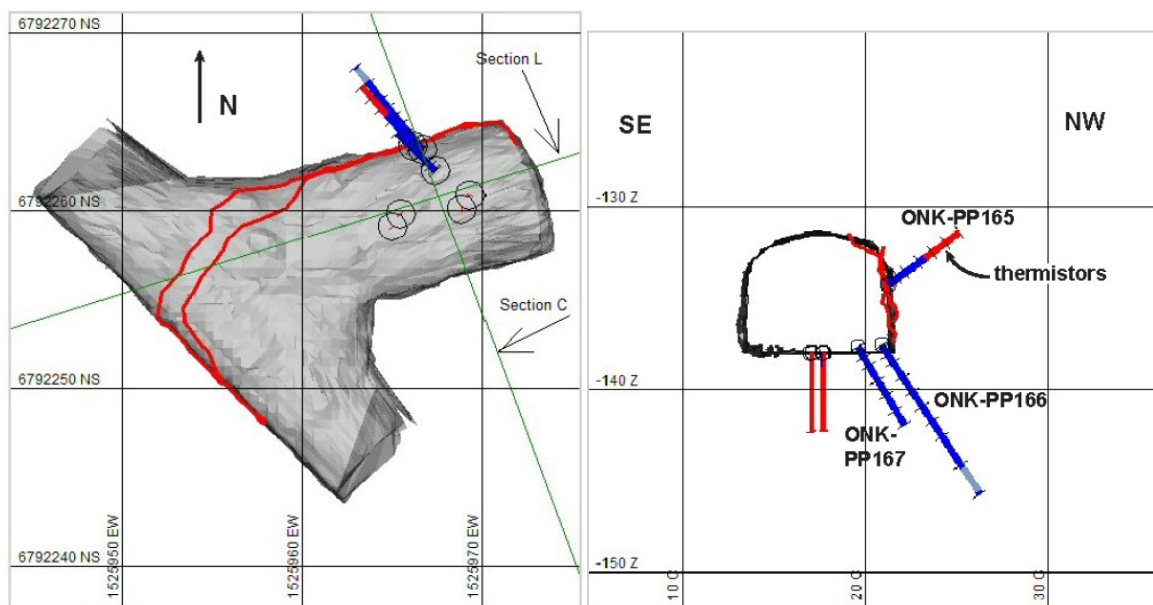
Měření je umístěno ve třech vrtech průměru 75,7 mm, jeden dlouhý cca 5 m ve směru podél foliace (PP165 na Obr. 29) a dva délek cca 5 m a 10 m (PP166 a 167). Ve zprávě jsou podrobné zákresy uspořádání aparatury ve vrtu. Sensory jsou umístěny na bronzových válečcích po třech v každém místě a spojeny mezi sebou plastovou trubkou. Použity jsou senzory BetaTherm 10 kΩ NTC. Ve zprávě je také podrobně popsána kalibrace. Surové změřené výsledky ve vrtu PP165 jsou na Obr. 30.

Hlavní část vyhodnocení je založena na 1D radiálním modelu. Nejprve je vypočten vztah mezi difuzivitou a dobou šíření pulsu na určitou vzdálenost. Tento přepoččet je pak aplikován na měřená data, kde jsou použity hlavní sezónní maxima a minima jako konkrétní pulsy. Určen je čas jednak mezi povrchem a jednotlivými senzory, jednak mezi senzory navzájem. Tím jsou získána data v různém měřítku průměrování. Výstupy jsou vyneseny jako po částech konstantní funkce po úsecích mezi senzory (Obr. 31). Nejistota určení tepelné difuzivity narůstá směrem k povrchu horniny.

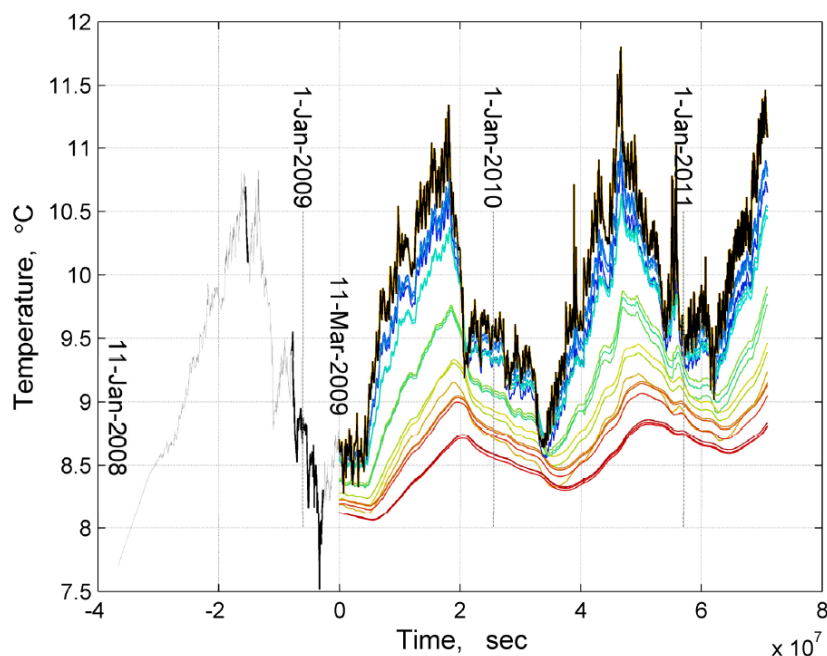
Druhý typ modelu je 2D svislý řez kolmo na stěnu tunelu, s použitím měřené 3D geometrie důlního prostoru s krokem 0,5 m. Předpokládaná anizotropie je přepočtena z původních hlavních směrů do tří složek plného 2D tenzoru v modelu s kartézským systémem ve vodorovném a svislém směru. Do modelu jsou také zahrnuty konkrétní pozice známých

heterogenit. Nepravidelnost geometrie stěny je zmíněna jako jeden ze zdrojů nejistoty pro určení difuzivity v zónách blíže ke stěně.

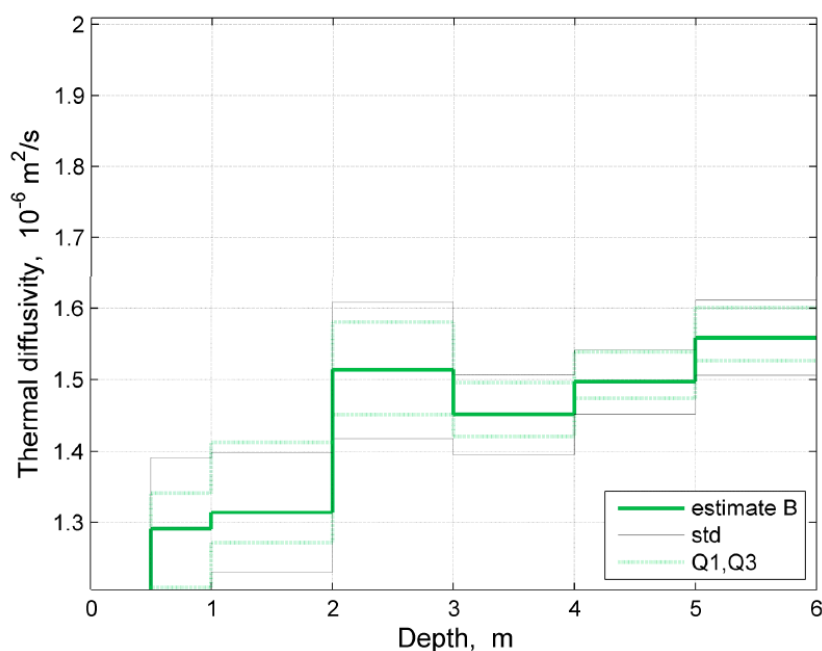
Zpráva také upozorňuje na to, že i míra anizotropie může být závislá na měřítku z důvodu zahrnutí větších struktur (žil apod.). V tomto kontextu bude



Obr. 29 Měření ve vrtech vyhodnocované v práci (Suppala et al. 2013), svislý řez vpravo odpovídá linii C na půdorysu vlevo, značky na vrtech odpovídají pozicím teplotních senzorů.



Obr. 30 Měřené průběhy teplot v senzorech ve vrtu v různé vzdálenosti od stěny výklenku (Suppala et al. 2013).



Obr. 31 Příklad vyhodnocení rozložení tepelné difuzivity z hodnot pro jednotlivé senzory, s analýzou nejistoty (Suppala et al. 2013).

### 2.2.6.5 Výpočty tepelného dimenzování

Práce tepelného dimenzování úložiště, tj. predikce teplotního pole v dlouhodobém časovém měřítku pro úložiště jako celek v reálné geometrii, ve finském programu byly spolu se švédskými často vzorem pro podobné výpočty dalšími autory. Výpočtů vzniklo postupně více, vybrané jsou dva specifické příklady.

Zpráva PR 2005-04 (Ikonen 2005) popisuje model pro horizontální koncept ukládání, kombinuje numerický 2D osově symetrický model pro jeden periodický segment (1 obalový soubor) v teoreticky nekonečném ukládacím vrtu a obdobný model pro „koncový“ obalový soubor v jedné řadě. Model zahrnuje řešení spár a perforovaného obalu.

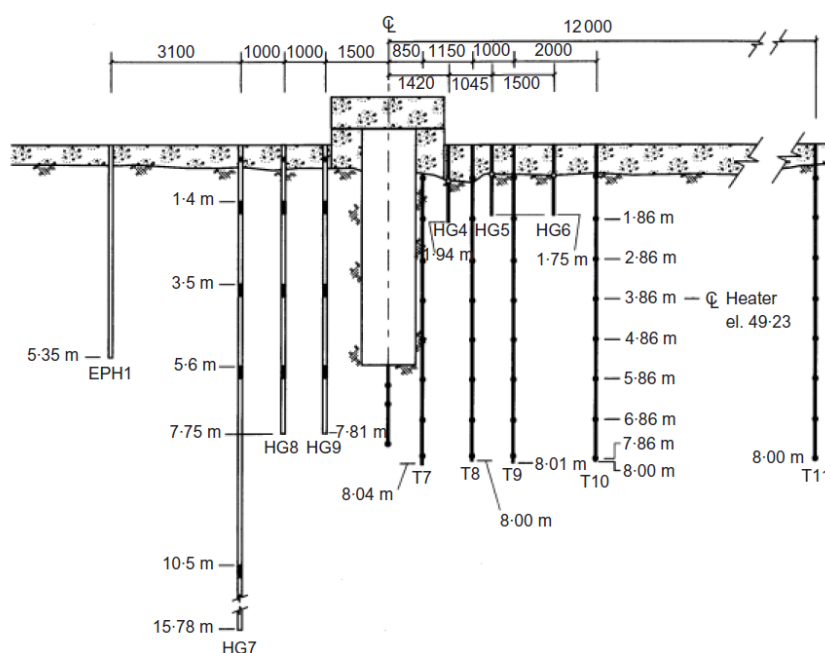
Zpráva WR 2012-56 (Ikonen & Raiko 2012) popisuje řešení pro konkrétní uspořádání úložiště s vertikálním konceptem ukládání. Použita je superpozice analytického řešení pro liniový zdroj. Uplatněna je korekce podstav reálného válce proti zjednodušení na koncích liniového zdroje, včetně porovnání s numerickým modelem jednoho vrtu. Výpočet uvažuje variantně rozsah nejistot parametrů.

## 2.2.7 Lokalita Whiteshell

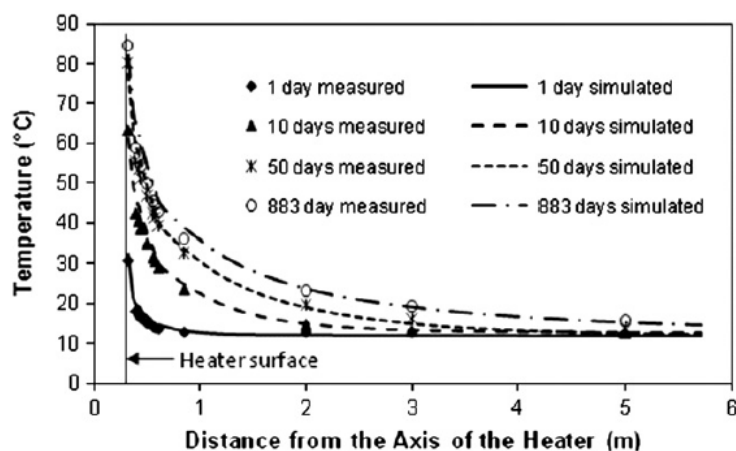
### 2.2.7.1 Buffer Container Experiment

Obecně o konceptu zahřívacího experimentu „Buffer Container“, společně s paralelně prováděným obdobným izotermálním, pojednává zpráva (Dixon et al 2002). Modelování experimentu je předmětem např. článků (Thomas et al. 2009; Guo 2011). Jedná se o experimentální provedení analogu vertikálního uložení obalového souboru s vyhořelým palivem. Kovové topidlo je obloženo bloky kompakovaného bentonitu ve vertikálním vrtu (hloubka 5 m, průměr 1,24 m) v krystalické hornině.

Experiment je orientovaný na pozorování procesů v bentonitu i hornině. Teploty v hornině jsou monitorovány v lineární řadě svislých vrtů po 7 senzorech teploty (termistory), do hloubky 8 m, nejvzdálenější ve vzdálenosti 12 m (Obr. 32). Tepelné pole je tedy zachyceno poměrně široce, ale jen v jednom směru od topidla podél přístupové chodby. Modely v obou citovaných člancích vyhodnocují průběhy teplot a tvar profilu teploty v úrovni středu vrtu, nejsou tedy explicitně vyhodnocována data poblíž upravené podlahy chodby, která je během provozu experimentu otevřená. Oba modely jsou osově symetrické okolo ukládacího vrtu (zanedbávají tedy efekt tvaru chodby) s homogenními parametry horniny. Dosažena je dobrá shoda průběhů teplot i tvaru profilu. Profil byl prezentován do vzdálenosti 6 m (Obr. 33) resp. 3,5 m v druhém článku, z čehož lze usuzovat, že nejvzdálenější monitorovací vrt teplot byl již mimo dosah vlivu zahřívacího experimentu.



Obr. 32 Uspořádání „Buffer Container Experiment“ v podzemní laboratoři v Kanadě – ukládací vrt a monitorovacích vrtů teplot, pórových tlaků a deformací (Thomas et al. 2009).



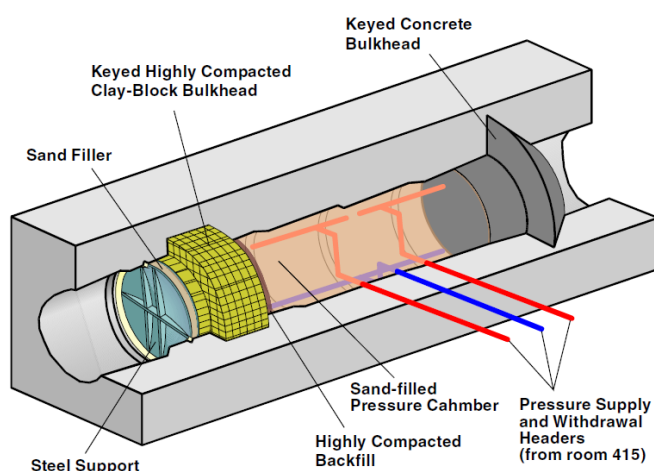
Obr. 33 Porovnání modelu a měření v Buffer Container Experiment (Guo 2011).

### 2.2.7.2 Tunnel Sealing Experiment

Předmětem experimentu je ověření proveditelnosti uzavření části ukládací chodby zátkou a chování celého systému při tepelném a hydraulickém zatížení, zejména z hlediska těsnosti. Zátka jako taková je mimo relevanci rešerše, ale tepelné podmínky experimentu jsou unikátní v kontextu zahřívacích experimentů v podzemních laboratořích z hlediska geometrického uspořádání a měřítka. Experiment jako celek v souvislostech je popsán v článku (Martino et al. 2007), termo-hydraulické numerické modelování, je pak předmětem článků (Guo and Dixon 2006; Guo et al. 2005), z nichž především čerpá následující text.

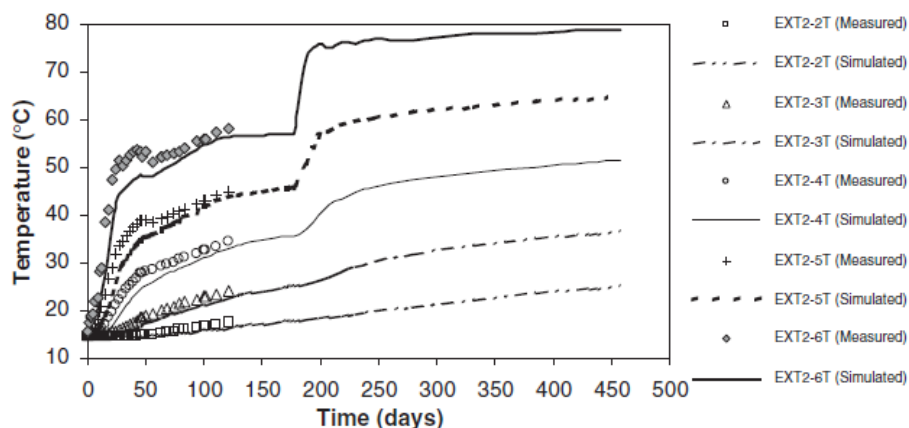
Konfigurace experimentu je znázorněna na Obr. 34. Úsek tunelu o průměru cca 4 m (eliptický průřez) délky cca 11 m je oddělen zátkami a naplněn pískem. Přes horninu, z jiné chodby laboratoře, je potrubím cirkulována ohříváná voda do pískem vyplněného objemu (konce jsou uspořádány pro rovnoměrnou distribuci). Projektovaná teplota byla 50 °C resp. 85 °C, tlak vody odpovídal hloubce 420 m. Teploty byly monitorovány v několika místech přírodního a odvodního potrubí, v objemu zátek a v jednom vrtu kolmo na stěnu zahříváné části do vzdálenosti cca 13 m se 6 senzory. Ohříván je tedy násobně větší objem, v porovnání se zahřívacími experimenty simulujícími úložné vrty, řádově větší je pak i potřebný výkon ohříváče cirkulující vody, 30 kW. Pro vyhodnocení je komplikujícím prvkem tepelná interakce mezi potrubím s proudící ohřátou vodou a okolní horninou. Jednak jde o jiný proces (transport tepla advekcí), v jiném měřítku (úzký vrt) a narušuje podmínky, které by se jinak v teplotním poli blížily osově symetrii.

Model (Guo et al. 2005) vyhodnocuje zahřívanou etapu experimentu, model (Guo a Dixon 2006) vyhodnocuje etapu chladnutí. V obou případech je použita stejná geometrická konfigurace 3D modelu se symetrií podle jedné roviny (půlválec). Model dosahuje do vzdálenosti 25 m, která se ukázala jako dostatečná. Přírodní potrubí je počítáno samostatným modelem. Parametry jsou v rámci jednotlivých materiálů homogenní. Okrajové podmínky jsou voleny jednoduchým způsobem z předpokládaných hodnot neovlivněného prostředí. Články diskutují možný efekt porušení v zóně EDZ na parametry, závěrem je to, že mezi etapou zahřívání a chladnutí nebylo třeba upravit hodnoty pro dosažení shody modelu a měření – tedy, pokud by ke změně došlo, bylo by to v první fázi zahřívání. Příklady výsledků jsou na Obr. 35 a Obr. 36.

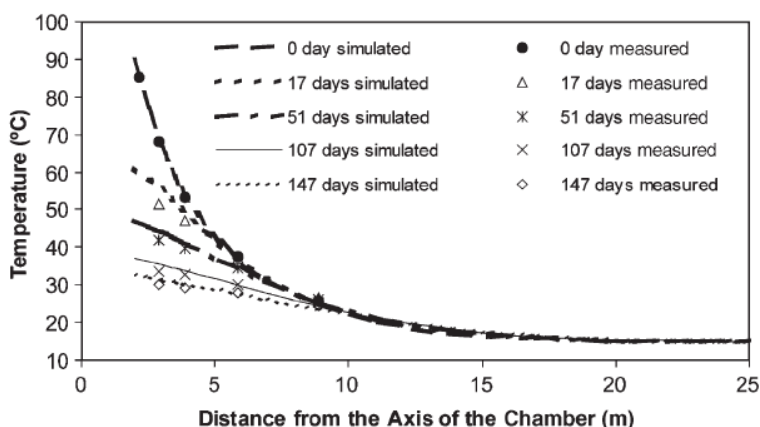


Obr. 34 Konfigurace Tunnel Sealing Experiment (Guo et al. 2005).





Obr. 35 Porovnání modelu a měření ve vrtu Tunnel Sealing Experiment (Guo et al. 2005).



Obr. 36 Porovnání modelu a měření ve vrtu v etapě chladnutí Tunnel Sealing Experiment (Guo a Dixon 2006).

### 2.2.7.3 Thermo-hydraulic Experiment

Předmětem projektu je určení termoporoelastických parametrů, provedení a výsledky jsou publikovány v sérii dvou článků v časopise (Berchenko et al. 2004; Detournay et al 2004).

Na rozdíl od mnoha experimentů zahřívání při v konfiguraci odpovídající všem bariérám úložiště, v tomto případě je zahříván přímo vrt v granitu, tj. je cíleně studováno tepelné chování horniny (např. také v Grimsel (Schneefuss et al. 1989) a KURT (Kwon et al. 2013)). Současně zahrnuje tlakovou injektáž vody, což je ovšem pro cíle této rešerše sekundární.

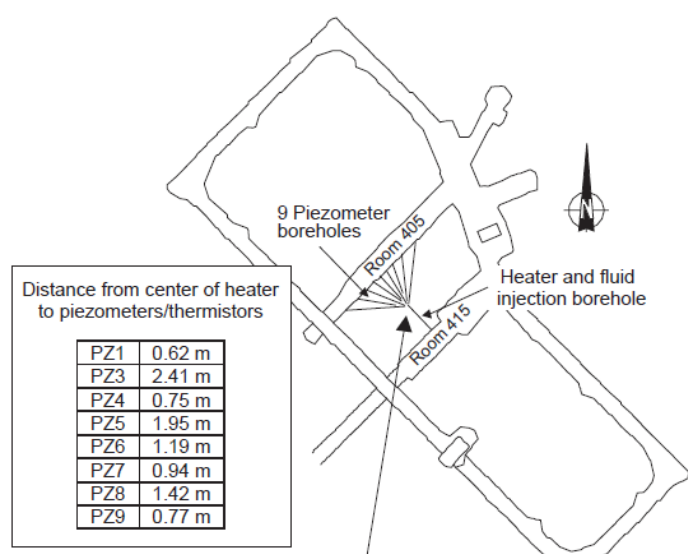
Konfigurace experimentu je na Obr. 37. Experiment je umístěn v hloubce 420 m, se zahříváním a tlakováním vrtem z jedné chodby a sítí monitorovacích vrtů z druhé chodby. Instrumentace je koncipována jako kombinovaná pro hydraulické i tepelné jevy, dále v textu jsou ale komentovány pouze primárně tepelné. Kombinace vede na technická omezení v instrumentaci, proto z hlediska samotných tepelných jevů se může jevit méně rozsáhlá. Zahřívací vrt má průměr 96 mm a celkovou délku cca 10 m, délka topidla nebyla přesně uvedena, celá sestava s pakry byla dlouhá cca 1 m. V každém monitorovacím vrtu je umístěn jeden senzor (pórového tlaku a teploty) v různé definované vzdálenosti od pozice topidla (0,6 m až 2,4 m, tabulka součástí Obr. 37) – to je podmíněno nutností vyplnění vrtu kvůli

zamezení hydraulické komunikaci. Pozice senzorů jsou určeny s určitou nejistotou a jejich korekce byla také součástí inverzního modelu. Ohřívání (s hydraulickým tlakováním) bylo provedeno v čtyřech samostatných etapách různě dlouhého trvání a velikosti tepelného výkonu, od 2 hodin po 50 dní.

Model založený na analytickém řešení byl nejprve použit jako predikční při plánování experimentu (Berchenko et al. 2004), posléze jako inverzní pro odhad parametrů rovnic z optimalizace shody s monitorovanými daty (Detournay et al 2004). Jsou uvedeny podrobně rovnice termoporaelasticity s konstitučními vztahy a parametry pro vzájemnou interakci. V případě některých parametrů (včetně tepelných) byly úpravou rovnic odvozeny jiné parametry (sdružené) zahrnující příspěvek více konkrétních fyzikálních parametrů – nelze tedy jednoduše vyčíst zkušenost orientovanou např. na rozsah hodnot tepelných vodivostí, nejistoty apod. Analytické řešení v jedné variantě pro bodový zdroj v prostoru (kulová symetrie), v druhé variantě pro liniový zdroj (úsečka konečné délky).

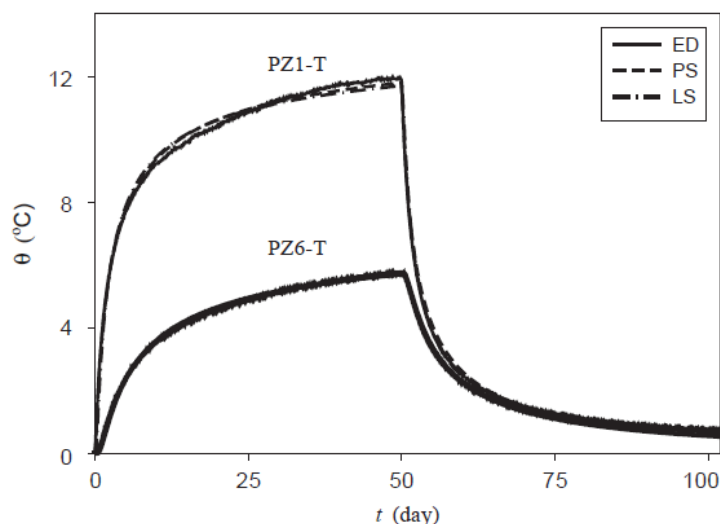
Inverzní model je proveden více způsoby hodnocení shody modelu a měření: fitováním pouze pozice píku v odezvě na tlakování/zahřívání a fitováním celého časového průběhu pomocí metody nejmenších čtverců, oboje pak pro oba typy analytického řešení (bod, linie). Až na hodnoty hydraulické difuzivity je shoda mezi modely/variantami hodnocena jako dobrá. Analytické řešení z principu uvažuje prostředí jako homogenní, tj. inverzním modelem je získána jedna hodnota parametru. Inverzí dat každého senzoru zvlášť je tak získáno více hodnot parametrů. Vysvětlení rozptylu hodnot se autoři podrobně nevěnují.

Díky samostatné inverzi pro každý senzor lze dosáhnout opticky dobré shody průběhu měření a výsledků modelu (Obr. 38). Dle názoru zpracovatele rešerše je pak ale obtížné rozdíly získaných parametrů dále interpretovat nad rámec prosté informace o intervalu nejistoty. Data v sobě směřují efekt heterogenity (šíření tepla do jiného směru k jinému senzoru) a efekt měřítka (senzory v různé vzdálenosti od topidla). Z prostého čtení článku je těžké poznat, nakolik by bylo obtížné definovat model (musel by být numerický ve 3D, ať už homogenní nebo s jednoduchým konceptem heterogenity), který by zajistil shodu modelu pro všechny monitorovací body.



Obr. 37 Uspořádání „Thermo-Hydraulic Experiment“ v podzemní laboratoři v Kanadě – zahřívací vrt a 9 monitorovacích vrtů (Berchenko et al. 2004).





Obr. 38 Porovnání měřeného a vypočteného průběhu teplot dvěma variantami modelu: bodový zdroj (PS) a liniový zdroj (LS) (Detournay et al. 2004).

#### 2.2.7.4 Modely pro tepelné dimenzování

Práce (Selvadurai & Nguyen 1997) konceptem odpovídá modelům tepelného dimenzování v tom smyslu, že jde o dlouhodobou predikci chování celého úložiště, ale nepromítá do modelu konkrétnější geometrické parametry chodeb a vrtů. Úložiště je uvažováno za zdroj tepla jako celek (deska dané výšky). Model je ale obecnější v tom, že zároveň řeší hydraulické a mechanické procesy. Model je koncipován jako 2D svislý řez s rovinnou symetrií. Poblíž objemu úložiště je vertikální porušená zóna. Zjednodušením modelu je to, že úložiště se chová jako by mělo nekonečný rozměr ve směru kolmo na rovinu modelu (to by pak nadhodnocovalo projev tepelného zatížení, tj. v konzervativním směru). Velikost modelu odpovídá stáří práce a tehdejšími možnostmi výpočetní techniky. Zajímavý je jednoduchý koncept vložení poruchové zóny (s jinými parametry), ale efekt na tepelné pole není v grafických výstupech prezentován.

### 2.3 Souhrnné vyhodnocení problematiky

Množství experimentů a obecně monitorovacích a výzkumných aktivit v souvislosti s podzemními laboratořemi zahrnujících měření nebo modelování tepelného pole je velmi rozsáhlé. Naopak aktivity přímo cíleně zaměřené na šíření tepla v hornině jsou spíše omezené (možná právě proto, že jsou nepřímo součástí jiných) a je minimum projektů zahrnujících typ měření teplot jako v plánovaném projektu Rožná/Bukov v kontextu dlouhodobých tepelných změn vlivem ražby a větrání. Podle čistě osobního názoru autorů zprávy to může být dáno i tím, že při dostupnosti měření vertikálních profilů teplot ve větším (statisticky významném) počtu hlubokých vrtů z povrchu, laboratorním měření tepelných parametrů velkého souboru odebraných vzorků z reprezentativního prostoru a současně možností verifikace modelů transportu tepla v souvislosti se zahřívacími experimenty, může být získané porozumění transportu tepla v hornině i po kvantitativní stránce považované za dostatečné pro potřeby predikce teplot v úložišti v rámci prokázání bezpečnosti.

Tematika společná více lokalitám je interpretace teplotních profilů v hlubokých vrtech v neporušeném masivu. Jde o metodické postupy i mimo problematiku hlubinných úložišť,

zejména studium tepelného toku pro potřeby využívání geotermální energie (kapitola 5 pro české podmínky). Další jsou experimenty zahřívání horniny přímo z vrtů v měřítku menším než analogy ukládání VJP s topidlem uvnitř bentonitového bufferu. To postihuje tepelné vlastnosti v měřítku na přechodu mezi laboratorními vzorky a efektem VJP nebo větrání chodeb. V rámci lokalit laboratoří nebo kandidátních lokalit obvykle probíhá systematické měření tepelných parametrů na laboratorních vzorcích, studium souvislosti s dalšími vlastnostmi horniny s možností predikce tepelných parametrů, což je také zároveň samostatným tématem a kapitolou 4 v této rešeršní zprávě. Měření teplot, které by bylo nejbližší k plánovanému konceptu na lokalitě Rožná/Bukov, bylo zjištěno v rámci projektu dlouhodobého monitoringu mechaniky horniny v laboratoři ONKALO. Jde o jednotlivé vrty s extenzometry vybavené zároveň teploměry a samostatný projekt se třemi vrty ve směrech anizotropie cíleně pro sledování šíření teplotních změn vlivem větrání (Suppala et al. 2013) komentovaný dále.

2D model (Kukkonen et al. 2011) ukazuje podobné efekty jako (Šafanda 1995) komentovaný v kapitole 4.1.2, ale v jiné prostorové konfiguraci.

V rámci přehledu jsou také zmíněny řešené úlohy tepelného dimenzování úložiště v rámci jednotlivých národních programů. Nejde sice o relevanci k experimentům, ale postupy matematického modelování mohou mít společné aspekty, jako např. propojení detailního měřítka (jednotlivé ukládací vrty, jednotlivé měřené profily) a měřítka celého úložiště, resp. celého dolu v prostředí vertikálního geotermického gradientu. Citované postupy jsou poměrně pestré z hlediska propojování analytických a numerických řešení, využívání superpozice, symetrií apod. Počáteční teplota a tepelná vodivost žuly jsou mezi hlavními parametry modelů tepelného dimenzování.

Překvapivá je rozdílná míra pozornosti problematice realistického rozložení teploty v okolí podzemních laboratoří (resp. finálního úložiště) v různých národních programech – detailům vertikálního tepelného pole a heterogenitě tepelných vodivostí a nejistotám určení hodnot tepelných parametrů z laboratorních vzorků.

Rovněž překvapivá je různá pravidelnost, resp. nepravidelnost tepelného pole měřeného z hlediska zachytitelnosti modelem. Pro některé zahřívací experimenty bylo tepelné pole „nejsnadněji modelovatelnou“ částí v rámci komplexu THM procesů (často homogenní osově symetrický model dá dobrý výsledek), jindy jako např. experiment v KURT jsou na pohled patrné nepravidelnosti vlivem pravděpodobně heterogenity horniny. Může jít o dosažení potřebného měřítka homogenizace (reprezentativního objemu).

## 2.4 Důsledky pro řešení projektu

V projektu za podmínek lokality Rožná/Bukov bude silná motivace k využití navrženého způsobu monitoringu jednak jako alternativa k popisu vertikálního rozložení teplot z hlubokých vrtů z povrchu, jednak upřesnění měřítkové závislosti tepelných parametrů (laboratoř / in-situ) a vlivu nehomogenity a anizotropie horniny. Nejistoty prostorového rozložení tepelné vodivosti (a kapacity) a přenositelnost dat z laboratorního měření do in-situ podmínek jsou i v kontextu vyhodnocovaných citovaných prací témata s otevřenými otázkami.

Metodické postupy vyhodnocení citlivosti modelů pro vertikální rozložení teplot by mohly jít zobecnit i do menšího měřítka pro radiální teplotní pole okolo ražených chodeb dolu – průnik teplotní perturbace do hloubky podobně jako efekty změn klimatu na povrchu.

Práce (Suppala et al. 2013) je koncepčně blízká zahajovanému projektu monitoringu okolí PVP Bukov ve smyslu sledování projevu změn teploty větraného vzduchu ve štole na postupnou změnu teploty okolní horniny. Tato práce je ale omezeně lokalizovaná, jen v jednom místě podzemní laboratoře, a sleduje časový úsek pouze 2 let. Vzhledem k interpretaci přes rychlost posunu teplotního vzruchu, je sledována jen relativní změna teploty, ne hodnoty jako takové vůči hypotetické původní teplotě horniny v dané hloubce, tedy není ani snahou interpretovat zpětně v čase průběh teploty větracího vzduchu. Orientace vrtů je cíleně provedena na anizotropii horniny podle foliace, což naopak v lokalitě Bukov nebude možné, nebo jen omezeně, díky prostorové variabilitě foliace v měřítku menším než rozsah monitoringu v jednom vrtu.

### 3 Technické řešení in-situ monitoringu teplot

Vzhledem k tomu, že obalové soubory (UOS) s vyhořelým jaderným palivem jsou dlouhodobými zdroji tepla, je sledování teplotního pole v úložišti jedním z hlavních pilířů kontroly bezpečnosti úložiště.

#### 3.1 Přehled zdrojů

Zásadním zdrojem informací jsou publikované výsledky dvou na sebe navazujících mezinárodních projektů MODERN (2007 – 2013) a MODERN 2020 (2015 – 2019), které byly přímo zaměřeny na výzkum a vývoj technologií monitoringu v podmínkách úložiště radioaktivního odpadu. Mnoho relevantních informací z podzemních pracovišť bylo zahrnuto do kapitoly 2, konkrétně se jedná o podkapitoly 2.2.1.1 nebo 2.2.6.4, která se týká experimentu ve finském Onkalu. Konfigurace monitoringu během tohoto experimentu je blíže rozvedena v kapitole 3.2.5. Dále je zde citováno několik indexovaných článků z vědeckých databází.

Lze najít relativně mnoho publikací, které se věnují teplotnímu monitoringu ve vrtech, nicméně se nejedná o vrty v podzemních prostorách. Vzhledem k tomu, že by tyto publikace neodpovídaly zadání dle Specifikace předmětu plnění, nybyly do řešerše zařazeny.

#### 3.2 Rozbor jednotlivých prací

##### 3.2.1 MODERN State of Art Report on Monitoring Technology (AITEMIN, 2013)

V této zprávě je proveden rozbor stávajících teplotních čidel použitelných pro teplotní monitoring. Je zde provedeno porovnání termočlánku, termistoru a odporových teplotních čidel s různým počtem vodičů. Z hlediska dlouhodobé instalace a spolehlivosti jsou jako nejvhodnější vyhodnocena odporová teplotní čidla, která jsou přesná, a navíc díky lineární závislosti odporu na teplotě mohou být přesně kalibrována na podstatně větší teplotní rozsahy než termistory se závislostí exponenciální. Jejich zásadní výhodou je časová stabilita kalibrace. Nevýhodou je poměrně nízký odpor čidel (nejčastěji používaná Pt čidla mají odpor 100, resp. 1000 ohmů) a proto při požadavku větší přesnosti nutnost kompenzovat odpor vodiče využitím více vodičového zapojení. V Tab. 2 je uvedeno souhrnné porovnání výše uvedených skupin teplotních čidel.

Tab. 2 Porovnání základních druhů teplotních čidel z hlediska použití v podmínkách HÚ

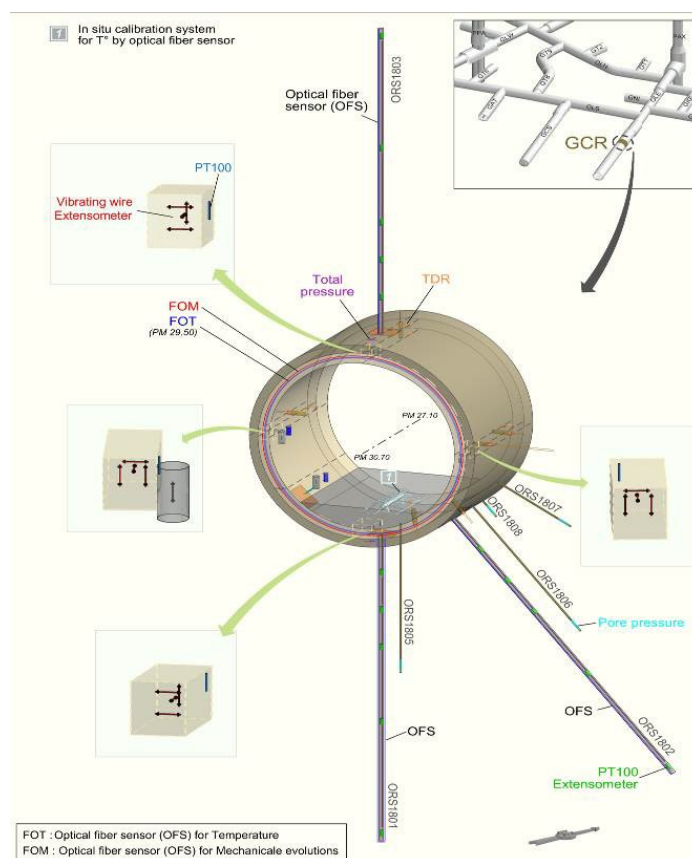
Criteria	Thermocouple	RTD	Thermistor
Temp Range	-270°C to 2300°C	-240°C to 650°C	-100°C to 500°C
Accuracy	Good	Best	Good
Linearity	Better	Best	Good
Sensitivity	Good	Better	Best
Cost	Best	Good	Better
Long-term stability	Good	Best	Poor

Ze závěru zprávy MODERN vyplývá, že všechna uvažovaná čidla bez problému zapadají svým teplotním rozsahem do podmínek budoucího uložště, nicméně limitujícími faktory mohou být mechanické namáhání a působení radioaktivity a chemických dějů.

Jedna z kapitol je věnována monitoringu pomocí optických vláken. Jsou považovány za velmi perspektivní vzhledem k možnostem měření na velmi dlouhých profilech a také proto, že lze pomocí optického vlákna měřit jednak teplotu, a pak také mechanické napětí, deformaci.

### 3.2.2 Monitoring System Design of Underground Repository for Radioactive Wastes – In Situ Demonstrator, (Farhoud a kol. 2015)

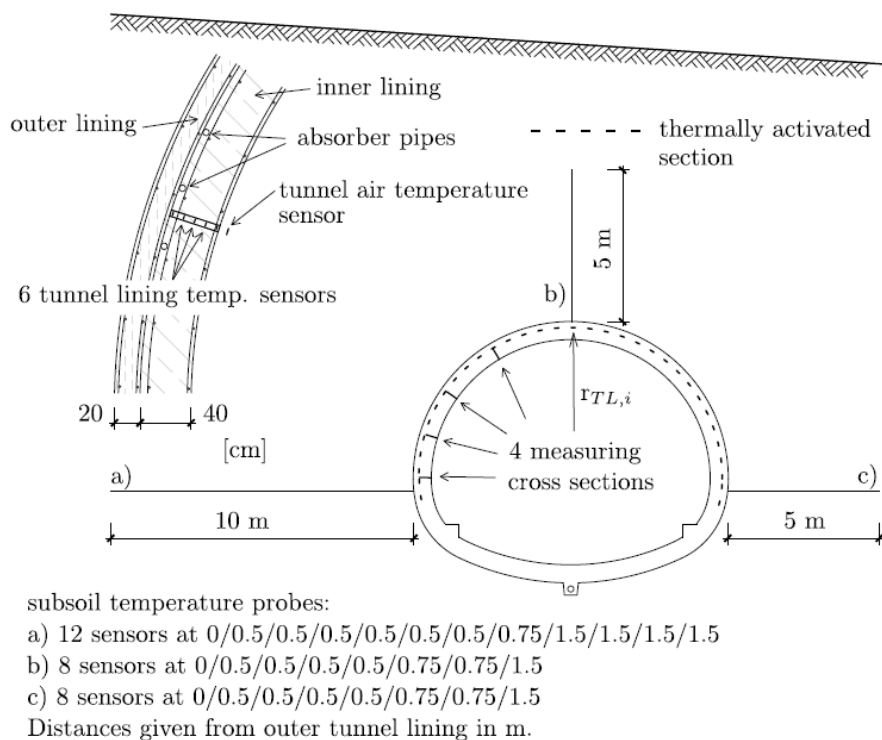
Ukázka monitoringu v podzemní výzkumné laboratoři francouzské agentury Andra. Součástí je také teplotní monitoring pomocí DTS systému v kombinaci s Pt100 teplotními čidly. Návrh instalace je na Obr. 39. V článku není věnována pozornost porovnání výše zmíněných metod teplotního monitoringu, nicméně zde jsou popsána úskalí DTS systému. Problém nastává, pokud dojde k přerušení křehkého optického vlákna. Po jeho opravě nastal problém se správným určením vzdálenosti podél optického kabelu. Z článku není patrné, jaký druh optického kabelu byl použit.



Obr. 39 Schéma instalace monitoringu v podzemní výzkumné laboratoři agentury Andra

### 3.2.3 Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects, (Buhmann et al. 2016)

Studie se věnuje možnostem využití termální energie generované využívanými dopravními tunely. Z důvodu sledování tepelných toků v okolí tunelu je zde na příkladu tunelu metra ve Stuttgartu popsán teplotní monitoring v různě hlubokých vrtech (Obr. 40 Schema instalace teplotního monitoringu s uvedenými vzdálenostmi jednotlivých teplotních čidel ve vrtech. Zde byly instalovány 3 teplotní sondy do dvou vrtů hlubokých 5 m a do jednoho hlubokého 10 m ve třech směrech ve stěně tunelu. Teplotní sondy byly osazeny odporovými čidly Pt100, přičemž v případě 10 m hlubokého vrtu bylo osazeno 12 čidel a v případě vrtů hlubokých 5 m čidel 8. Přesnost a potenciální chyba měření čidel je 0,1 °C, data byla odečítána každých 20 minut. Vzdálenosti mezi čidly jsou uvedeny v Obr. 40. Teplotní sondy byly instalovány v roce 2011 a v článku jsou interpretována data zaznamenaná během ročního kontinuálního monitoringu. Není zde detailní popis teplotních sond, nicméně se v principu jedná o obdobnou instalaci, jaká je plánována v důlním díle Rožná.

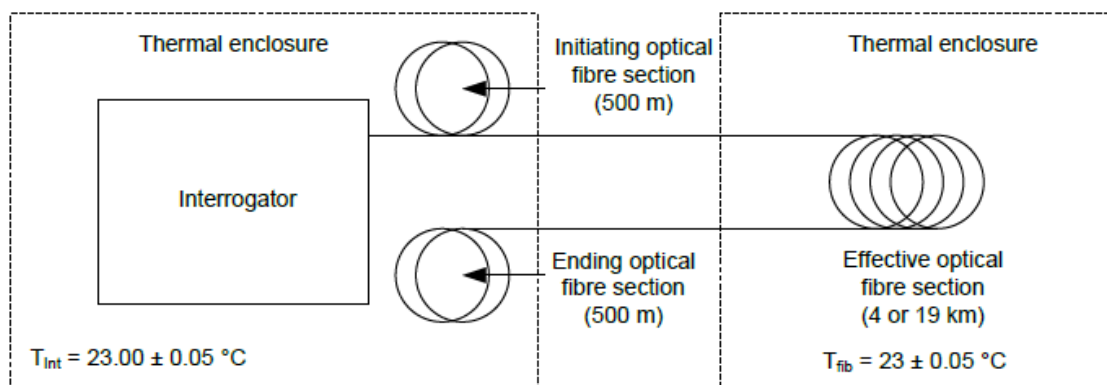


Obr. 40 Schema instalace teplotního monitoringu s uvedenými vzdálenostmi jednotlivých teplotních čidel ve vrtech

### 3.2.4 MODERN 2020 New sensors for repository monitoring (MODERN 2019)

V této zprávě je věnována pozornost možnostem využití DTS (Distributed Temperature sensing) systémů, kdy je prováděno teplotní měření podél optického vlákna. Metoda využívá zpětného Ramanova rozptylu, kdy je jako zdroj paprsku v optickém vláknu využit laser. Velkou výhodou je možnost měření teploty současně podél celého vlákna, které může mít délku prvních desítek kilometrů. Na Obr. 41 je znázorněn princip experimentu během kterého byla aparatura testována, nicméně dobře poslouží jako jednoduchý popis měřicí aparatury. Ta se skládá ze dvou základních částí, a to měřicí jednotky, která vysílá světelné impulzy a

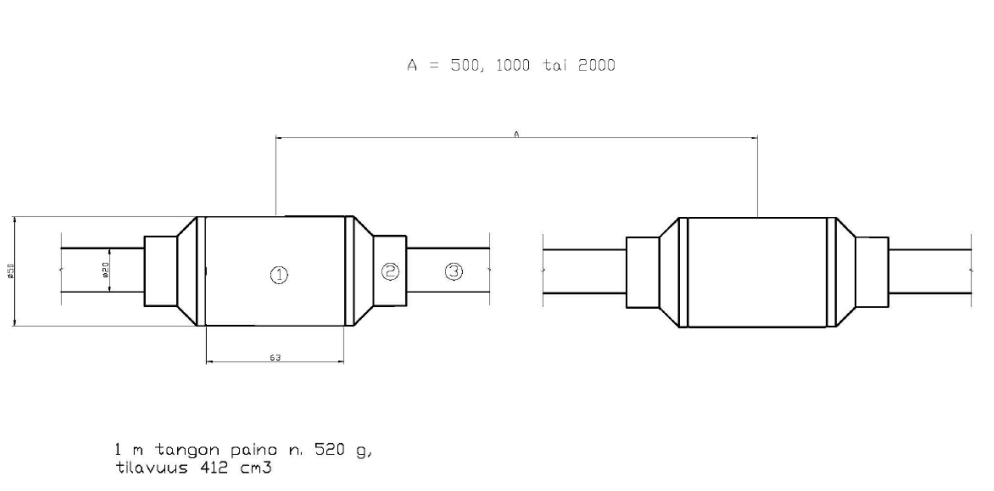
vyhodnocuje jejich zpětný odraz ze samotného optického vlákna. Je možné měřit s rozlišením lepším než  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nicméně přesnost měření závisí na časovém kroku měření, délce vlákna a kalibraci aparatury. Nevýhodou tohoto způsobu monitoringu je značná náchylnost optického vlákna k mechanickému poškození.



Obr. 41 Zjednodušený náčrt principu měření metodou DTS

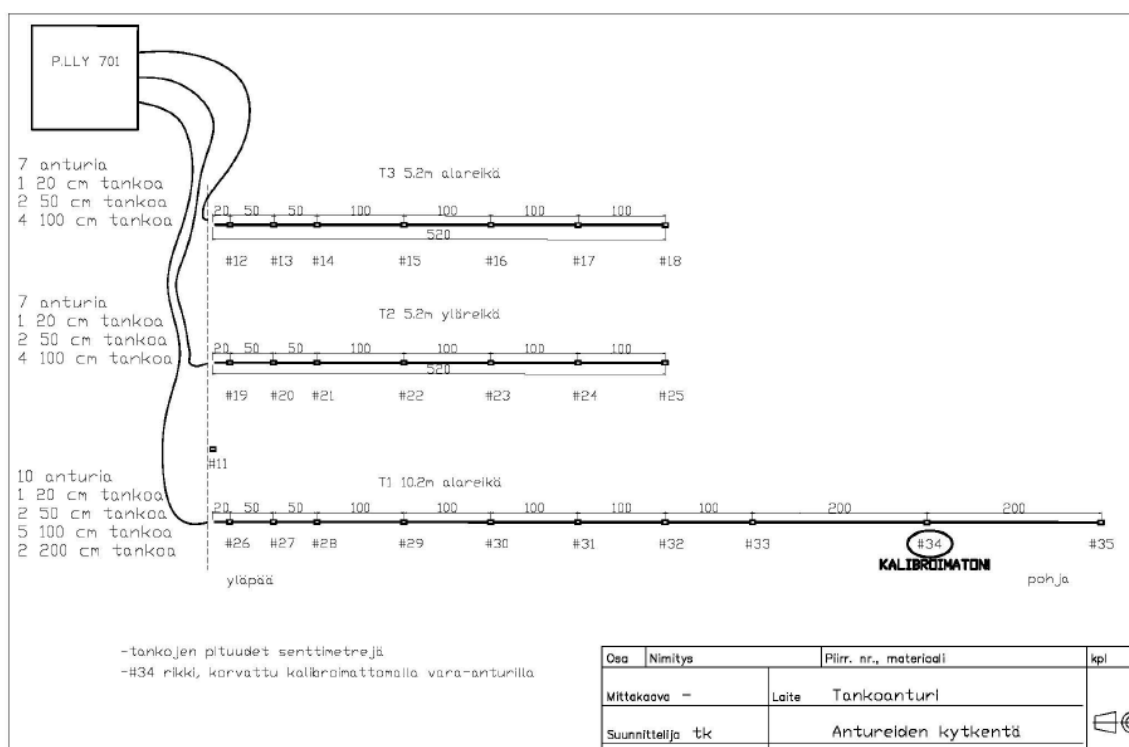
### 3.2.5 Thermal Diffusivity of a Rock Mass Estimated from DrillHole Temperature Monitoring in the ONKALO, (Suppala a kol. 2013)

Pracovní zpráva popisující výpočet tepelné difuzivity z teplot naměřených v mělkých vrtech v HÚ v Onkalu. Podrobnější kontext je rozebrán v kapitole 2.2.6.4 Teplotní monitoring byl realizován ve třech vrtech, do kterých byly do hloubky 5,2 až 10,2 m instalovány tyče s teplotními čidly. Pro měření byly zvoleny termistory BetaTerm, které byly osazovány ve trojicích do bronzových válečků spojených trubkou z PVC (Obr. 42). V případě vrtů hlubokých 5,2 m byla teplotní čidla osazována do vzdáleností 0,2, 0,7, 1,2, 2,2, 3,2, 4,2, a 5,2 m a v případě vrtu hlubokého 10,2 m pak do vzdáleností 0,2, 0,7, 1,2, 2,2, 3,2, 4,2, 5,2, 6,2, 8,2 a 10,2 m od stěny chodby (Obr. 43). Termistory byly osazovány ve trojicích z důvodu zvýšení spolehlivosti plánovaného dlouhodobého měření a odečet dat byl každých 20 minut.



Obr. 42 Náčrt bronzových válečků spojených tyčí z PVC





Obr. 43 Schema teplotních sond

### 3.3 Souhrnné vyhodnocení problematiky

Problematika teplotního monitoringu v horninovém masivu je poměrně dobře známa a existuje velké množství publikací ve vědeckých databázích jako je WoS, nicméně většina z nich se věnuje monitoringu ve vertikálních vrtech na zemském povrchu. Je zde však patrná analogie s instalací v podzemních prostorách jako je HÚ. Je zřejmé, že v současné době se teplotní monitoring provádí dvěma hlavními způsoby. Jednak pomocí teplotních čidel propojených vodiči se záznamovou jednotkou a pak také metodou DTS, což je teplotní monitoring podél optického vlákna. Problémem v podmínkách HÚ se jeví možnost mechanického poškození instrumentace a také možný negativní vliv radiace a chemických dějů.

### 3.4 Důsledky pro řešení projektu

S dlouhodobým teplotním monitoringem v horninovém masivu má řešitel projektu mnohaleté zkušenosti, a to jak využitím standardních teplotních čidel, tak pomocí optického vlákna metodou DTS. Z hlediska řešení projektu je významný zejména detailní popis instalace v podzemní laboratoři Onkalo, který koresponduje s plánovanou výstrojí vrtů v Rožné. Řešitel však neplánuje použití termistorů z důvodu jejich možného „driftu“ a nutnosti zdvojování, či ztrojování (Onkalo) čidel v jedné hloubkové úrovni.



## 4 Tepelné vlastnosti hornin

Předmětem této kapitoly je provést rešerši o tepelných vlastnostech hornin z hlediska jejich dalšího využití pro potřeby numerického modelování. V první části kapitoly se seznámíme s tepelnými vlastnostmi jako takovými, jejich základními vztahy, způsoby jejich měření a v další části kapitoly pak s konkrétními vlastnostmi, které jsou důležité z hlediska numerického modelování. Přehled základních veličin je uveden v Tab. 3.

Tab. 3 Přehled veličin, jejich značení a jednotek

Teplota	T	°C
Tepelná vodivost	$\lambda$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Tepelná difuzivita	$\kappa$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Tepelná kapacita	C	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita	c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Hustota tepelného toku	q	$\text{W m}^{-2}$

V českojazyčné literatuře se můžeme setkat s pojmy koeficient tepelné vodivosti a koeficient teplotní vodivosti, nicméně ve shodě s mezinárodně používanými a uznávanými termíny v této práci používáme pojem tepelná vodivost a tepelná difuzivita.

### 4.1 Přehled zdrojů

Tématu fyzikálních vlastností hornin je věnován nespočet publikací, protože se jedná se o jeden ze základních stavebních kamenů oborů, jako jsou geotermika nebo petrofyzika a jejich dobrá znalost je nutným předpokladem pro výpočty a numerické modely vedení tepla v zemské kůře.

Pro komplexní přehled je možné sáhnout po nějaké shrnující publikaci, nejčastěji se jedná o kapitolu v obsáhlejší knize. Kapitola 4.1.1 tak vychází ze dvou kapitol obsáhlé publikace, kterou je Encyklopedie geofyziky pevné Země (Gupta a James 2011). Tyto dvě kapitoly, které se věnují tepelným vlastnostem hornin, zpracoval Dr. Clauser.

V dalších kapitolách jsou prezentovány publikace indexované na Web of Science, přičemž byly vybrány tak, aby co nejlépe odpovídaly požadovanému tématu. Nejvíce prostoru pak bylo věnováno publikaci Dr. Šafandy, která se podrobně věnuje tématu vlivu anizotropie tepelných vlastností hornin na teplotní pole pod zemským povrchem.

#### 4.1.1 Encyclopedia of solid earth geophysics (Gupta a James 2011)

Jak bylo zmíněno výše, jedná se o přehledovou kapitolu, která vychází ze dvou kapitol citované publikace a shrnuje výsledky výzkumu Dr. Christopa Clausera, který na toto téma publikoval nespočet publikací převážně indexovaných na Web of Science. Tyto publikace slouží jako komplexní zdroj pro vhléd do problematiky tepelných vlastností hornin.

#### Základní veličiny a vztahy

Tepelná vodivost  $\lambda$ . Fyzikální vlastnost vyjadřující schopnost materiálu vést teplo. Je závislá na materiálu, teplotě a tlaku a definuje množství tepla, které za jednotku času projde přes jednotkový průřez horniny podél jednotkové vzdálenosti při jednotkovém teplotním spádu

Tepelná difuzivita  $\kappa$ . Fyzikální vlastnost charakterizující rychlost šíření teplotních změn v daném materiálu. Je definována jako poměr tepelné vodivosti a tepelné kapacity.

Tepelná kapacita  $C$  (objemová tepelná kapacita). Fyzikální vlastnost definující množství tepla, které musíme dodat/odebrat jednotkovému objemu materiálu, aby se jeho teplota změnila o 1°C.

Měrná tepelná kapacita  $c$ . Fyzikální vlastnost definující množství tepla, které musíme dodat/odebrat 1 kilogramu materiálu, aby se jeho teplota změnila o 1°C.

Hustota tepelného toku  $q$ . Vyjadřuje množství tepla, jež projde jednotkovou plochou kolmou na směr proudění

V nejsvrchnějších partiích zemské kůry se v pevných látkách uplatňuje především přenos tepla vedením (kondukcí). To znamená, že atomy kmitající kolem své rovnovážné polohy v teplejších částech prostředí, předávají svou energii atomům v částech chladnějších. Vedení tepla ve stacionárním stavu definuje Fourierův zákon, dle kterého se vektor hustoty tepelného toku rovná součinu tenzoru tepelné vodivosti a vektoru teplotního gradientu. Zápis je následující:

$$q_i = -\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (1)$$

Z tohoto jednoduchého vztahu vyplývá, že teplotní gradient, a tedy teplota v určité hloubce pod zemským povrchem závisí na tepelné vodivosti horniny v daném místě a na hustotě tepelného toku. V případě, že řešíme rovnici vedení tepla v nestacionárním tvaru, je třeba znát tepelnou difuzivitu materiálu. Ta je přímo úměrná tepelné vodivosti a nepřímo pak objemové tepelné kapacitě, což je zřejmé z níže uvedeného vztahu.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{\lambda}{c} \quad (2)$$

Rovnice vedení tepla v nestacionárním tvaru porézním prostředím má pak tvar

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T - (\rho c)_f T v) + A \quad (3)$$

kde index  $f$  znamená parametry kapaliny,  $v$  je rychlost proudění a  $A$  jsou zdroje tepla ve  $\text{Wm}^{-3}$

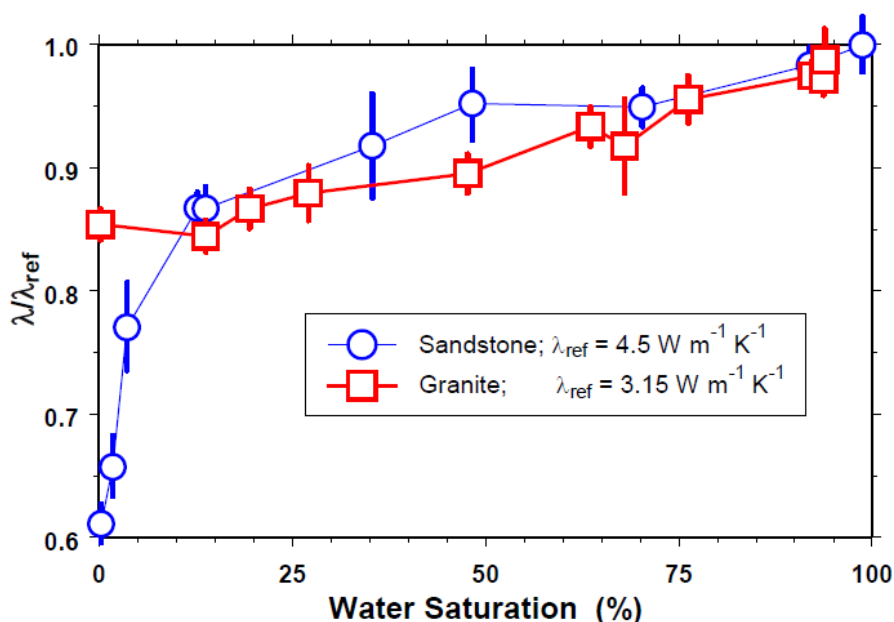
### **Anizotropie tepelné vodivosti**

Anizotropie tepelných vlastností hornin, resp. tepelné vodivosti, je zcela zásadním parametrem, který má vliv na teplotní pole hornin, a tedy je nutným vstupem numerických modelů. Proto je tomuto tématu věnována celá podkapitola 4.1.2. Anizotropie může být způsobena usměrněním minerálů v hornině, vrstevnatostí sedimentárních či metamorfovaných hornin, případně sem lze zahrnout také různé tektonické procesy, které vedou ke vmísení, přesmykům různých druhů hornin a z regionálního hlediska mají vliv na efektivní tepelnou vodivost horninového masivu.

### **Vliv porozity na tepelné vlastnosti hornin**

S rostoucí porozitou klesá tepelná vodivost i difuzivita hornin. Je to dáno nižší tepelnou vodivostí media, které vyplňuje póry, přičemž nejčastěji se jedná o vodu nebo vzduch, případně kapalně, či plynně uhlovodíky. Proto je vliv porozity největší v případě sedimentárních hornin s vysokou porozitou (pískovce), nebo hornin silně porušených (např.

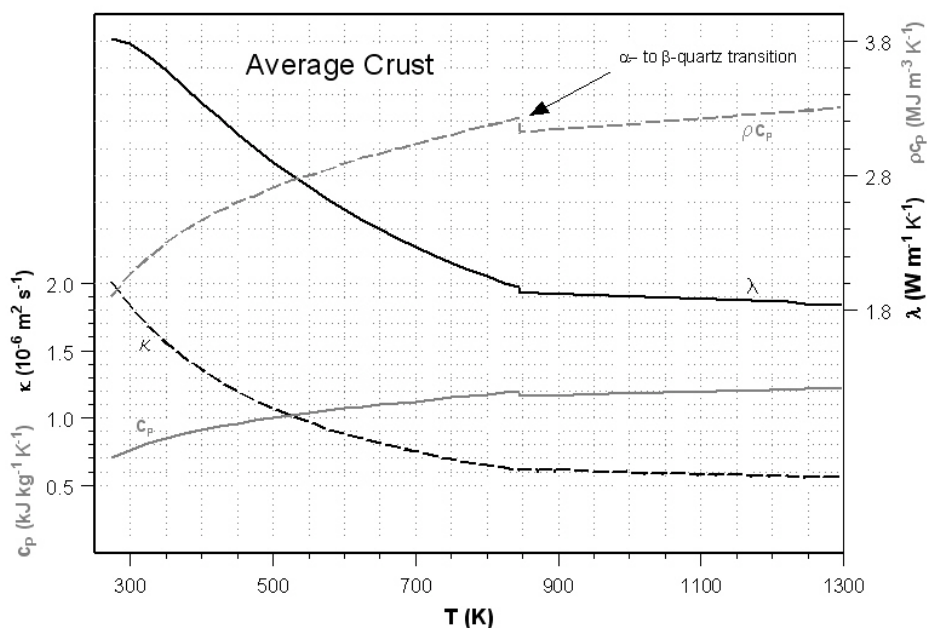
zlomová pásma). Na obrázku Obr. 44 je znázorněna změna tepelné vodivosti pískovce o porozitě 18 % a granitu o porozitě 1 % se vzrůstajícím nasycením vodou.



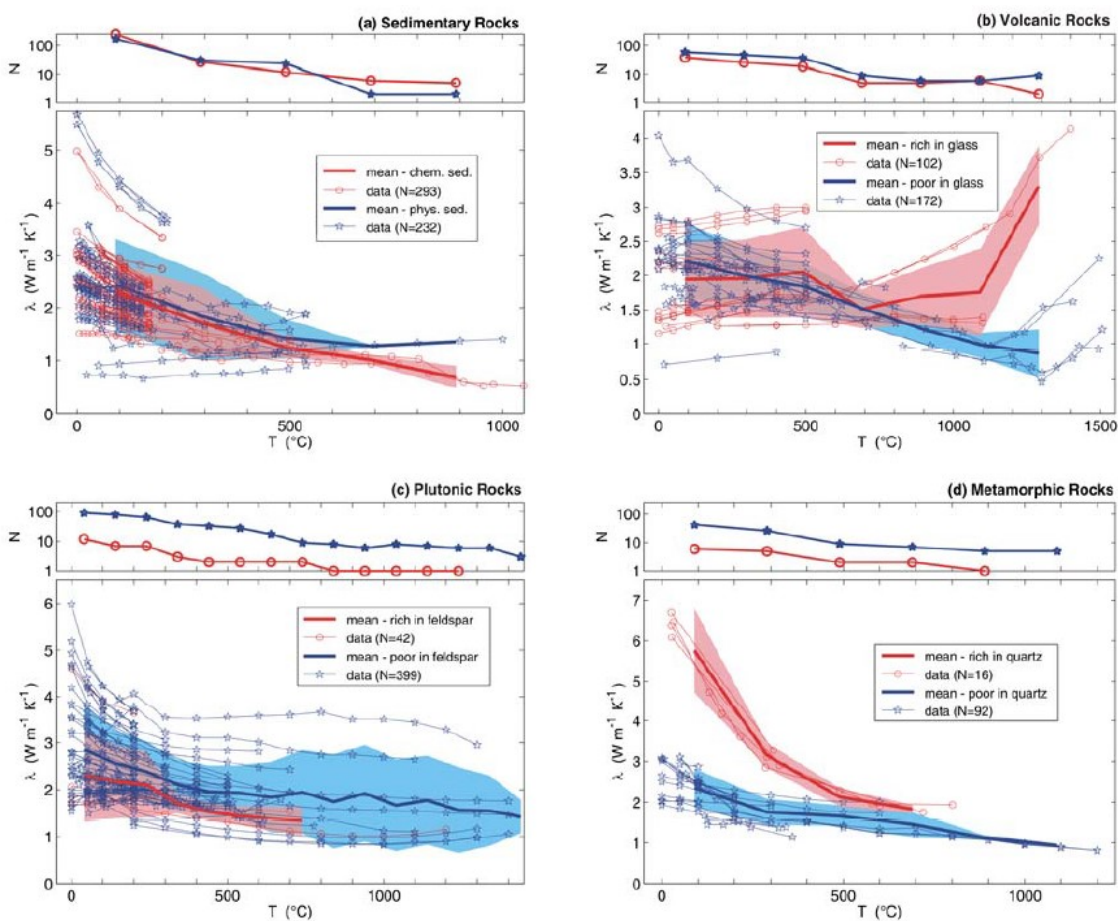
Obr. 44 Změna tepelné vodivosti pískovce a granitu se vzrůstajícím nasycením vodou

### Vliv teploty a tlaku na tepelné vlastnosti hornin

S rostoucí teplotou tepelná vodivost i difuzivita většiny hornin klesají, naopak tepelná kapacita roste. Míra této změny závisí na minerálním složení horniny, přičemž zásadní je přítomnost křemene. Výše zmíněná teplotní závislost je patrná z Obr. 45, kde je znázorněna změna tepelných vlastností hornin v zemské kůře spočítaná na základě empiricky odvozených polynomiálních vzorců. Obr. 46 pak znázorňuje laboratorně naměřené závislosti tepelné vodivosti různých druhů hornin. Je patrné, že zásadní pokles tepelné vodivosti nastává u hornin s původně vyšší vodivostí. To souvisí s minerálním složením, kdy jsou tyto horniny většinou bohaté na křemen a naopak chudé na živec. Zde je dobře si uvědomit, že nejprudší pokles tepelné vodivosti nastává v případě plutonických, resp. metamorfovaných hornin během zvýšení teploty o první stovky stupňů. V případě tlaku je závislost opačná, nicméně v porovnání s teplotou je vliv tlaku zanedbatelný.



Obr. 45 Změna tepelných vlastností hornin v závislosti na rostoucí teplotě v zemské kůře



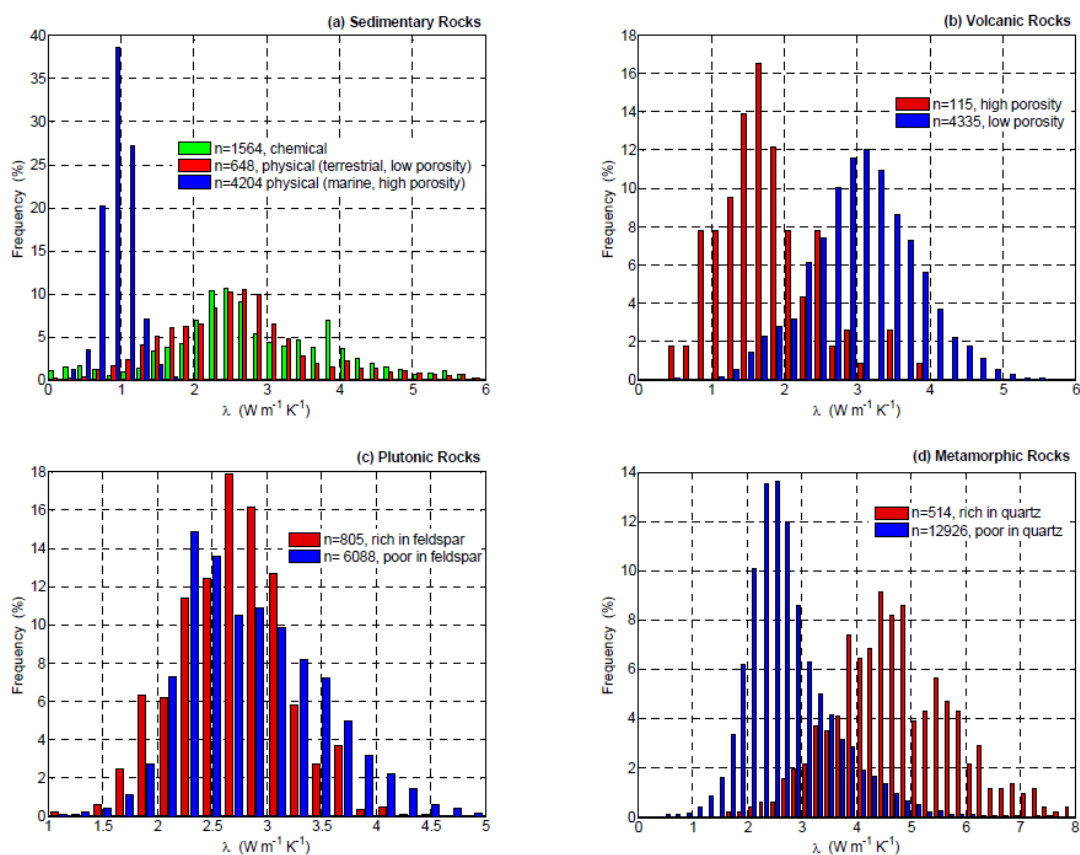
Obr. 46 Závislost tepelné vodivosti různých druhů hornin na teplotě dle laboratorních měření

## Způsoby měření tepelných vlastností hornin

Získání informací o tepelných vlastnostech horninového masivu je elementární nutností pro získání znalostí o jeho teplotním poli, resp. zpracování numerických modelů. Pokud jsou k dispozici horninové vzorky, je možné změřit tepelné vlastnosti laboratorně. Existuje několik metod, jako jsou metoda dělené tyče, plošné, či lineární tepelné zdroje, nebo bezkontaktní metody optického skenování. Více o měření tepelných vlastností horniny v kapitolách 4.1.5 a 4.1.8. Tepelná kapacita je pak měřena laboratorně nejčastěji kalorimetricky. Pokud nejsou k dispozici horninové vzorky, lze tepelné vlastnosti stanovit nepřímou. Jednou z možností je stanovení tepelných vlastností na základě minerálního složení horniny. Zde ale hraje důležitou roli také geometrické uspořádání minerálů v hornině, a pokud složení určujeme např. z úlomků při bezjádrovém vrtání, tuto informaci nemáme. Dalšími nepřímými metodami je korelace tepelných vlastností s dalšími fyzikálními vlastnostmi horniny, jako jsou například hustota nebo porozita. Informace o těchto petrofyzikálních vlastnostech je možné získat většinou z karotážních měření (hustotní gama karotáž, neutronová porozita, akustická karotáž, atd.)

## Typické hodnoty tepelných vlastností hornin

Jak již bylo zmíněno výše, tepelné vlastnosti hornin závisí na jejich minerálním složení, porozitě a na vlastnostech obsažených fluid. Ze všech horninotvorných minerálů má nejvyšší tepelnou vodivost křemen, a proto také horniny s vyšší přítomností křemene mají vyšší tepelnou vodivost. To je také patrné z Obr. 47, kde jsou znázorněny histogramy typických vodivostí různých horninových skupin.



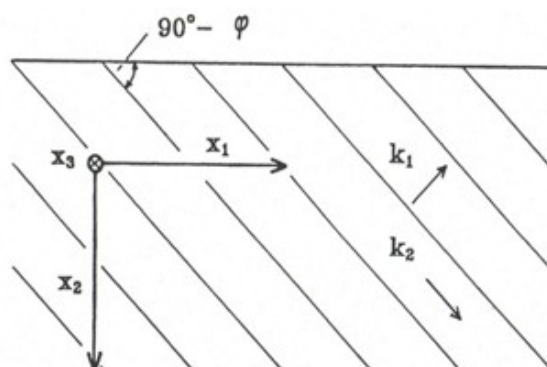
Obr. 47 Histogramy tepelných vodivostí různých typů hornin

### 4.1.2 Effect of thermal conductivity anisotropy of rocks on the subsurface temperature field (Šafanda1995)

Článek Dr. Šafandy z Geofyzikálního ústavu AV ČR komplexně shrnuje vliv anizotropie tepelné vodivosti na teplotní pole pod zemským povrchem. Vzhledem k tomu, že se jedná o stěžejní téma kapitoly 4, byl článek pouze poněkud zkrácen, jinak ponechán v původním znění (překlady).

#### Shrnutí

Vliv anizotropie tepelné vodivosti hornin na tepelný tok byl analyzován pomocí numerického řešení rovnice vedení tepla ve 2-D modelech anizotropních struktur. Byl uvažován nejčastější případ anizotropie hornin se dvěma hlavní směry vodivosti, podél foliace a kolmo k ní. Pro ocenění vlivu samotné anizotropie byl studován vliv anizotropního bloku horniny vloženého do homogenního izotropního okolí, přičemž vodorovná i svislá vodivost bloku byla stejná jako v okolní hornině a poměr vodivosti podél foliace a kolmo k ní byl 1,5. Výsledky jsou prezentovány ve formě obrázků znázorňujících izočáry horizontální a vertikální hustoty tepelného toku. Největší odchylky vertikálního toku se vyskytly na okrajích anizotropního bloku a dosáhly  $\pm 7$  procent bazálního tepelného toku přicházejícího z hloubky. Vertikální složka toku uvnitř bloku byla porovnána s hodnotou, jaká by byla v praxi naměřena ve svislém vrtu, kdy horizontální složka teplotního gradientu se nedá teplotní karotáží určit. Rozdíl mezi těmito dvěma veličinami představuje příspěvek horizontálního gradientu teploty k vertikálnímu toku a dosahuje 1-3 procent v modelech s poměrem stran (šířka versus výška) hranolu menším než 2. Další zkoumaný model představuje situaci, kdy anizotropní těleso působí také jako refraktor tepelného toku: do horniny s vodorovnou foliací a faktorem anizotropie 1,5 byl vložen blok téže horniny natočený o  $45^\circ$ . V tomto případě se změny vertikální složky toku koncentrují podél bočních stran natočeného bloku a pohybují se od -10 do +15 procent toku přicházejícího z hloubky.



Obr. 48 Ukloněná vrstevnatá hornina s vodivostmi  $k_1$  a  $k_2$ , kolmo k vrstvám/foliaci, respektive podél nich, představuje nejjednodušší anizotropní horninové prostředí.

#### Vedení tepla v anizotropním prostředí

Níže uvedené výpočty byly provedeny pro nejjednodušší případ se dvěma hlavními směry anizotropie. To je například případ hornin s jednou hlavní osou vodivosti ve směru kolmém k foliaci/vrstevnatosti a druhou hlavní osou podél foliace/vrstev, který se dá studovat jako 2-D

úloha vedení tepla. Pro strukturu s ukloněnými vrstvami/foliací (Obr. 48) se souřadnicovým systémem  $(x_1, x_2, x_3)$  má tenzor vodivosti  $k$  tvar

$$k = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{pmatrix} k_1 \cos^2 \varphi + k_2 \sin^2 \varphi & 0.5 \sin 2\varphi (k_2 - k_1) & 0 \\ 0.5 \sin 2\varphi (k_2 - k_1) & k_1 \sin^2 \varphi + k_2 \cos^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

kde  $(90^\circ - \varphi)$  je odklon vrstev od vodorovného směru a  $k_1$  a  $k_2$  jsou hlavní hodnoty tepelné vodivosti kolmo k vrstvám, respektive rovnoběžně s nimi. Osa  $x_3$ , kolmá na rovinu  $(x_1, x_2)$ , je rovnoběžná s vrstvami. V této 2-D geometrii se tedy teplota ve směru osy  $x_3$  nemění a teplotní gradient  $\text{grad}(T)$  leží v rovině  $(x_1, x_2)$ . Vektor tepelného toku  $q = (q_1, q_2, q_3)$  je svázán s gradientem vztahem

$$q = -k * \text{grad}(T) \quad (6)$$

Dosazením výrazu (5) za  $k$  a uvážením faktu, že  $\text{grad}(T) = (\partial T/\partial x_1, \partial T/\partial x_2, 0)$  dostáváme

$$\begin{aligned} q_1 &= -(k_1 \cos^2 \varphi + k_2 \sin^2 \varphi) \frac{\partial T}{\partial x_1} - 0.5 \sin 2\varphi (k_2 - k_1) \frac{\partial T}{\partial x_2} \\ q_2 &= -0.5 \sin 2\varphi (k_2 - k_1) \frac{\partial T}{\partial x_1} - (k_1 \sin^2 \varphi + k_2 \cos^2 \varphi) \frac{\partial T}{\partial x_2} \\ q_3 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

To znamená, že vektor toku leží také v rovině  $(x_1, x_2)$ , ale jeho směr je obecně různý od směru gradientu teploty. V souladu s úmluvou používanou v geotermice je svislá složka toku kladná, pokud míří vzhůru, má tedy opačné znaménko, než vyplývá z rovnic (6) a (7).

Za předpokladu ustáleného stavu musí rozložení teploty  $T(x_1, x_2)$  vyhovovat rovnici vedení tepla

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( k_{11} \frac{\partial T}{\partial x_1} + k_{12} \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( k_{21} \frac{\partial T}{\partial x_1} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) = -A \quad (8)$$

kde  $A$  představuje (radioaktivní) tepelnou produkci v jednotce objemu a  $k_{ij}$  jsou složky tenzoru vodivosti dané rovnicí (5). V následující kapitole je analyzován případ vodorovné nekonečné anizotropní vrstvy a řešení rovnice (8) ve vybraných modelech anizotropního prostředí jsou věnovány další kapitoly.

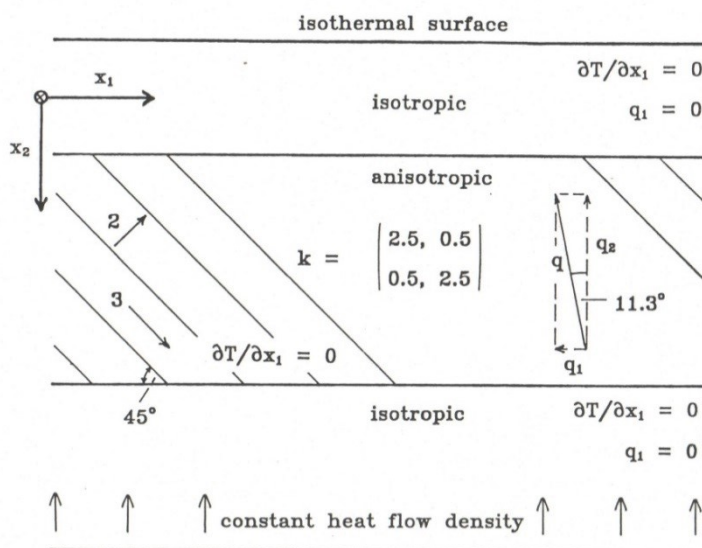
### Horizontální anizotropní nekonečná deska

Typickým příkladem anizotropie, se kterou se setkáváme při stanovení tepelného toku ve vrtech, je horizontální anizotropní vrstva obklopená izotropní horninou. I když ve skutečnosti šířka každé vrstvy je omezená, poskytuje model nekonečné vrstvy, znázorněné na Obr. 49 dobré přiblížení poměrů v horizontálně omezené vrstvě, vlastně hranolu s dostatečně velkým poměrem šířky k výšce (viz další kapitoly).

Pro vizualizaci modelu si můžeme vrstvu představit jako sedimentární horninu s vrstvami ukloněnými o  $45^\circ$  od vodorovného směru s vodivostí  $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  kolmo na vrstvy a  $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  rovnoběžně s nimi. To odpovídá faktoru anizotropie 1,5. Ve zvoleném souřadnicovém systému  $(x_1, x_2)$  má matice tenzoru vodivosti (5) tvar



$$k = \begin{bmatrix} 2,5 & 0,5 \\ 0,5 & 2,5 \end{bmatrix} \quad (9)$$



Obr. 49 Jednorozměrný model nekonečné anizotropní horizontální vrstvy obklopené izotropním poloprostorem. Vertikální tepelný tok je konstantní v celém modelu. Sklon vektoru tepelného toku ve vrstvě je určen pouze tenzorem vodivosti.

Pokud má povrch modelu konstantní teplotu a pokud je vektor toku přicházející z hloubky vertikální a všude stejný, jsou izotermy v anizotropní vrstvě rovnoběžné s povrchem. To znamená, že teplotní gradient má svislý směr a podmínka  $\partial T/\partial x_1 = 0$  platí v celém modelu, tedy i na nekonečně vzdálených bocích modelu.

Z kontinuity normálových složek toku na hranicích oblastí s různou vodivostí vyplývá, že vertikální složka toku uvnitř vrstvy je stejná jako ta mimo ni. Tok  $q = (q_1, q_2)$  ve vrstvě lze vypočítat podle (5) jako

$$q_1 = -k_{12} \frac{\partial T}{\partial x_1} \quad q_2 = -k_{22} \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (10)$$

Pokud teplota roste s hloubkou (ve směru osy  $x_2$ ), je vektor toku ve vrstvě odkloněn od vertikálního teplotního gradientu ve směru záporné osy  $x_1$  o úhel

$$\alpha = \arctan \frac{q_1}{q_2} = \arctan \frac{k_{12}}{k_{22}} = 11,31^\circ \quad (11)$$

Velikost celkového toku je

$$|q| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2} = \left| \frac{\partial T}{\partial x_2} \right| \sqrt{k_{12}^2 + k_{22}^2} = 2,55 \left| \frac{\partial T}{\partial x_2} \right| \quad (12)$$

na rozdíl od celkové velikosti (vertikálního) toku v okolním izotropním prostředí, kde je  $|q_2| = 2.5 |\partial T/\partial x_2|$ . Velikost toku je tedy uvnitř vrstvy přibližně o 2 procenta větší než mimo ni. Horizontální složka toku  $q_1$  je nenulová navzdory Neumannově okrajové podmínce  $\partial T/\partial x_1 = 0$  v bocích modelu, protože je generována výhradně vertikálním teplotním gradientem podle rovnice (10).

Je třeba zdůraznit, že teplo přenášené k povrchu je uvnitř i vně vrstvy stejné. Nárůst celkové velikosti toku ve vrstvě je způsoben horizontální složkou toku, která proudí proti směru osy  $x_1$  od nekonečna do nekonečna. Jinými slovy, nemůžeme spekulovat o vertikálních variacích



tepelného toku, které jsou výsledkem přechodu svislého vrtu přes anizotropní horizontální vrstvu. Vertikální tok v takové vrstvě, počítaný jako součin vertikálního gradientu a vertikální diagonální složky tenzoru vodivosti, by měl být stejně reprezentativní jako hodnoty získané z jiných částí vrtu, pokud samozřejmě nedochází k jiným rušivým vlivům.

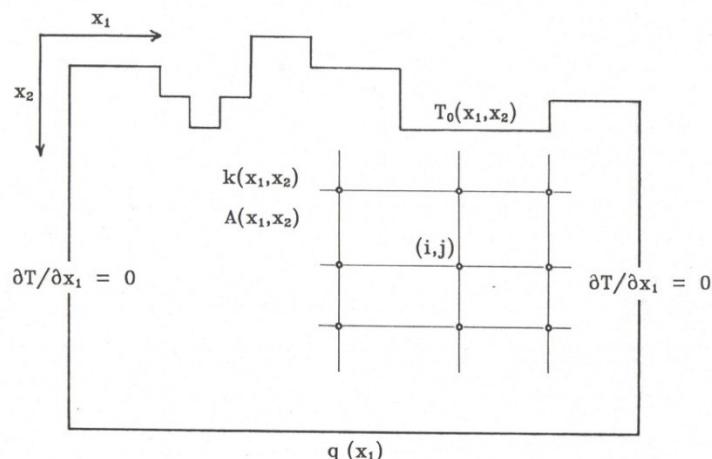
### Numerické řešení rovnice vedení tepla ve 2-D anizotropních modelech

Na rozdíl od modelu horizontální anizotropní vrstvy popsaného v předchozí části nelze většinu složitějších struktur analyzovat analyticky. Patří mezi ně například případ „konečné“ vrstvy představované anizotropním hranolem vnořeným do izotropního poloprostoru. Abychom našli rozložení teploty v takovémto 2-D modelu, je potřeba řešit rovnici (8) numericky. Algoritmus řešení metodou konečných diferencí byl implementován do výpočetního programu. Program umí řešit rovnici (8) ve 2-D modelech s geometrií znázorněnou na Obr. 48. Zobrazené okrajové podmínky, které jsou konsistentní s podmínkami ve výše uvedeném modelu nekonečné vrstvy, zajišťují jednoznačnost řešení. Předepisují tepelný tok  $q$  na dolní hranici, povrchovou teplotu  $T_0$  na horní hranici a podmínky symetrie teplotního pole ( $\partial T / \partial x_1 = 0$ ) v bocích modelu. Uvnitř modelu musí být známo rozložení tenzoru tepelné vodivosti  $k(x_1, x_2)$  a zdrojů tepla  $A(x_1, x_2)$ . Diferenční schéma rovnice (8) bylo odvozeno pro každý uzlový bod obecně nepravidelné obdélníkové sítě pokrývající oblast řešení.

K aproximaci smíšených parciálních derivací teploty bylo použito 9-bodové diferenční schéma (Obr. 50). Jeho přesnost pro nepravidelnou síť je řádu  $(h_{x1}^2 + h_{x2}^2)$ , kde  $h_{x1}$  a  $h_{x2}$  představují maximální krok sítě ve vodorovném, respektive svislém směru). Soustava diferenčních rovnic představuje lineární algebraický systém vzhledem k neznámým hodnotám teploty v uzlových bodech. Byl řešen iterační metodou horní relaxace. Optimální relaxační parametr mírně vzrůstá s rostoucím počtem uzlových bodů (5000 – 23000) a hodnoty použité ve výpočtech se pohybovaly mezi 1,95 a 1,97. Konvergence iteračního procesu byla kontrolována velikostí

$$|T^k - T^{k-1}| = \sqrt{|\sum T_i^k - T_i^{k-1}|} \quad (13)$$

kde  $T_i^k$  a  $T_i^{k-1}$  jsou teploty po  $k$ -té a  $(k-1)$ -té iteraci v  $i$ -tém uzlovém bodě a součet se provádí přes všechny uzlové body, a také velikostí největší kladné a největší záporné hodnoty rozdílu  $(T_i^k - T_i^{k-1})$  na množině všech uzlových bodů. Iterace byly prováděny, dokud se nezastavil pokles normy. Nenulová konečná hodnota normy souvisí s konečnou reprezentací čísel (6-7 číslic v jednoduché přesnosti) v počítači (PC 486). Typický počet iterací potřebných k dosažení této úrovně bylo přibližně 500 pro 5000 bodů sítě a asi 1500 pro 23000 bodů sítě. Správná funkce počítačového programu a přesnost řešení byly testovány řešením modelu nekonečné horizontální anizotropní vrstvy znázorněné na Obr. 49. Rozměry oblasti, ve které byla rovnice (8) řešena numericky byly konečné. Nekonečný horizontální rozměr modelu byl simulován okrajovou podmínkou  $\partial T / \partial x_1 = 0$  v bocích modelu.



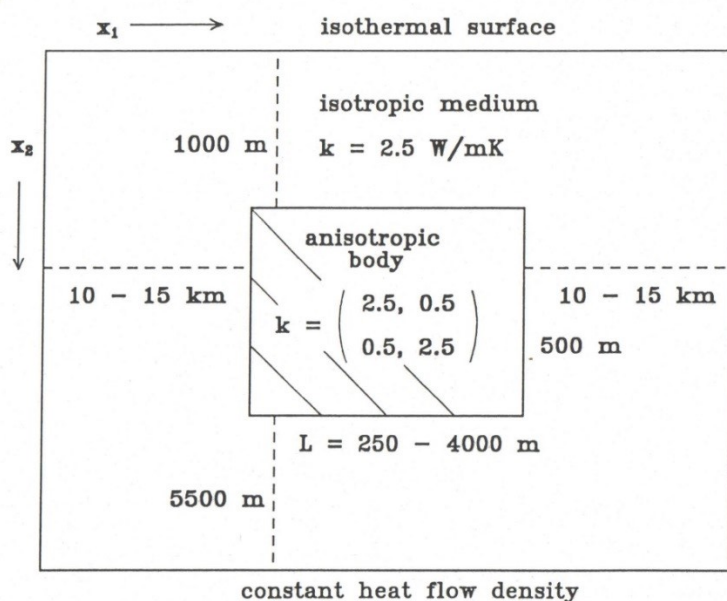
Obr. 50 Obecný tvar oblasti, ve které lze 2-D anizotropní rovnici vedení tepla v ustáleném stavu řešit algoritmem konečných diferencí popsáním v původním článku

### Anizotropní hranol v izotropním prostředí

K ocenění vlivu 2-D anizotropní struktury na rozložení tepelného toku byla rovnice (8) řešena pro řadu modelů s anizotropními horizontálními hranoly (Obr. 51). Šířka hranolu se pohybovala od 250 m (polovina jeho výšky) do 4000 m, čímž se blížila analyticky řešitelnému případu vodorovné anizotropní vrstvy o stejné tloušťce. Pro ocenění vlivu samotné anizotropie byl uvažován hranol (Obr. 51), jehož tenzor vodivosti má oba diagonální členy rovné vodivosti okolního izotropního poloprostoru. Na rozdíl od nekonečné horizontální anizotropní vrstvy, hranol konečné šířky narušuje 1-D strukturu teplotního pole v každém bodě. Okrajové podmínky (Obr. 51) použité při numerickém řešení v konečné vzdálenosti od hranolu jsou tedy, s výjimkou povrchu, platné přesně pouze v nekonečnu. Aby se minimalizoval jejich zkreslující účinek na teplotní pole v blízkosti anizotropního tělesa, byly pravý a levý okraj modelu více než 10 km a spodní hranice 5,5 km od hranolu. Aby bylo možné posoudit vliv této aproximace okrajových podmínek, úloha byla řešena také s Dirichletovou podmínkou na pravém a levém okraji modelu, kde byla předepsána teplota odpovídající vedení tepla v izotropním poloprostoru. Obě řešení se liší zanedbatelně.

Pro model z Obr. 51 jsou rozdíly v toku na úrovni  $0,001 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Rozložení horizontální a vertikální složky toku v oblasti přiléhající k hranolu šířky 1000 m je znázorněno na Obr. 52(a), respektive Obr. 52(b). Neporušený tok na dolní hranici modelu byl  $8\text{--}20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Tento model je označován jako model 1. Vertikální rozložení toku má dvě maxima  $86 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  a dvě minima  $74 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ , ležící vždy v opačných rozích hranolu. Mírná asymetrie extrémů je způsobena blízkostí izotermické horní hranice, kdy teplo, které přitéká hranolem z pravé na levou stranu nemá mezi hranolem a povrchem dostatek místa k návratu na pravou stranu. Střední část hranolu vykazuje hodnoty cca  $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ , což odpovídá teoretické hodnotě pro hranol nekonečné šířky. S rostoucí šířkou se extrémy mírně zmenšují a oblast s  $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  se rozprostírá přes převážnou část hranolu. Variace vertikálního toku s hloubkou činí  $\pm 6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ , což je asi 7 procent neporušeného toku na spodní hranici modelu. Horizontální složka toku vykazuje jedno minimum  $-11 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  ve střední části hranolu a dvě maxima kolem  $3 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  těsně pod a nad hranolem. Teoretická hodnota pro nekonečnou šířku (= horizontální vrstva) je  $-16 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  v tělese a nula mimo něj. Se vzrůstající šířkou hranolu se vypočtené hodnoty blíží teoretickým hodnotám toku. Například pro model s šířkou 4000 m (poměr stran 8), má

převládající část hranolu hodnoty pod  $-14 \text{ mW.m}^{-2}$ , střední část pod  $-15 \text{ mW.m}^{-2}$  a maxima vně hranolu jsou  $+2 \text{ mW.m}^{-2}$ . Obr. 52(b) také ukazuje zdrojové oblasti nenulové složky toku v hranolu – pod anizotropním tělesem a napravo od něj, a její vymizení – nalevo od hranolu a nad ním. To znamená, že horizontální složka představuje skutečný přenos tepla z pravé na levou stranu modelu a je příčinou variací vertikální složky toku s hloubkou. To je hlavní rozdíl proti modelu nekonečné vrstvy, kde je zdroj horizontální složky ve vrstvě v nekonečnu, a proto neovlivňuje vertikální tok. Jak bylo uvedeno výše, tenzor vodivosti použitý pro hranol může reprezentovat usazenou horninu nebo metamorfovanou horninu s foliací, se sklonem vrstev  $45^\circ$  (Obr. 49). Potom rozložení toku Obr. 52(a), (b) odpovídá intuitivní představě o toku preferujícím vodivější směr podél vrstev/foliace.



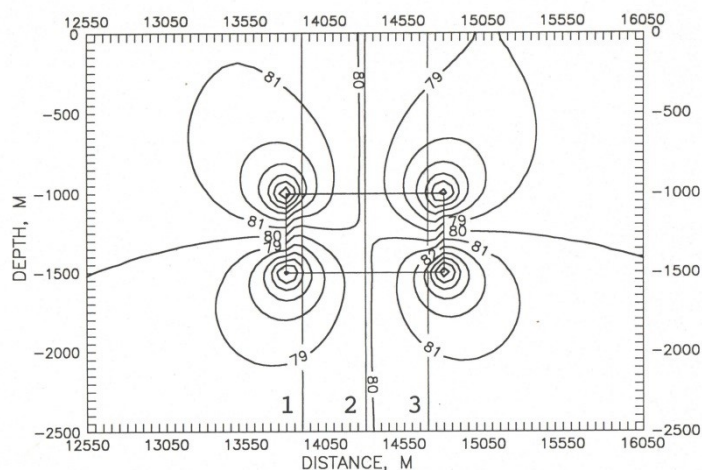
Obr. 51 Geometrie modelu 1 pro studium samotného anizotropního efektu anizotropního hranolu obklopeného izotropním prostředím. Šířka hranolu se pohybuje mezi 250 a 4000 m.

Existuje další možný zdroj variací vertikální složky toku měřené ve vrtu, který prochází anizotropní horninou. Vertikální složka toku je v 2-D anizotropním prostředí dána rovnicí (5) a může být vyjádřena, s ohledem na výše uvedenou konvenci o znaménku, jako

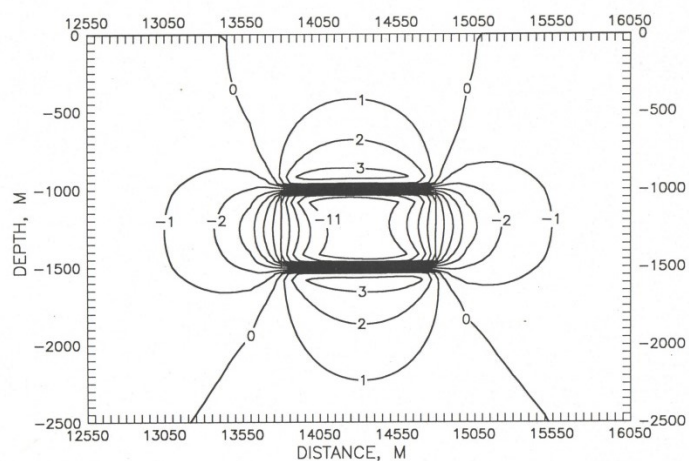
$$q_2 = k_{21} \frac{\partial T}{\partial x_1} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (14)$$

Protože většina vrtů je vertikálních nebo téměř vertikálních, horizontální složku teplotního gradientu nelze určit. Proto se při výpočtu vertikálního tepelného toku první člen na pravé straně rovnice (14) nedá použít. K simulaci této situace byla vertikální složka toku podél zvolených vertikálních profilů počítána jako

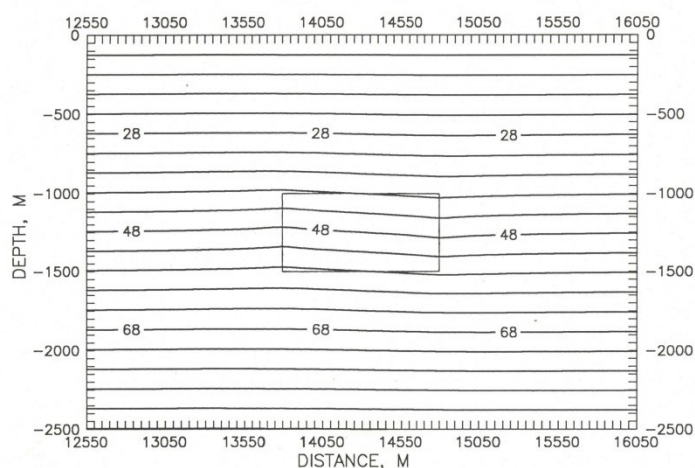
$$q'_2 = k_{22} \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (15)$$



a)



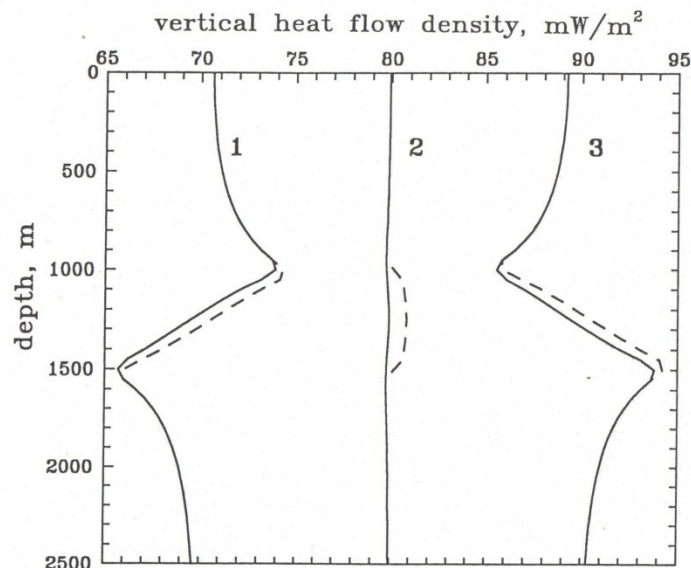
b)



c)

Obr. 52 Model 1: (a) vertikální a (b) horizontální složky hustoty tepelného toku. Hodnota tepelného toku na spodní hranici (v hloubce 7000 m) je  $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Čáry 1, 2 a 3 vyznačují polohu vertikálních profilů, podél kterých byly sledovány změny tepelného toku. (c) teplotní pole v okolí hranolu; patrný je negativní horizontální gradient v hranolu. Vodorovná osa ukazuje vzdálenost od levé strany modelu.

V Obr. 53 jsou vyneseny hodnoty  $q_2$  a  $q'_2$  podél profilů 1, 2 a 3 (viz Obr. 52a), které procházejí přes střed hranolu (profil 2), 100 m od jeho levého okraje (profil 1) a 100 m od jeho pravého okraje (profil 3). Pro přehlednost je profil 1 posunut o  $-10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  a profil 3 o  $+10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ .



Obr. 53 Vertikální změny tepelného toku odpovídající modelu 1 podél profilů 1, 2 a 3 vynesných v Obr. 52. Profily 1 a 3 jsou posunuty o  $-10$ , respektive  $+10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Plné čáry zobrazují skutečné hodnoty. Přerušované čáry, totožné vně hranolu s plnými, simulují výsledky měření ve vrtech.

Tyto tři křivky se v hranolu (interval  $1000 - 1500 \text{ m}$ ) štěpí; přerušované čáry znázorňují vertikální tok, který by byl naměřen ve vrtu. Mimo hranol, v izotropním prostředí, čárkované křivky splývají s plnými, které představují správné hodnoty. Překvapivě, navzdory očekávání, jsou hodnoty  $q'_2$  v anizotropním tělese asi o  $1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  větší než skutečné hodnoty  $q_2$ . Tento rozdíl se snižuje s rostoucím poměrem stran hranolu. Pro poměr stran menší než 2 se pohybuje mezi 1 a 3 procenty skutečné hodnoty.

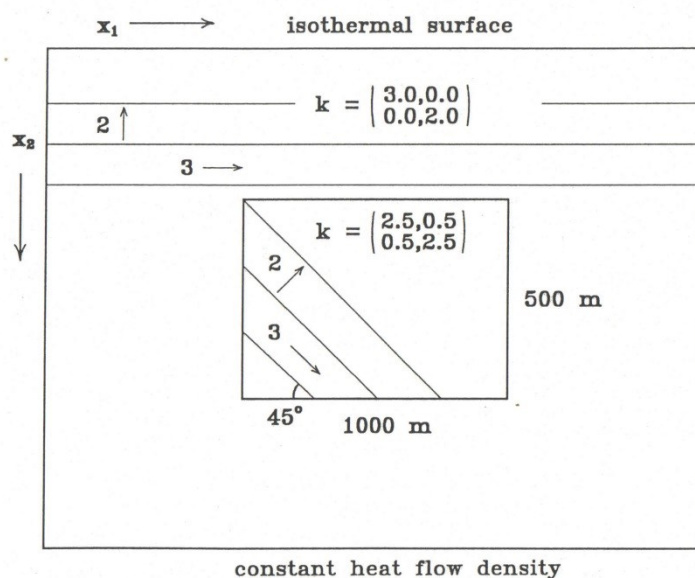
Vysvětlení je následující. V rozdílu  $q'_2 - q_2 = -k_{21} \frac{\partial T}{\partial x_1}$  je první faktor součinu,  $k_{21}$ , pozitivní. Druhý faktor,  $\frac{\partial T}{\partial x_1}$ , se zdá být také pozitivní, protože horizontální složka toku,  $q_1$ , míří doleva ve směru záporné osy  $x_1$ , a jak známo, teplo proudí z teplejší do chladnější oblasti. Horizontální složka gradientu teploty je však uvnitř hranolu negativní (Obr. 52c); díky tomu je rozdíl  $q'_2 - q_2$  kladný. Horizontální složka toku, kterou lze vyjádřit jako

$$q_1 = -k_{11} \frac{\partial T}{\partial x_1} - k_{12} \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (16)$$

je záporná (ukazuje doleva) kvůli absolutní hodnotě  $k_{12} \frac{\partial T}{\partial x_2}$ , která je větší než  $k_{11} \frac{\partial T}{\partial x_1}$ . Kladné znaménko  $q'_2 - q_2$  se objevuje u všech modelů s nenulovými nediagonálními složkami tenzoru tepelné vodivosti. Nediagonální člen se pro uvažované hodnoty  $k_1 = 2$  a  $k_2 = 3$  (viz rovnice 5) pohybuje mezi 0 a 0,5. Pokud jsou vrstvy uvnitř hranolu nakloněny opačně, pak jak horizontální gradient, tak nediagonální složky mění znaménko a rozdíl  $q'_2 - q_2$  zůstává kladný.

## Anizotropní hranol v anizotropním prostředí

Model 1 studovaný v předchozí části demonstroval ovlivnění tepelného toku samotnou anizotropií, protože horizontální a vertikální vodivost jak v hranolu, tak i jeho okolí byla stejná. Díky tomu nedocházelo k refrakci toku, kdy teplo proudící k povrchu preferuje zóny

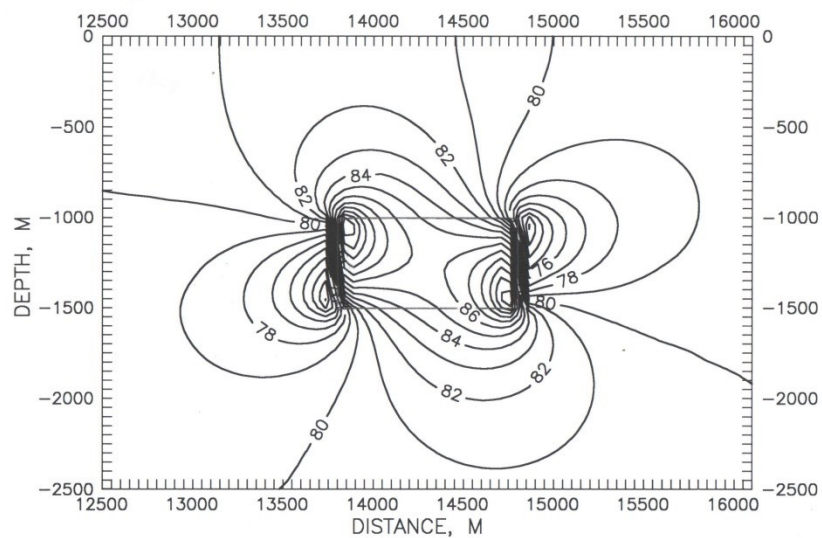


Obr. 54 Geometrie modelu 2 pro studium vlivu anizotropie současně s refrakcí tepelného toku.

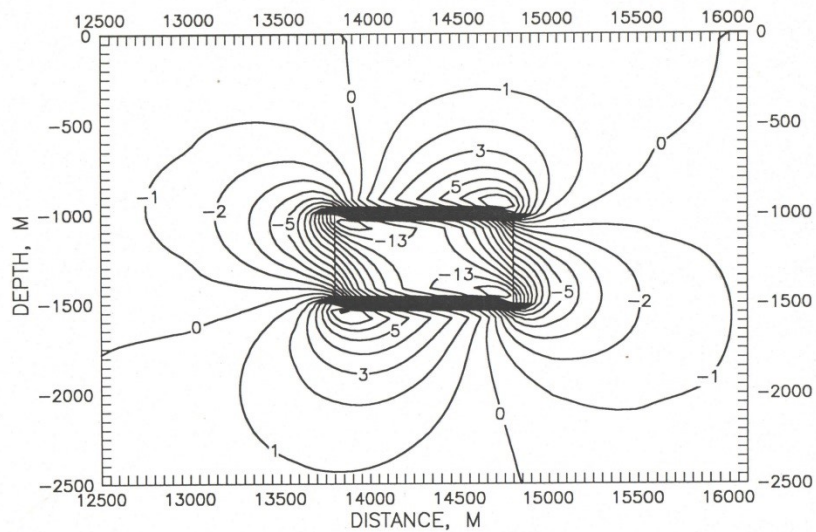
s nižším tepelným odporem. Výskyt struktury představované modelem 1 není v reálných geologických podmínkách příliš pravděpodobný. Blíže k realitě je model 2, ve kterém je hranol se stejným tenzorem vodivosti jako v modelu 1 umístěn do horniny s vodorovně uloženými vrstvami/foliací. Pokud je vodivost ve směru foliace  $3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a kolmo k ní  $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , lze hranol považovat za blok téže horniny otočený ve směru hodinových ručiček o  $45^\circ$  (Obr. 54). Rozložení toku odpovídající modelu 2 je zobrazeno v Obr. 55. Ve srovnání s modelem 1, jsou maxima i minima horizontální a vertikální složky toku pootočena ve směru hodinových ručiček a extrémy mají větší amplitudy. Minima vertikálního toku o velikosti  $72 \text{ mW.m}^{-2}$  nyní leží mimo hranol, zatímco maxima o velikosti téměř  $92 \text{ mW.m}^{-2}$  se přesunula dovnitř hranolu. Rozdíly se pohybují od -10 do +15 procent bazálního toku  $80 \text{ mW.m}^{-2}$  na dolním okraji modelu, zatímco v modelu 1, kde se neuplatnil efekt refrakce tepla, to bylo  $\pm 7$  procent. Vertikální vodivost uvnitř hranolu,  $2,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , je o 25 procent vyšší, než mimo něj což znamená, že hranol působí jako koncentrátor tepelného toku. Největší záporné hodnoty horizontální složky, asi  $-14 \text{ mW.m}^{-2}$ , se objevují poblíž pravého dolního a levého horního rohu a představují místa nejintenzivnějšího toku tepla zprava doleva. Největší kladné hodnoty horizontálního toku,  $7-8 \text{ mW.m}^{-2}$  existuje v blízkosti protilehlých rohů, ale mimo hranol.

Podobně jako u modelu 1 byly i zde spočteny vertikální tok podél tří profilů znázorněných na Obr. 52(a) pomocí rovnic (14) a (15). Výsledky jsou uvedeny na Obr. 56. Křivka spočtená podle (15) (přerušovaná čára) odpovídající měření ve vrtech, se liší od skutečných hodnot opět pouze v rámci hranolu. I když v tomto případě médium mimo hranol je také anizotropní, nediagonální složky tenzoru v něm jsou nulové, protože vrstvy/foliace jsou uloženy vodorovně.





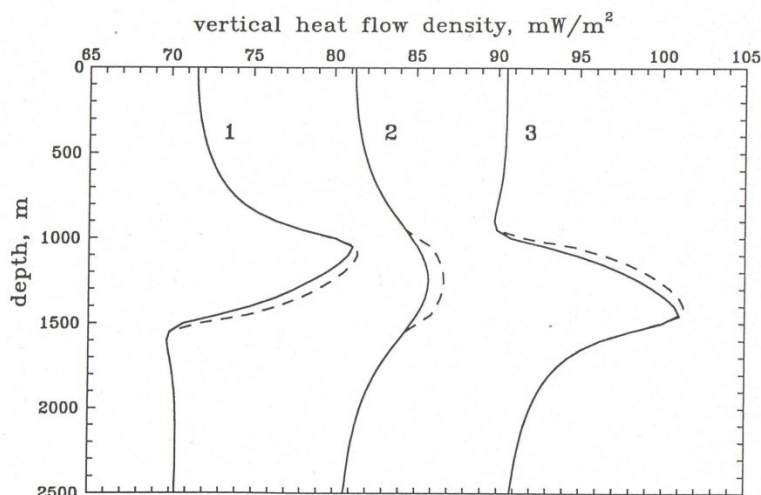
a)



b)

Obr. 55 Model 2: (a) vertikální a (b) horizontální složka hustoty tepelného toku. Hodnota tepelného toku na dolním okraji modelu (v hloubce 7000 m) je  $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$





Obr. 56 Vertikální změny tepelného toku odpovídající modelu 2 podél profilů 1, 2 a 3 znázorněných na Obrázek 9(a). Profily 1 a 3 jsou posunuty o  $-10$ , respektive  $+10$   $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Plné čáry zobrazují skutečné hodnoty. Přerušované čáry, totožné vně hranolu s plnými, simulují výsledky měření ve vrtech.

## Závěr

Vertikální tepelný tok v rámci 1-D geotermálních modelů zahrnujících horizontální anizotropní vrstvu obklopenou izotropním prostředím je konstantní (pro nulové zdroje tepla). To znamená, že při výpočtu zemského tepelného toku ve vertikálním vrtu, který protíná takovou vrstvu, je součin vertikálního teplotního gradientu a vertikální vodivosti roven skutečné hodnotě toku. Horizontální tepelný tok uvnitř vrstvy, úměrný vertikálnímu gradientu a nediagonální složce tenzoru vodivosti, proudí z nekonečna do nekonečna. To znamená, že sklon vektoru tepelného toku není na úkor vertikální složky toku.

V případě anizotropního horizontálního hranolu, jehož vertikální i horizontální vodivost je stejná jako v okolním izotropním prostředí, jsou změny tepelného toku způsobeny jen anizotropií. S rostoucím poměrem šířky k výšce hranolu, se rozložení toku v hranolu blíží podmínkám ve vrstvě a „2-D“ efekty se objevují jen u jeho okrajů. Typicky se objevují dvě maxima a dvě minima vertikálního toku v opačných rozích hranolu. Graf horizontální složky toku ukazuje zdrojovou oblast mimo anizotropní těleso. Pro diagonální a nediagonální složku tenzoru vodivosti  $2,5$ , respektive  $0,5$   $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a poměr šířky k výšce hranolu od  $0,5$  do  $8$  jsou odchylky od toku přitékajícího z hloubky  $\pm 6-7$  procent.

Simulace měření zemského tepelného toku ve svislých vrtech, které pronikají anizotropním tělesem/hranolem, kdy lze určit pouze svislou složku teplotního gradientu, ukazují, že naměřený vertikální tok bude zhruba o  $1$  procento vyšší než skutečná hodnota, k jejímuž určení je potřeba znát i horizontální složku gradientu teploty.

U realističtějších modelů, kde se vertikální vodivost anizotropního tělesa liší od okolí, převládá vliv refrakce tepla nad efektem anizotropie.

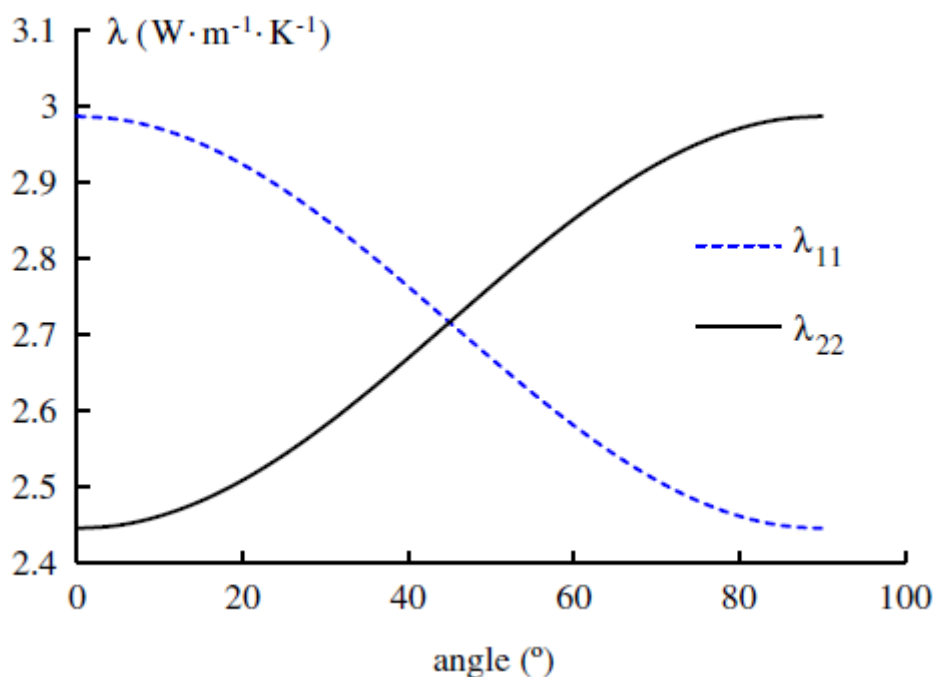
Na základě výše popsaných studií lze konstatovat, že účinky anizotropie tepelné vodivosti na rozložení zemského tepelného toku jsou stejného řádu jako chyba těch nejkvalitnějších měření

toku ve vrtech. To znamená, že jejich spolehlivé experimentální potvrzení by mohlo být možné pouze ve výjimečných případech.

#### 4.1.3 Estimation of the effective thermal properties of cracked rocks (Zhou et al. 2016)

Tento článek se věnuje možnostem určení efektivní tepelné vodivosti (ETV) rozpukané horniny, což je důležitý faktor v případech, který může hrát roli například v tektonicky porušených částech krystalických masivů.

ETV hornin je silně závislá na konfiguraci trhlin a tepelných vlastnostech média, které trhliny vyplňuje a velmi se liší od vlastností horninové matrice. V této studii jsou zkoumány metody pro predikci ETV rozpukané horniny a také účinky různých faktorů, jako je distribuce trhlin, typ saturační tekutiny, či různé tlakové podmínky. Jsou zde také pomocí homogenizační metody odvozeny vzorce pro ETV a efektivní tepelnou roztažnost (ETR). Výsledky ukazují, že rozdělení trhlin má významný anizotropní účinek na ETV i ETR, stejně jako druh media vyplňujícího trhliny (zahrnuty byly voda, vzduch a olej). Na vzorku žuly byl také zkoumán vliv různých úrovní napětí pomocí třísosých kompresních testů. Růst mikrotrhlin indukovaný tímto napětím způsobil významnou anizotropii jak v případě ETV, tak ETR. Na Obr. 57 je znázorněna změna ETV v závislosti na úhlu trhliny, přičemž nejnižší je kolmo a nejvyšší ve směru paralelním s trhlínami.

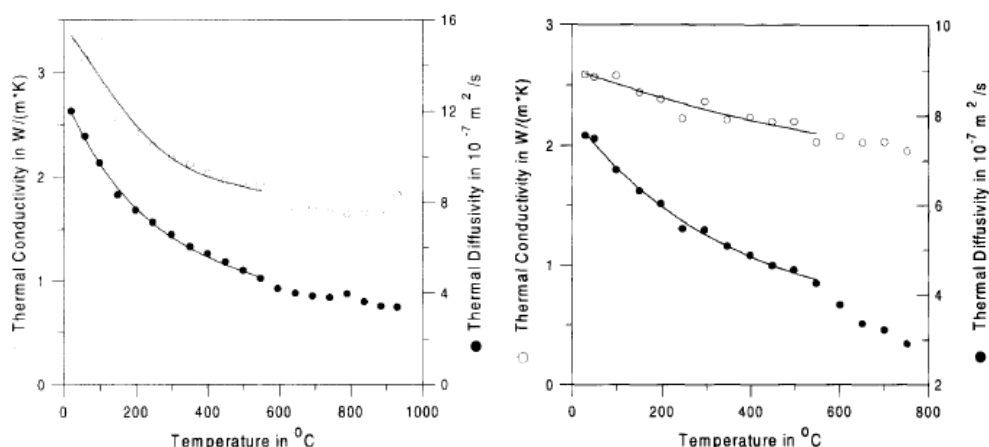


Obr. 57 Změna tepelné vodivosti ve dvou kolmých směrech v závislosti na úhlu svírajícím se směrem trhlín

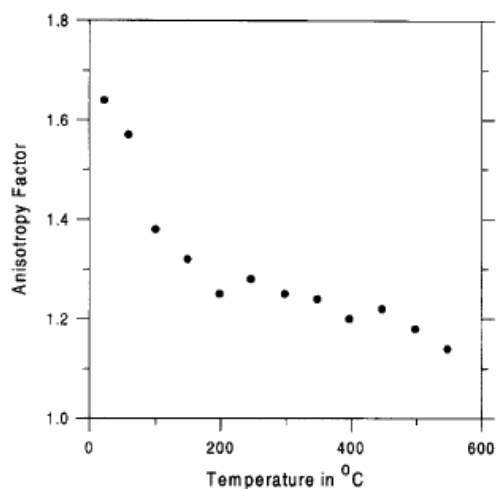
#### 4.1.4 Thermal properties of gneisses and amphibolites high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples, (Seipold a Huenges 1997)

Článek seznamuje s výsledky výzkumu tepelných vlastností hornin z nejhlubšího evropského vrtu KTB v německém Windischeschenbachu. Vrt se nachází v blízkosti západní hranice ČR

a je hluboký 9101 m. Předmětem výzkumu byly změny tepelné vodivosti a difuzivity, a hlavně také jejich anizotropie v prostředí vysokých teplot a tlaků. Jak je z názvu patrné, zkoumanými horninami byl amfibolit a pararula, což je analogií k horninám v dolu Rožná. Zatímco pararula zastižená ve vrtu projevovala silnou anizotropii tepelných vlastností, tak v případě amfibolitu byla zanedbatelná. V případě pararuly byl také zjištěn podstatně větší pokles hodnot tepelné vodivosti a difuzivity se vzrůstající teplotou než v případě amfibolitu (Obr. 58). Míra anizotropie pararuly s teplotou výrazně klesá, což je patrné z Obr. 59, kde je znázorněn pokles koeficientu anizotropie (poměr tepelné vodivosti podél a kolmo k ploše foliace) s teplotou. V Intervalu mezi 50 MPa a 1000 MPa lineárně narůstaly tepelná vodivost i difuzivita v případě obou horninových typů, přičemž ale tento nárůst byl menší než pokles vlivem nárůstu teploty, což je ve shodě s předešlými zjištěními.



Obr. 58 Teplotní závislost tepelných vlastností pararuly (vlevo) a amfibolitu (vpravo)

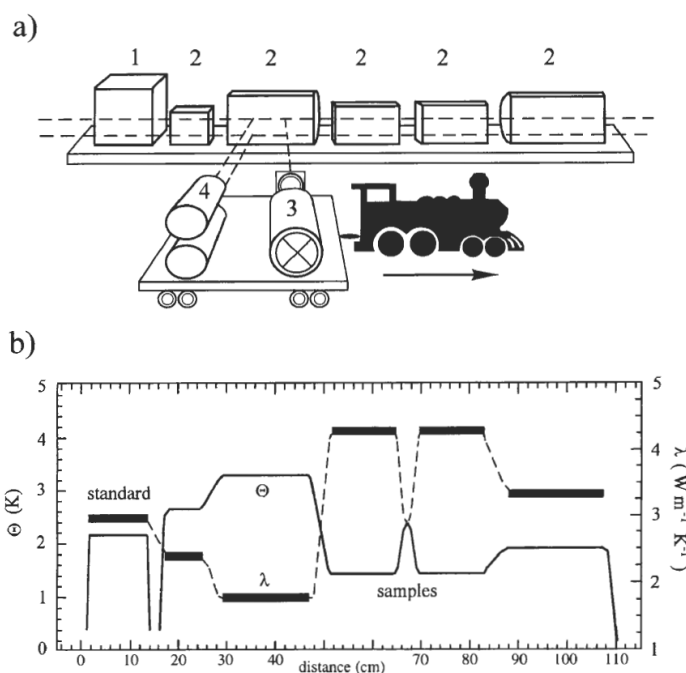


Obr. 59 Teplotní závislost koeficientu anizotropie vzorku pararuly z hloubky 2811 m

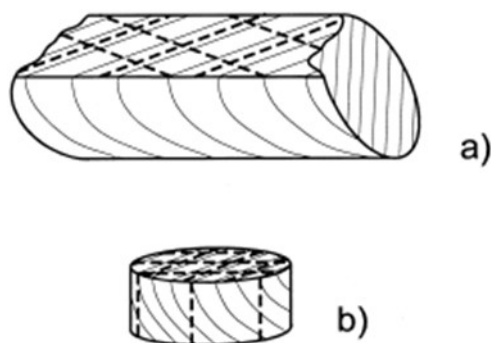
#### 4.1.5 Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning, (Popov et al. 1999)

Článek srovnává tři základní způsoby měření tepelných vlastností hornin. Jednak do té doby běžně používané způsoby založené na principu „dělené tyče“ a zahřívání pomocí přiloženého zdroje tepla a také v té době nové bezkontaktní metody pomocí optického skenování. Tato práce byla do rešerše zařazena, protože seznamuje čtenáře s nejhodnější metodou pro

stanovení tepelných vlastností hornin a také proto, že tato metoda bude využita v rámci řešeného projektu. Metoda optického skenování má několik zásadních výhod. Tím, že je metoda bezkontaktní, odpadá problém spojený s tepelným odporem v místě kontaktu čidla a horniny u kontaktních metod. Další zásadní výhodou je možnost měření větších horninových vzorků a získat tak reprezentativní hodnoty tepelných vlastností, což v případě kontaktních metod, kdy je měření omezeno velikostí čidla, bývá často problematické. Princip metody je zobrazen na Obr. 60 a spočívá v bezkontaktním ohřívání horninových vzorků zdrojem daného výkonu a následným snímáním teplotní odezvy pomocí infračervených teploměrů. Spolu s horninovými vzorky jsou zároveň proměřeny standardy o známé tepelné vodivosti a difuzivitě a následně jsou spočítány parametry zájmových vzorků. Metoda umožňuje stanovení míry anizotropie, protože vzorky mohou být proměřeny v různých směrech v závislosti na sklonu ploch foliace (Obr. 61)



Obr. 60 Princip měření tepelných vlastností metodou optického skenování; 1 – standard o známé tepelné vodivosti, 2 – vzorky, 3 – tepelný zdroj, 4 – bezkontaktní teploměry



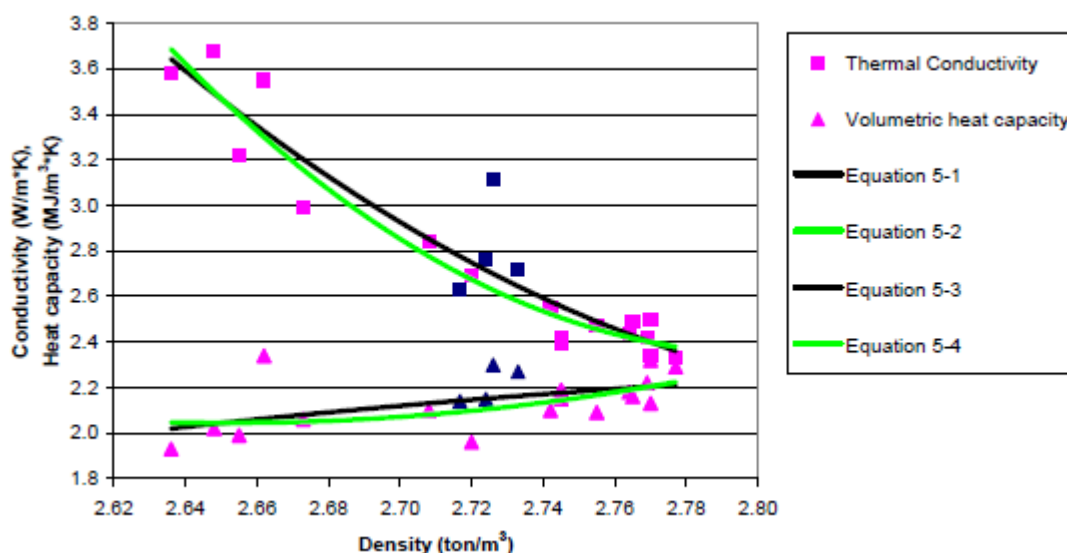
Obr. 61 Příprava vzorku anizotropní horniny pro měření metodou optického skenování

#### 4.1.6 Thermal properties at Äspö HRL (Sunberg 2003)

Jedná se o zprávu komplexně řešící tepelné vlastnosti hornin v horninové podzemní laboratoři ve švédském Äspö. Tato práce je zajímavá díky provázanosti a aplikaci nejrozličnějších postupů získávání informací o tepelných vlastnostech různých druhů krystalických hornin. Analýze byly

podrobeny různé druhy granitu, dioritu a také patrně nějaký druh vyvřelé jemnozrné horniny (greenstone). Tepelné vodivosti byly změřeny laboratorně a následně porovnávány s vypočtenými hodnotami na základě jejich minerálního složení. Zde došlo k dobré shodě s chybou většinou menší než 10 %. Dále byla studována závislost tepelných vlastností na hustotě horninových vzorků. Na Obr. 62 je zobrazena závislost tepelné vodivosti a kapacity na hustotě 21 laboratorně zpracovaných vzorků a také křivky spočítané polynomiální regresí, přičemž maximální odchylka je menší než 20 %. Rovnice 5.1 (odkaz v legendě v rámci citované práce Sunberg 2003) pak byla aplikována na data získaná hustotní karotáží ve vrtu a byl spočítán profil tepelné vodivosti podél vrtu. Dále je v práci diskutován rozměr měřených vzorků ve vztahu k horninovému masivu a z toho plynoucí nejistoty při popisu teplotního pole v okolí kontejnerů vyhořelého paliva.

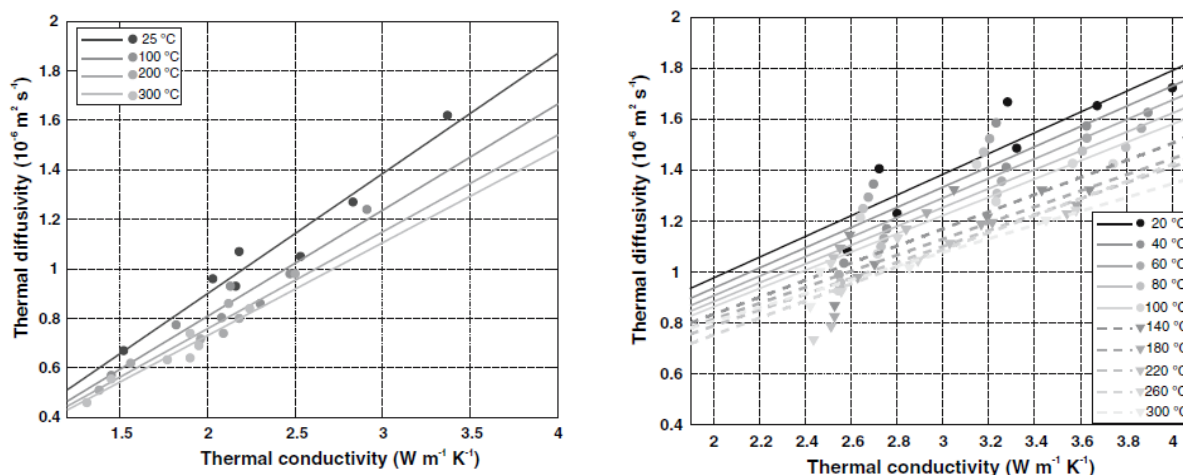
Je třeba poznamenat, že se v této práci analyzovaly izotropní dobře vyříděné horniny, což umožnilo dobrou korelaci hodnot tepelných vlastností s hodnotami zjištěnými výpočtem z mineralogického složení, či hustotní analýzy.



Obr. 62 Vztah mezi hustotou horninových vzorků a jejich tepelnými vlastnostmi

#### 4.1.7 Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks (Mottaghy et al. 2007)

Tato práce prohlubuje znalosti o změně závislosti mezi tepelnou difuzivitou a tepelnou vodivostí s rostoucí teplotou až do  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Ve studii jsou zpracovány dva soubory vzorků jednak z nehlubšího pevninského vrtu na poloostrově Kola a pak vzorky hornin z východních Alp (projekt Transalp). Jednalo se o různé magmatické a metamorfované horniny. V laboratoři byly na vzorcích změřeny tepelné vlastnosti (vodivost, difuzivita a tepelná kapacita) za různých teplot až do  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Na Obr. 63 jsou dva grafy závislosti poměru tepelné vodivosti a difuzivity na teplotě pro dvě zkoumané sady vzorků. Je zřejmé, že vztah těchto veličin ovlivňuje jednak pokles tepelné vodivosti a zároveň nárůst tepelné kapacity vzorků, přičemž síla tohoto efektu záleží na minerálním složení horniny. V článku byly dále odvozeny empirické vzorce pro výpočet změny tepelných vlastností v závislosti na teplotě pro obě sady vzorků a také vzorce pro výpočet tepelné difuzivity v závislosti na tepelné vodivosti a teplotě.

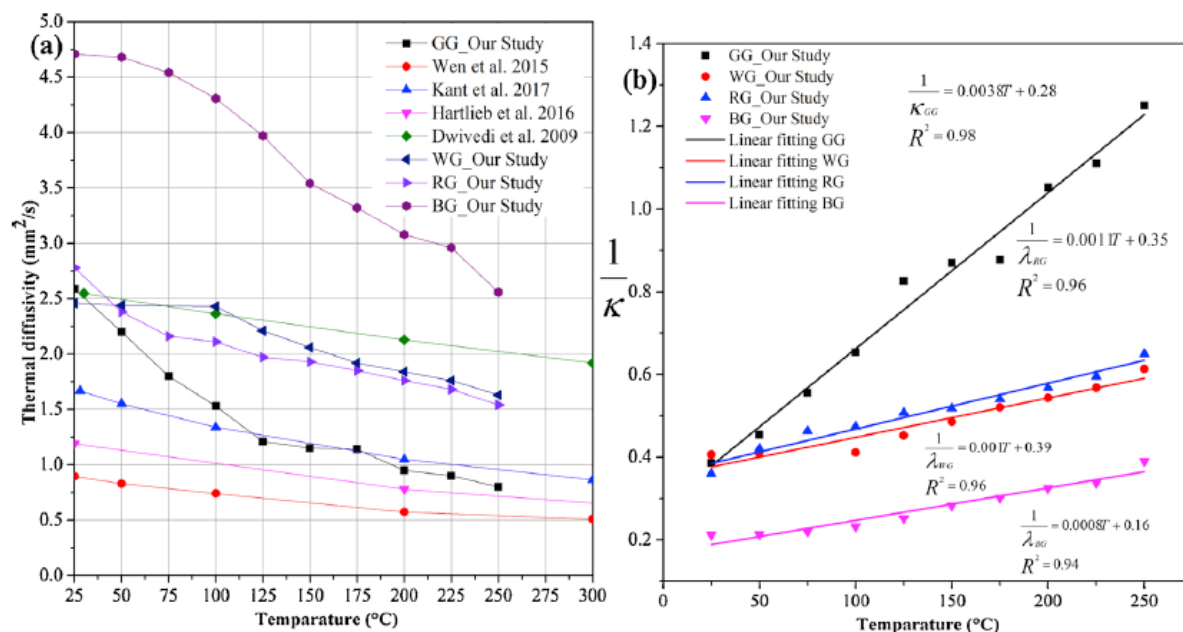


Obr. 63 Teplotní závislost poměru tepelné vodivosti a tepelné difuzivity pro dvě sady vzorků (vlevo Transalp, vpravo Kola)

#### 4.1.8 Experimental investigations on the thermal properties of Jalore granitic rocks for nuclear waste repository (Gautam et al. 2019)

Poměrně komplexní vyhodnocení tepelných vlastností granitu z potenciálního místa pro budoucí uložení jaderného odpadu v Indii. Měření bylo provedeno přístrojem Hot Disk, který měří kontaktně pomocí tenkých plošných čidel. Na rozdíl od dalších kontaktních metod, kdy jsou využívána bodová, či liniová čidla, je zde potlačen vliv nehomogenit daných například různou velikostí zrn jednotlivých minerálů zastoupených v hornině. Přístroj umožňuje ve spojení s vysokoteplotní pecí měření za různých teplot. Kromě měření metodou optického skenování, bude měření přístrojem Hot Disk provedeno v rámci řešeného projektu v dole Rožná.

Termo-fyzikální stabilita granitu byla laboratorně studována v rozmezí teplot 25 až 250°C. Kromě standardních parametrů jako jsou tepelná vodivost, difuzivita, či tepelná kapacita byly řešeny některé další petroofyzikální parametry, jako hustota, minerální složení, tepelná roztažnost, vznik trhlin v závislosti na teplotě atd. Na Obr. 64 jsou grafy zobrazující závislost tepelné difuzivity na teplotě. Data naměřená na vzorcích v rámci studie jsou porovnávána s předešlými pracemi.



Obr. 64 Závislost tepelné difuzivity na teplotě

## 4.2 Souhrnné vyhodnocení problematiky

Znalost tepelných vlastností hornin je zásadním a základním stavebním kamenem pro správný popis teplotního pole horninového masivu a nutným vstupem pro jeho matematické modelování. V kapitole jsme se snažili postihnout všechna důležitá témata, jako je anizotropie tepelných vlastností hornin a její vliv na teplotní pole pod zemským povrchem, vliv směru a výplně puklin v hornině, nebo vztah tepelných vlastností k dalším fyzikálním a petrofyzikálním vlastnostem, jako jsou teplota, tlak, hustota, nebo porozita.

## 4.3 Důsledky pro řešení projektu

Důlní dílo Rožná se nachází v oblasti kde je podloží tvořeno silně metamorfovanými a zvrásněnými horninami. Lze proto předpokládat, že horniny zastižené vrty budou z hlediska tepelných vlastností silně anizotropní. Díky zvrásnění horniny však bude problematické, resp. nemožné určit hlavní směry tenzoru tepelné vodivosti pro důlní dílo jako celek. Tepelné vlastnosti horniny budou změřeny v laboratoři GFÚ jak metodou optického skenování, tak orientačně také kontaktní metodou Hot Disk.



## 5 Teploty horninových masivů krystalinika ČR

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, závisí teplotní gradient v daném místě na hustotě tepelného toku a tepelné vodivosti horniny. Hustota tepelného toku může být ovlivněna tloušťkou litosféry, a hlavně pak přítomností radioaktivních izotopů uranu, thoria a draslíku v horninách. Teplotní gradient v nejsvrchnější vrstvě zemské kůry pak ovlivňují další jevy, jako je reliéf terénu, proudění podzemní vody, nebo klimatické změny. Protože se proudění podzemní vody uplatňuje hlavně v kolektorech sedimentárních hornin, nebude tomuto jevu v této rešerši věnována pozornost.

### 5.1 Přehled zdrojů

Přesnou informaci o teplotním gradientu v hornině můžeme získat pouze přímým měřením teploty ve vrtu – teplotní karotáží. V místech, kde žádné vrty nejsou, můžeme teplotní gradient predikovat na základě odhadu hustoty tepelného toku a tepelné vodivosti horniny, což je vždy zatíženo značnou chybou. Bohužel na území České republiky bylo realizováno poměrně málo vrtů hlubších nežli 500 m a navíc nejsou tyto vrty rozmístěny rovnoměrně, ale jejich umístění souvisí většinou s ložiskovým průzkumem. Velké množství vrtů pak prochází pouze sedimentárními horninami, a proto nepřináší přímou informaci o teplotním gradientu v krystalických horninách. Je proto zřejmé, že informace o teplotách v horninových masivech jsou velmi omezené.

Je tedy zřejmé, že vzhledem k absenci vrtů hraje důležitou roli nepřímý odhad teploty v dané hloubce pod zemským povrchem. Proto jsou v této části rešerše zmíněny publikace, které se tomuto tématu věnují a jsou indexovány v databázi Web of Science. Dále jsou zde zmíněny publikace, které se věnují různým fenoménům, které mají zásadní vliv na teplotní gradient a také mapy teplot, které byly v minulosti publikovány jak v zahraničních, tak domácích sbornících.

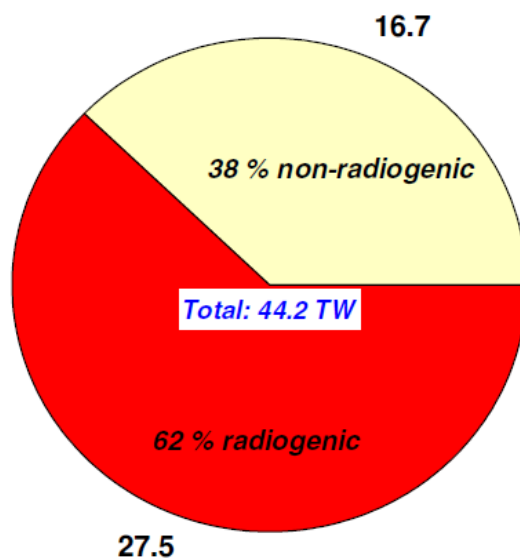
### 5.2 Rozbor jednotlivých prací

#### 5.2.1 Heat Transport Processes in the Earth's Crust (Clauser 2009)

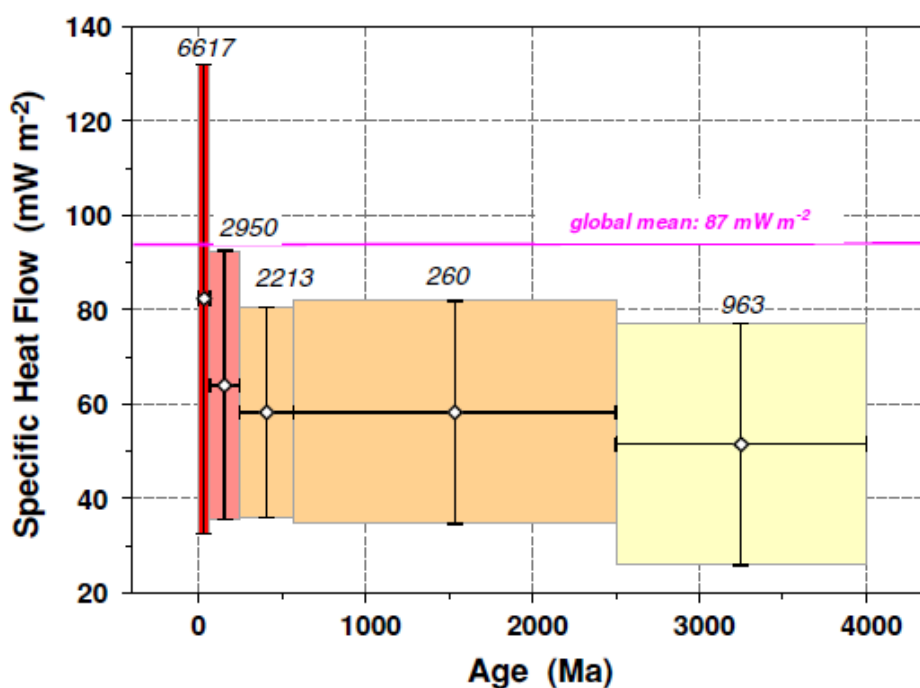
Článek formou „review“ přehledně shrnuje problematiku přenosu tepla v zemské kůře. Dále vybíráme informace, které mají zásadní vliv na teplotní gradient v horninovém masivu. Z Obr. 65 vyplývá, že zásadním zdrojem tepla v zemské kůře jsou radioaktivní izotopy uranu, draslíku a thoria. V hornině obsahující radioaktivní izotopy je díky jejich rozpadu produkováno teplo – tepelná produkce  $A$  ( $\mu\text{Wm}^{-3}$ ). Tepelnou produkci v hornině lze spočítat z koncentrací jednotlivých izotopů dle následujícího empirického vzorce

$$A (\mu\text{Wm}^{-3}) = 10^{-5} \rho (9,52C_U + 2,56C_{Th} + 3,48C_K) \quad (17)$$

kde  $\rho$  je hustota a  $C$  jsou koncentrace izotopů uranu a thoria v ppm a draslíku v %. Tento vztah je velice důležitý, protože jak vyplývá z Fourierova zákona a rovnice vedení tepla uvedených v kapitole 4.1.1, čím vyšší tepelná produkce v hornině, tím vyšší je hustota tepelného toku a tím je větší teplotní gradient. Kromě rozpadu radioaktivních izotopů má na velikost hustoty tepelného toku také tloušťka /stáří zemské kůry. To je zřejmé z Obr. 66, kde je znázorněna závislost hodnoty hustoty tepelného toku na stáří zemské kůry.



Obr. 65 Zdroje tepla v Zemi

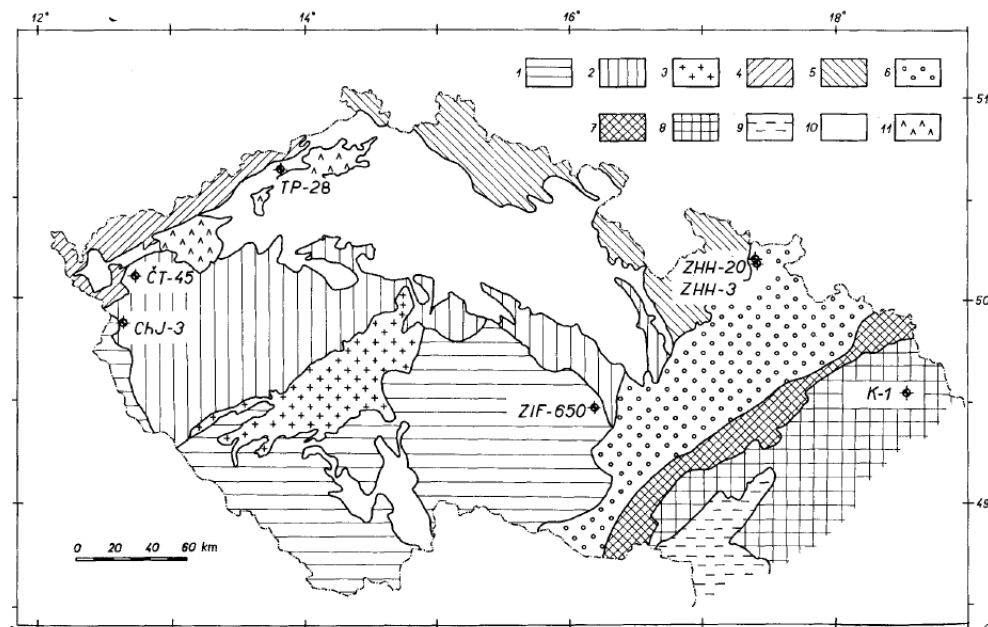


Obr. 66 Hodnoty hustoty tepelného toku v závislosti na stáří kontinentální zemské kůry

### 5.2.2 Radioactivity and heat production data from several boreholes in the Bohemian Massif (Krešl et al. 1978)

V tomto článku byly podrobeny analýze horninové vzorky ze sedmi vrtů vyvrtaných převážně v krystalických horninách Českého masivu (rozmístění viz Obr. 67). Předmětem výzkumu bylo pomocí laboratorního gama-spektrometru určit koncentrace radioaktivních izotopů uranu draslíku a thoria a následně spočítat na základě vztahu uvedeného v podkapitole 5.2.1

tepelnou produkci jednotlivých vzorků hornin. Nejvyšší hodnoty tepelné produkce 4,2 a ž 4,4  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  byly zjištěny v severozápadní části českého masivu, což dobře koresponduje s vyššími hodnotami tepelného toku v této oblasti, a naopak nízké hodnoty v rozmezí 1,1 – 1,7  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  korespondují s regiony, kde dle mapy nižší hodnota hustoty tepelného toku. Jedním ze zkoumaných vrtů byl také vrt ZIF-650 Dolní Rožínka, který se nacházel na 18. patře dolu Rožná. Zde byla zjištěna velice nízká tepelná produkce horniny, kdy vážený průměr tepelné produkce získané z deseti vzorků činil 1,1  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ .



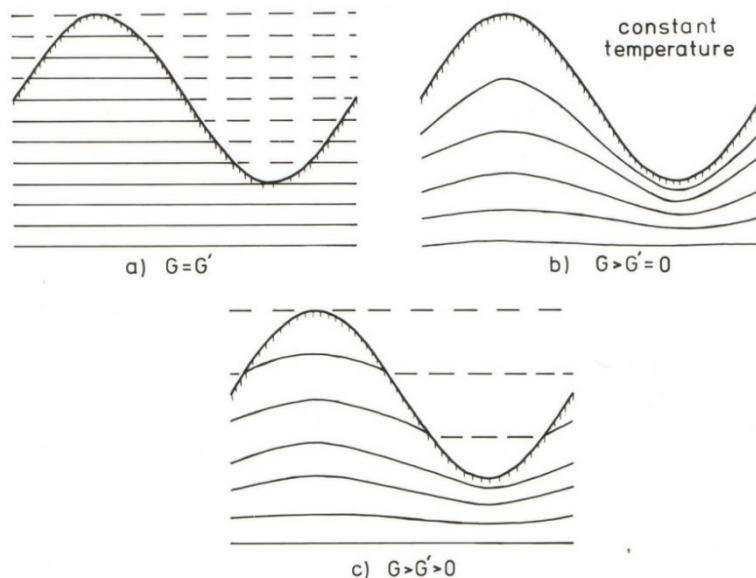
Obr. 67 Umístění měřených vrtů. 1 – Moldanubický krystalický komplex, 2 – Teplá-Barrandien, 3 – Středočeský pluton, 4 – Krušnohorské krystalinikum, 5 – Lugikum, 6 – Moravosilesikum, 7 – Karpatská předhlubeň, 8 – Karpatské pre-neogenní jednotky, 9 – Neogenní deprese, 10 – Křídové a terciární pánve, 11 – terciární vulkanity

### 5.2.3 Vliv topografie na podpovrchové teplotní pole

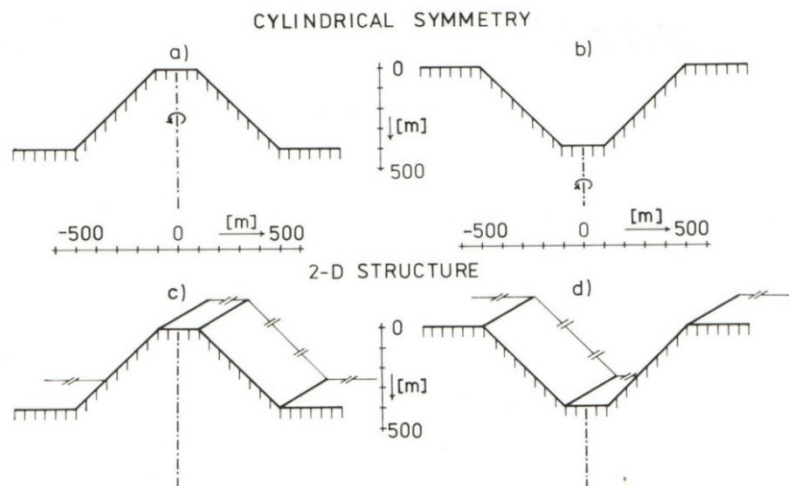
Jedním z faktorů zásadně ovlivňujících rozložení teploty pod povrchem Země je členitost terénu. V této kapitole jsou prezentovány závěry dvou prací Dr. Šafandy z Geofyzikálního ústavu AV ČR, a to **Some remarks on the estimation of geothermal topocorrections** (Šafanda 1987) a **Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field** (Šafanda 1999), které se tomuto tématu do hloubky věnují.

V závislosti na výškové amplitudě může vliv terénu na teplotu a teplotní gradient v Zemi zasahovat do hloubky desítek, stovek a v případě velehor i tisíců metrů. Důvodem je rozdíl mezi výškovým gradientem teploty zemského povrchu (vzduchu) a gradientem teploty v zemské kůře. Situace je schematicky zachycena na Obr. 68. Z Obr. 68 je patrné, že v typickém případě, zachyceném na Obr. 68 (c), kdy gradient teploty ve vzduchu je menší než gradient v zemi, jsou pod vrcholem kopce izočáry teploty naředené, gradient teploty v zemi je snížený, a naopak, pod údolím jsou nahuštěné, gradient je zvýšený. Ve stejných geologických podmínkách přibývá ve vrtu v údolí teplota s hloubkou rychleji než ve vrtu na rovině. Ve vrtu na kopci je tomu naopak.

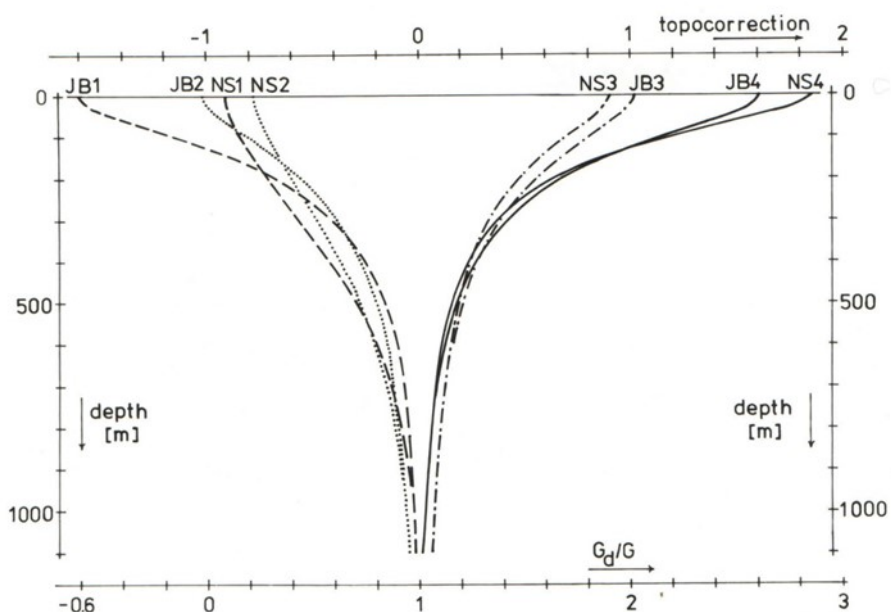
V Obr. 69 jsou představeny tvary terénu, pro které bylo spočteno porušení teplotního gradientu ve „vrtech“ umístěných vždy ve středu struktury. Jedná se o válcově symetrický kopec (a) a prohlubeň (b) a o dvourozměrný hřeben (c) a údolí (d). Výška/hloubka útvarů je 400 m a šířka temene/dna údolí je 200 m, sklon svahu 45°. Byl uvažován nulový gradient teploty ve vzduchu, což znamená maximální možné porušení pro daný typ povrchu.



Obr. 68 Schematická ilustrace vlivu topografie na rozložení teploty ve svrchních částech zemské kůry.  $G$  = neporušený teplotní gradient v kůře;  $G'$  = teplotní gradient zemského povrchu (vzduchu); plné čáry představují izotermy v kůře, přerušované čáry izotermy ve vzduchu. a) pro  $G = G'$  nedochází k porušení gradientu v kůře, b) pro  $G > G' = 0$  je teplota zemského povrchu konstantní a porušení gradientu v kůře je největší, c)  $G > G' > 0$  představuje typickou situaci.



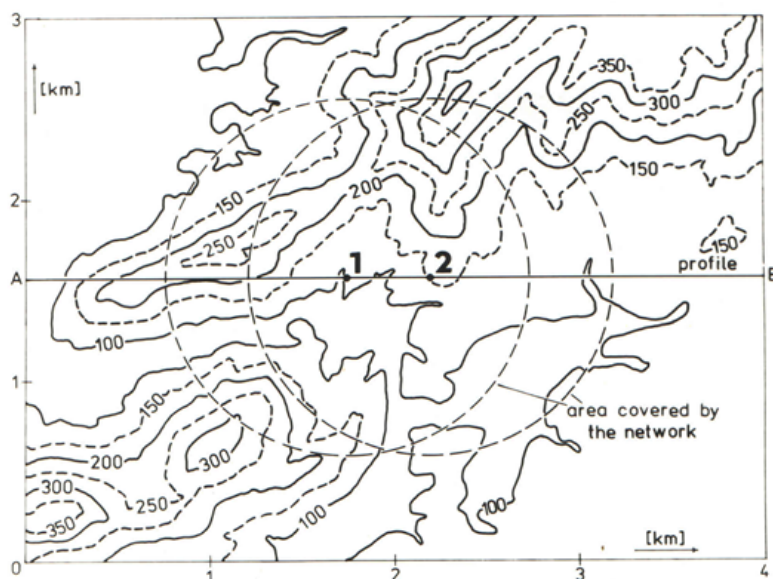
Obr. 69 Tvary terénu, pro které bylo spočtené porušení gradientu. Jednotlivé tvary jsou: kopec (a), prohlubeň (b), hřeben (c) a údolí (d). Srovnatelné rozměry jsou ve všech čtyřech případech stejné. Kopec a prohlubeň vykazují válcovou symetrii, zatímco hřeben a údolí představují 2-D struktury. Porušení gradientu bylo spočteno ve „vrtech“ (-.-.-) umístěných ve středu každé struktury.



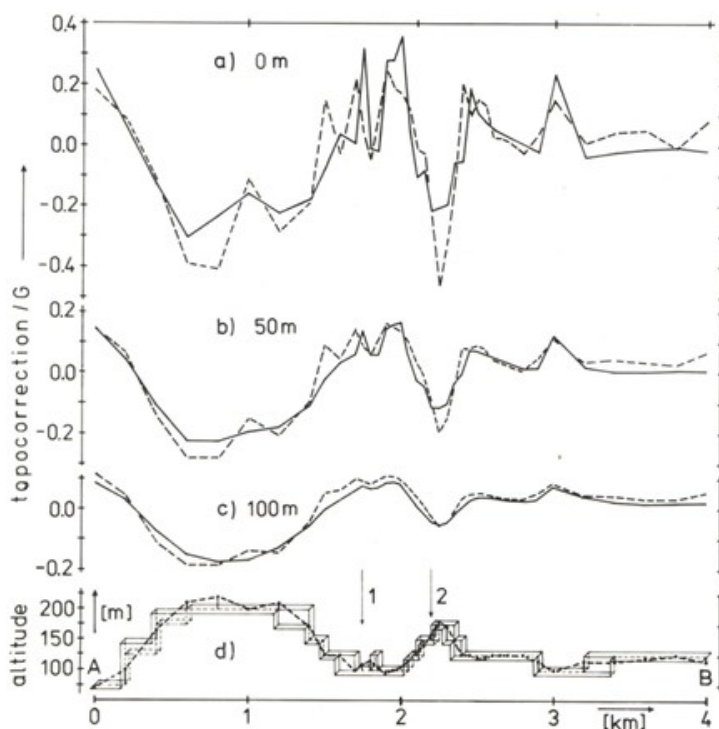
Obr. 70 Průběh porušení gradientu s hloubkou v hypotetických vrtech znázorněných na obr. 2 pro různé metody výpočtu porušení. Nejbližše skutečnosti jsou křivky označené jako NS, které byly spočteny řešením rovnice vedení tepla v geotermických modelech s příslušným tvarem terénu. Indexy 1, 2, 3 a 4 označují kopec (1), hřeben (2), údolí (3) a prohlubeň (4).

Jak je zřejmé z Obr. 70, největší porušení gradientu je u povrchu a s hloubkou klesá. Z dvojic kopec-hřeben a prohlubeň-údolí vykazují větší porušení válcově symetrické struktury, tedy kopec a prohlubeň, kde je podpovrchové teplotní pole ovlivňováno terénem ze všech stran. U elevací (kopec, hřeben) je gradient snížen v hloubce 100 m o 75 % (pod hřebenem) – 85 % (pod kopcem) a v hloubce v 500 m o 30 % v porovnání s rovinným terénem. Pod depresemi (prohlubeň, údolí) je gradient zvýšen ve 100 m o 70 % (pod údolím) – 120 % (pod prohlubní) a v 500 m o 20 %.

Jako příklad z praxe může posloužit výpočet topokorekcí ve dvou vrtech na Kubě (Obr. 71 a Obr. 72). Z nich je patrné, že v tomto případě je ovlivnění podpovrchového gradientu mírnější než ve výše uvažovaných hypotetických příkladech. Je to proto, že jednak výškové změny terénu jsou zde menší a jednak byl uvažován nenulový gradient teploty vzduchu (6 K/km). V intervalu hloubek 50 – 100 m je pod největší elevací povrchu gradient snížen o zhruba 20% a pod údolím zvýšen o 15 %-20 %.



Obr. 71 Topografie a rozměry oblasti použité při testování 3-D metody. Hodnoty vrstevnic jsou v metrech. Topokorekce podél profilu AB a ve dvou na něm ležících vrtech (1, 2) jsou vyneseny v Obrázek 28.



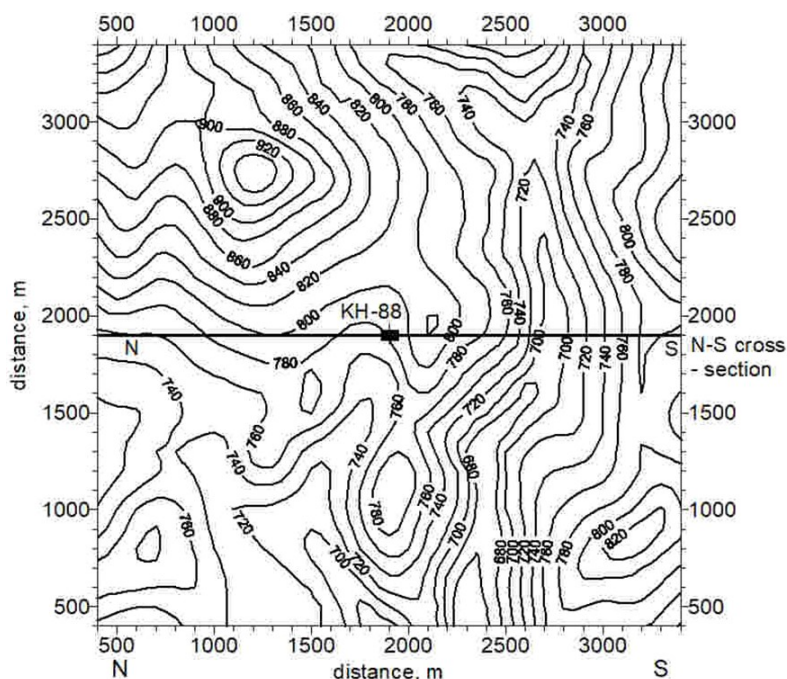
Obr. 72 Topokorekce podél profilu AB (viz Obrázek 27) spočtené řešením rovnice vedení tepla v příslušných modelech terénu (plná čára) a standardně používanou přibližnou metodou (čárkovaně) v hloubkách 0 m (a), 50 m (b) a 100 m (c). Topokorekce jsou vyděleny neporušeným teplotním gradientem. Nadmořská výška povrchu podél profilu AB a dva pruhy jeho stupňovité aproximace přiléhající k tomuto profilu jsou znázorněny v d). Polohy vrtů 1, 2 jsou znázorněny šipkami.

Průměrnou roční teplotu zemského povrchu, která představuje okrajovou podmínku pro rozložení teploty v Zemi, neovlivňuje jen teplota vzduchu, ale i přímé prohřívání povrchu



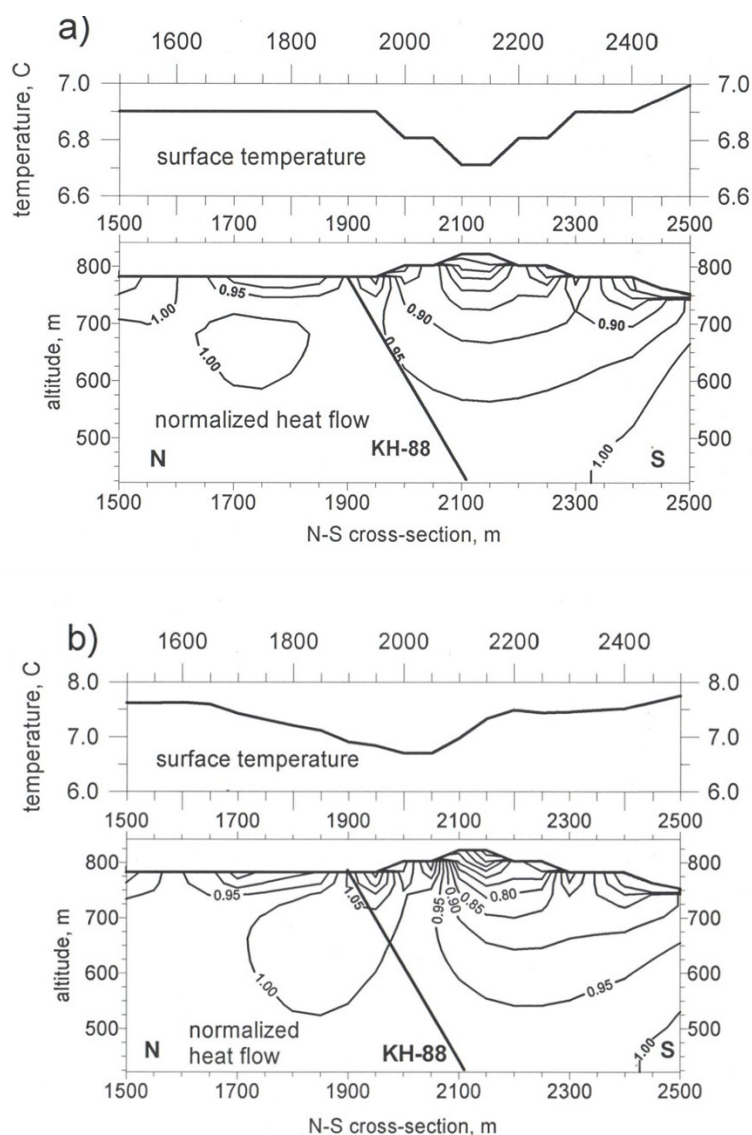
slunečním zářením. To je závislé zejména na sklonu a orientaci terénu a na vegetačním krytu. V zeměpisných šířkách střední Evropy jsou jižní svahy teplejší než rovinný povrch a severní studenější. Kolem 50° s.š. dopadá v ročním průměru nejvíce slunečního záření na jižní svah se sklonem kolem 40°. V horských oblastech ČR dosahuje rozdíl v průměrné roční teplotě mezi jižním svahem se sklonem 20° – 40° a severním svahem se stejným sklonem 1,5 – 2 K.

Vliv expozice povrchu ke slunečnímu záření byl spolu se závislostí na nadmořské výšce uvážen při výpočtu a interpretaci tepelného toku v šikmém, 400 m hlubokém vrtu Kašperské Hory KH-88. Z vrstevnicové mapy okolí vrtu (Obr. 73) je zřejmé, že výškové rozdíly terénu tam dosahují prvních stovek metrů. V Obr. 74 je zachycen vertikální tepelný tok podél svislého řezu sever-jih normovaný tokem na spodním okraji modelu v hloubce 3 km. Tok byl spočten řešením rovnice vedení tepla v 3-D modelu s povrchovou teplotou závislou jen na nadmořské výšce (gradient 4,7 K/km) (Obr. 74a) nebo na nadmořské výšce a na sklonu a orientaci povrchu (Obr. 74b). Je zřejmé, že posledně zmíněná verze vede k většímu ovlivnění vertikálního toku než verze uvažující pouze závislost na nadmořské výšce. Nejvýraznější rozdíly se objevují v horních 100 m mezi metráži modelu 1900–2200 m, kde profil překračuje hřeben orientovaný ve směru V–Z. Verze v Obr. 74 (b) vykazuje asi 15% nárůst toku na severním úpatí tohoto hřebene a asi 20% pokles na jeho temeni ve srovnání s modelem uvažujícím pouze závislost na nadmořské výšce.



Obr. 73 Topografie v okolí vrtu Kašperské Hory KH-88





Obr. 74 Povrchová teplota a hustota vertikálního tepelného toku normovaná bazálním tokem v hloubce 3 km podél profilu sever-jih procházejícího vrtem KH-88. Průměrná roční teplota povrchu závisí (a) pouze na nadmořské výšce; b) na nadmořské výšce a sklonu a orientaci svahu.

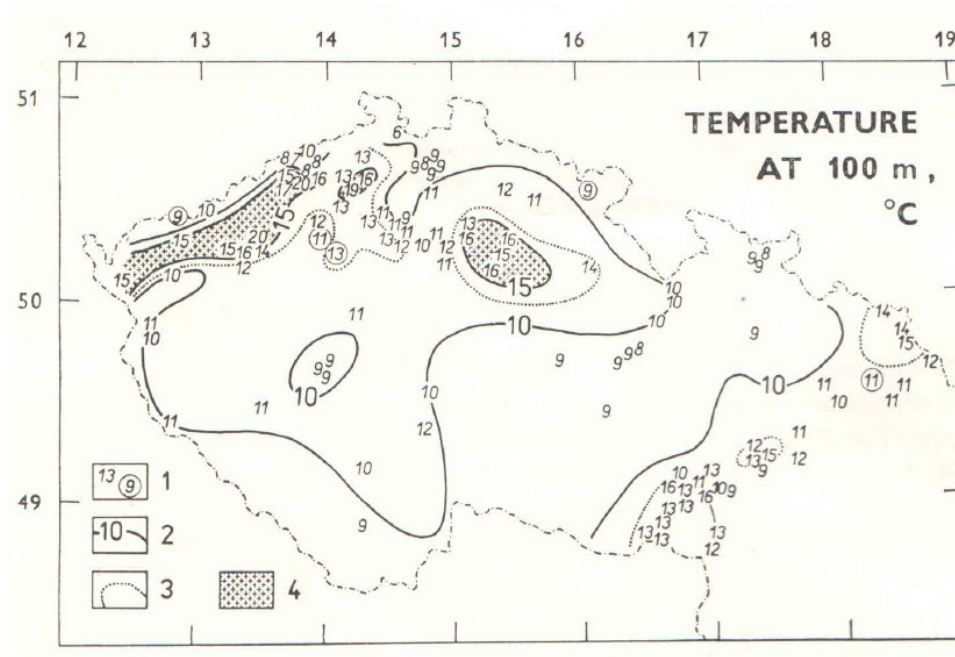
## 5.2.4 Subsurface temperature field of the Bohemian Massif (Kubík 1990)

V této práci byla zpracována teplotní měření ze 190 vrtů a na tomto základě zkonstruována mapa teplot v hloubce 100 m pod terénem a mapy teplotního gradientu v různých hloubkách pod zemským povrchem na území Českého masivu. V úvahu byly také vzaty hydrogeologické, geomorfologické, strukturně geologické a mikroklimatické vlivy na teplotní pole pod zemským povrchem.

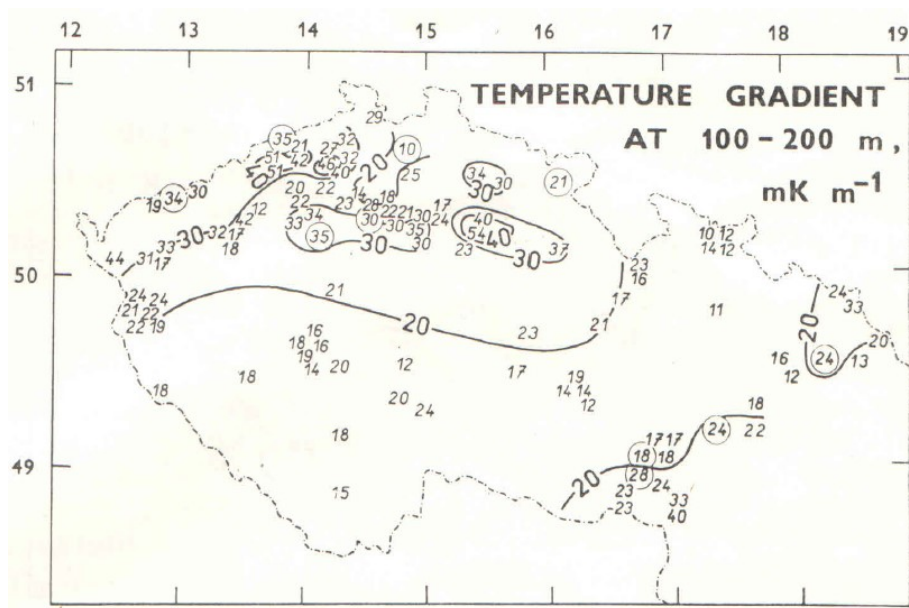
Jedním z velice důležitých výstupů článku je odvození empirického vzorce pro výpočet povrchové teploty vzduchu na základě nadmořské výšky a severní šířky na území České republiky. Vzorec má tvar

$$T_0 = 10,6 - 4,7 \times 10^{-3}h - 0,33(\varphi - 50^\circ) \quad (18)$$

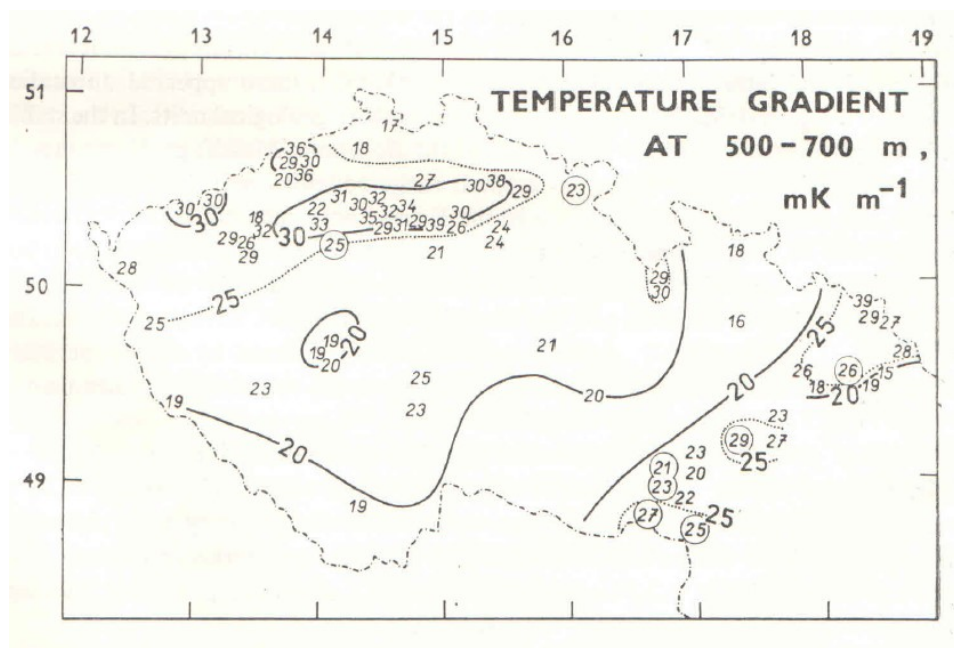
kde  $T_0$  je teplota vzduchu na povrchu,  $h$  je nadmožská výška a  $\varphi$  je zeměpisná šířka ve stupních. Tento vztah nachází uplatnění coby okrajová podmínka při řešení numerických modelů teplotního pole pod zemským povrchem. Tento vztah také posloužil při konstrukci mapy teplot v hloubce 100 m (Obr. 75, která tedy zohledňuje pokles teploty vzduchu na povrchu se vzrůstající nadmožskou výškou, nicméně nezohledňuje vliv topografie na teplotní gradient v přívěrchové vrstvě zemské kůry. V článku jsou dále prezentovány mapy teplotního gradientu na území České republiky v hloubkách 0 – 100 m, 100 – 200 m (Obr. 76), 500 – 700 m (Obr. 77) a 700 – 1000 m pod zemským povrchem.



Obr. 75 Mapa izoterm v hloubce 100 m pod terénem na území českého masivu



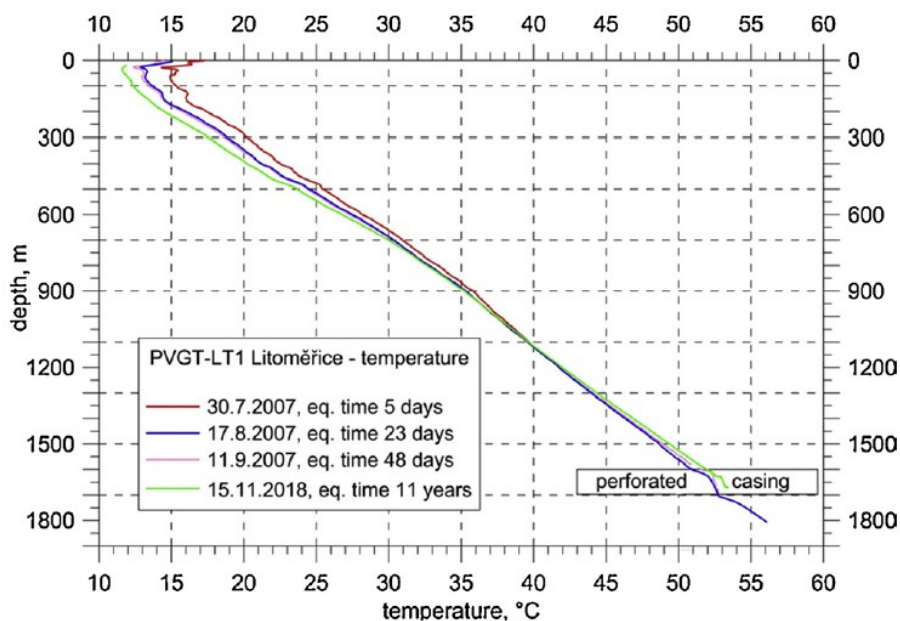
Obr. 76 Mapa teplotního gradientu v hloubce 100 až 200 m na území českého masivu



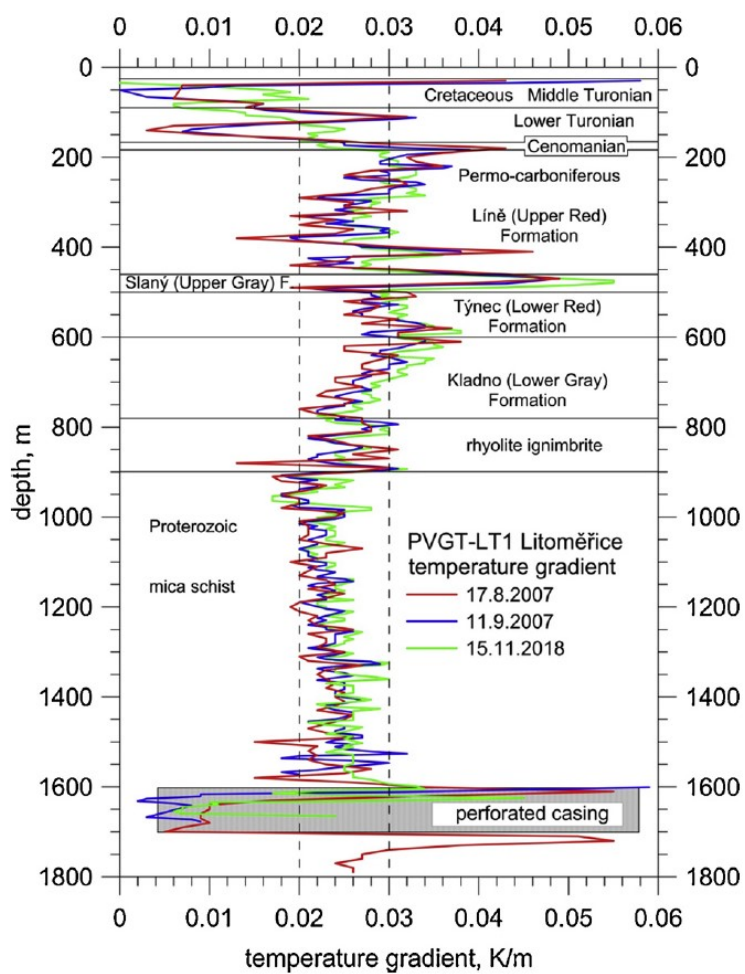
Obr. 77 Mapa teplotního gradientu v hloubce 500 až 700 m na území českého masivu

### 5.2.5 Geology and geothermal potential in the eastern flank of Eger Rift (Litoměřice area, Czech Republic), (Šafanda a kol., 2020)

Tato práce shrnuje výsledky výzkumu původně 2,1 km hlubokého geotermálního vrtu PVGT-LT vyvrtaného v roce 2007 v Litoměřicích. Vrt krátce po dovtření zhavaroval a jeho současná hloubka je kolem 1700 m. Jedná se tak o jediný vrt hlubší než 1000 m vyvrtaný v krystalických horninách v posledních desítkách let na území Českého masivu. Do hloubky 780 m byly ve vrtu zastíženy sedimentární horniny (křída, permokarbon), v rozmezí 780 – 900 m křemenný porfyr a poté následují poměrně homogenní granátické svory. Teplota naměřená v hloubce 1800 m činí 57,5 °C (Obr. 78) a spočtený tepelná tok 78 mW/m<sup>2</sup>. Na Obr. 79 je spočítán teplotní gradient na základě opakovaných teplotních karotáží vrtu. Zde je patrný rozdíl v jednotlivých horninových partiích a také poměrně klidný průběh gradientu v krystaliniku, kde se hodnota pohybuje přibližně mezi 20 – 25 °C/km. Na Obr. 80 jsou pak znázorněny variantní teplotní prognózy do hloubky 7 km pro různé druhy hornin. Při jejich výpočtu byly zohledněny všechny vlivy popsané v předchozích kapitolách, jako je tepelná produkce hornin, teplotní závislost tepelných vlastností, resp. různá tepelná vodivost hornin.

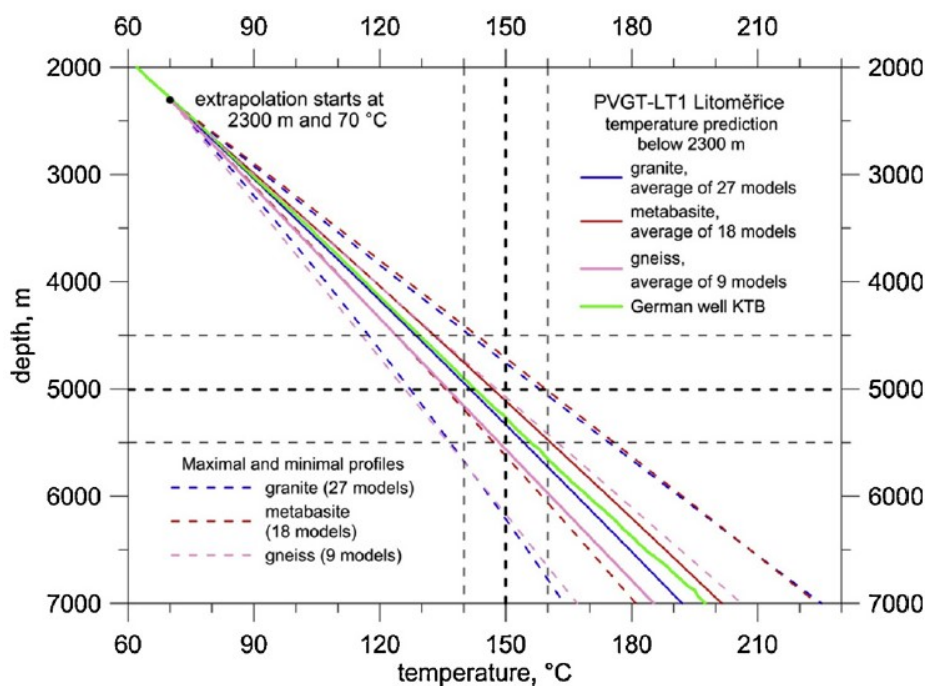


Obr. 78 Opakované teplotní karotáže ve vrtu PVGT-LT1



Obr. 79 Teplotní gradient ve vrtu PVGT-LT1



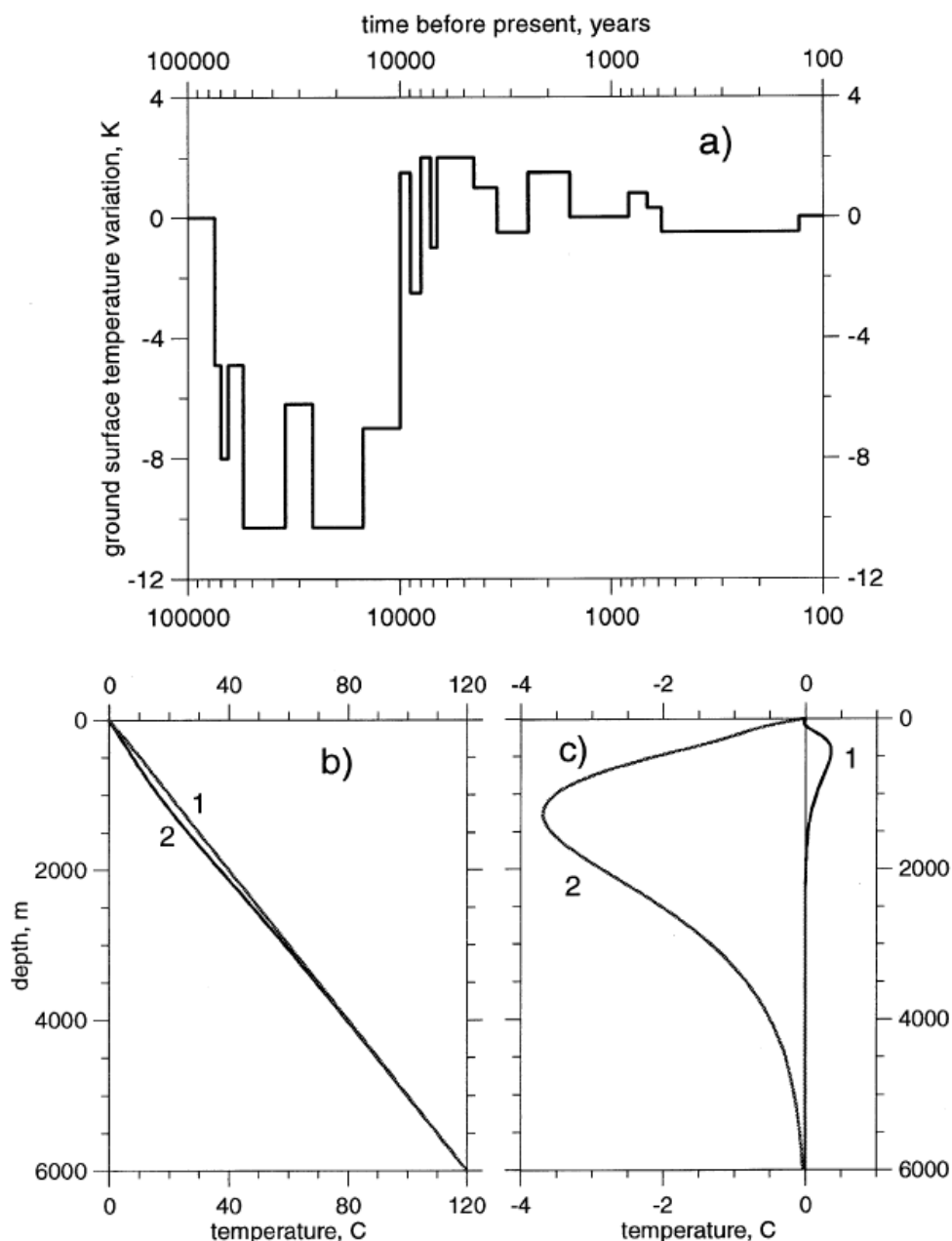


Obr. 80 Teplotní prognózy do hloubky 7 km v oblasti vrtu PVGT-LT1

## 5.2.6 Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia (Šafanda a Rajver 2001)

Práce, která se zabývá z hlediska teplotního gradientu důležitým fenoménem, a to je vliv dlouhodobých klimatických změn na teplotní pole pod zemským povrchem. Každá teplotní změna na povrchu proniká pod zemský povrch, přičemž hloubka průniku záleží na amplitudě změny a délce jejího trvání. V hloubkách stovek metrů až jednotek kilometrů tak můžeme na teplotních záznamech pozorovat vliv minulé doby ledové. V tomto článku právě inverzí teplotních křivek autoři matematicky modelují zpětně teplotní změny na povrchu.

Z hlediska vývoje teplotního pole je důležitý Obr. 81. Zde se jedná o přímou úlohu modelování vlivu změny klimatu na zemském povrchu (doba ledová) na teplotní pole pod zemským povrchem. Z Obr. 81c je zřejmé, že v hloubce 500 m (přibližná hloubka budoucího HÚ) může být teplota o zhruba 2 °C nižší díky porušení teplotního pole vlivem posledního zalednění. Proto než se teplotní pole dostane do rovnovážného stavu, teplota v této hloubce poroste.



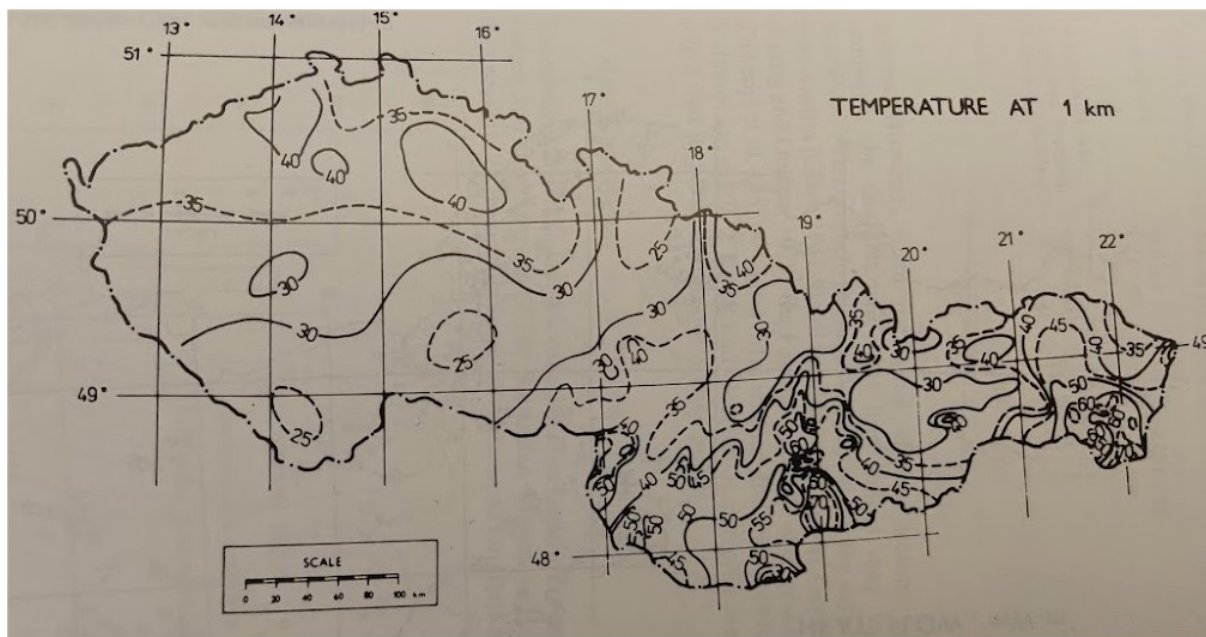
Obr. 81 (a) Klimatická historie během pozdního pleistocénu a holocénu použitá jako okrajová podmínka pro modelování odezvy pod zemským povrchem, (b) teplotní profily počítané jako odezva na změny klimatu v holocénu (1) a během posledního 100 tisíce let (2) při teplotním gradientu  $20 \text{ mK m}^{-1}$ , (c) nestacionární složka teplotních profilů

### 5.2.7 Dříve publikované mapy teplot pod zemským povrchem

Pracovníci Geofyzikálního ústavu AV ČR se mapováním teplotního pole pod zemským povrchem zabývají od 60. let minulého století. Většinou byly zpracovávány mapy hustoty tepelného toku, v některých publikacích se však objevily i mapy teplot v různých hloubkách pod zemským povrchem. Tyto mapy jsou založeny na datech z velmi omezeného počtu vrtů a mohou se tak shodovat. V této kapitole tak budou zmíněny pouze některé z nich.

### 5.2.7.1 Terrestrial heat flow and the lithosphere structure (Čermák a Rybach 1991)

Kniha je souborem článků účastníků mezinárodní konference konané v roce 1987 a jedním z nich je příspěvek kolektivu autorů kolem Dr. Čermáka. Práce s názvem Heat Flow, Regional Geophysics and Lithosphere Structure in Czechoslovakia and Adjacent Part of Central Europe přináší výsledky zpracování 208 teplotních měření ve vrtech na území tehdejšího Československa. Mimo jiné je zde prezentována také mapa teplot v hloubce 1000 m (Obr. 82).

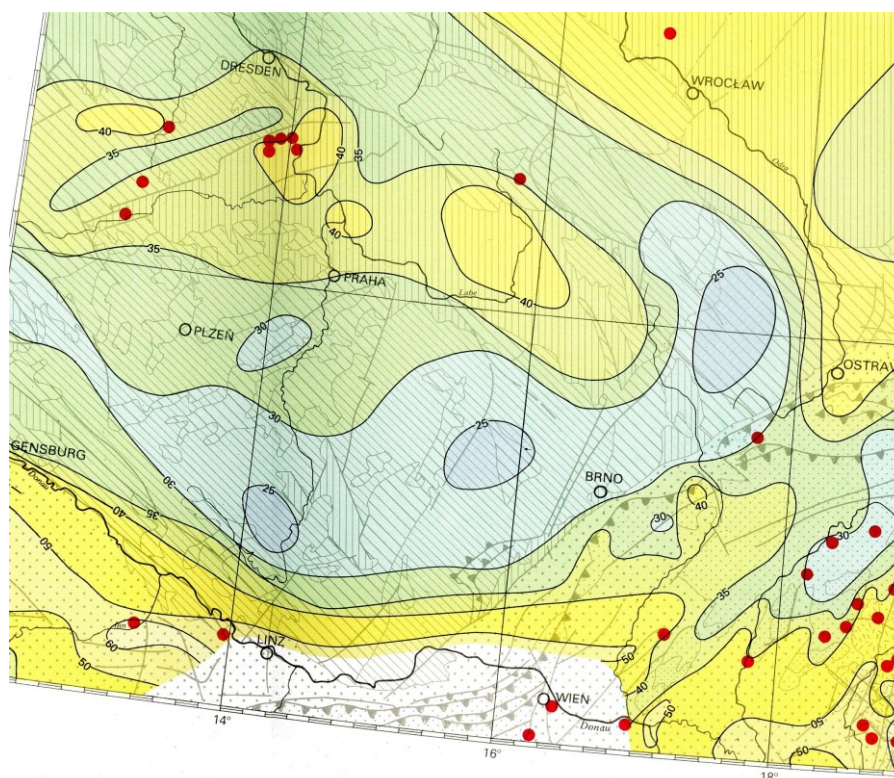


Obr. 82 Mapa teplot v hloubce 1000 m na území tehdejšího Československa

### 5.2.7.2 Geothermal atlas of Europe (Hurtig et al. 1992)

Velmi rozsáhlá publikace, ve které jsou prezentovány velkoformátové skládané mapy teplot v různých hloubkových úrovních v rámci celé Evropy. Na Obr. 83 je výřez mapy teplot v hloubce 1000 m, která byla zpracovaná v měřítku 1:2 500 000.

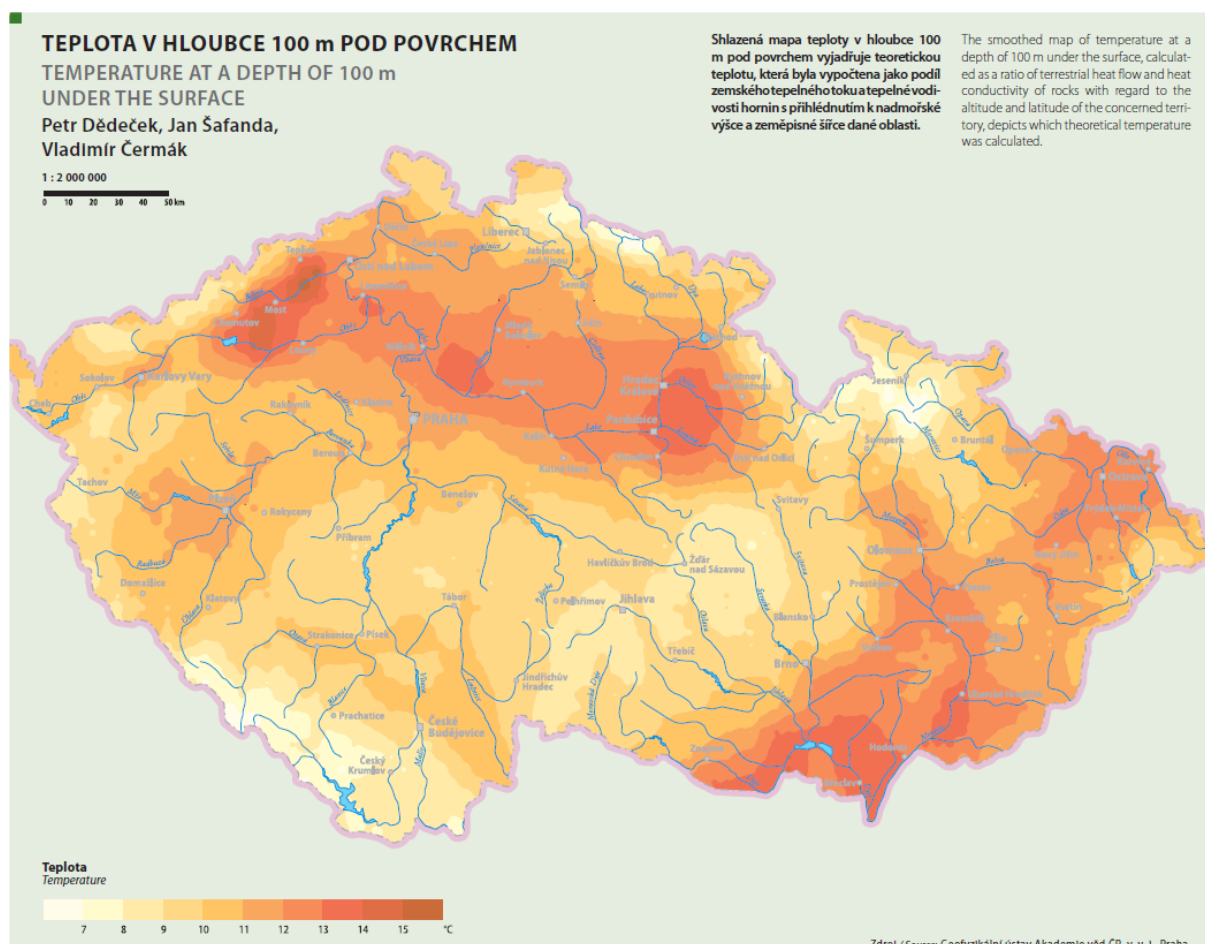




Obr. 83 Výřez mapy teplot v hloubce 1000 m (Geotermální atlas Evropy)

### 5.2.8 Atlas krajiny České republiky (2009)

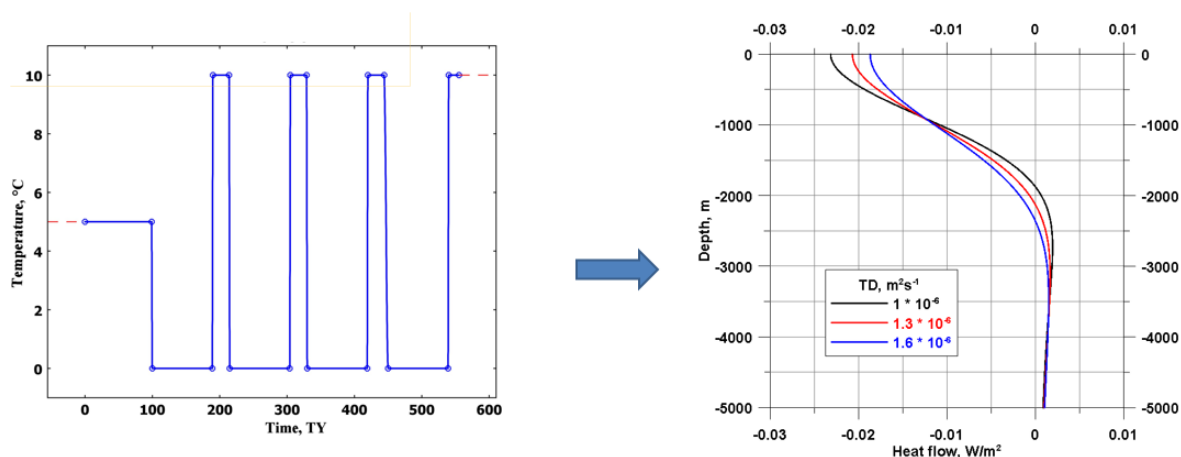
Velmi rozsáhlá publikace zahrnující mapy z různých oblastí souvisejících s krajinou ČR. Součástí je také mapa teplot v hloubce 100 m v měřítku 1:2 000 000 zpracovaná kolektivem autorů kolem Dr. Dědečka (viz. Obr. 84). Mapa zohledňuje pokles povrchové teploty s nadmořskou výškou a také je to první publikovaná mapa teplot ČR, jež zohledňuje změny tepelné vodivosti hornin. Mapa ale nezohledňuje vliv reliéfu terénu.



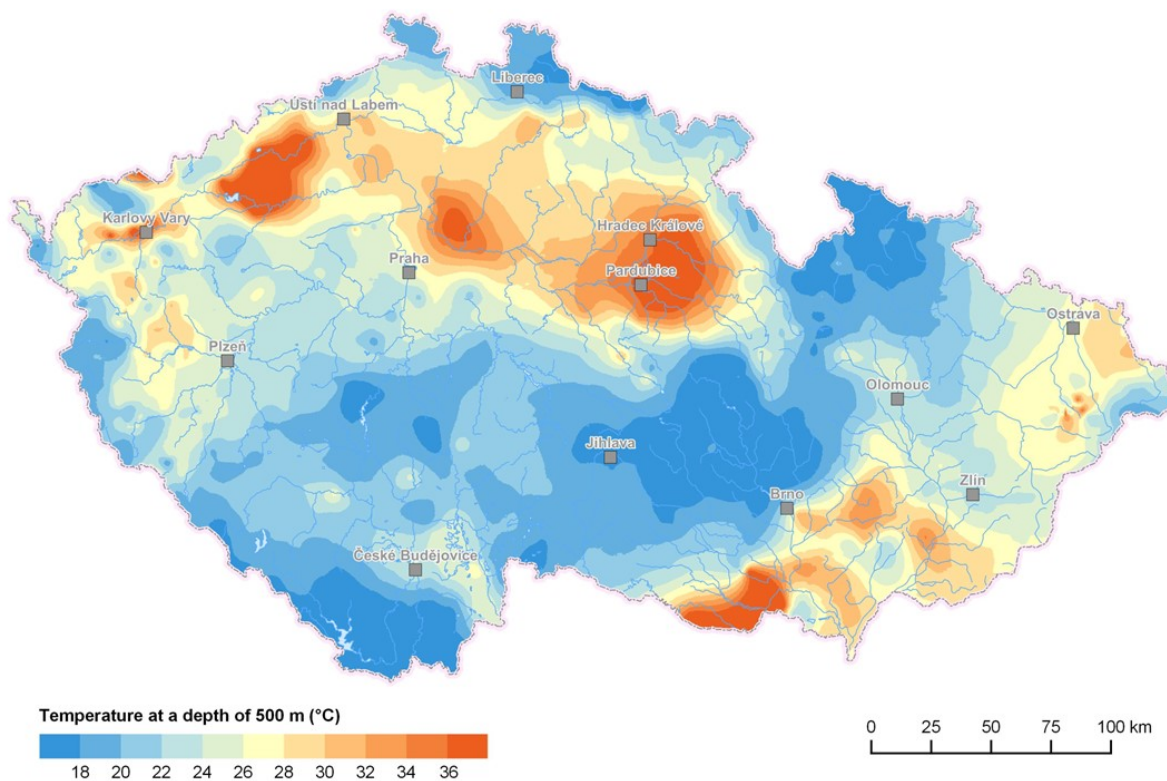
Obr. 84 Mapa teplot v hloubce 100 m v měřítku 1 : 2 000 000 (Atlas krajiny České republiky)

### 5.2.9 Heat flow map of the Czech Republic (Dědeček a kol. 2018)

V této práci se autoři zohledňují střídání glaciálních cyklů s cílem provést opravy teplotních gradientů naměřených ve vrtech a zkonstruovat mapu hustoty tepelného toku opravenou na klimatické změny. Jak bylo zmíněno v kapitole 5.2.6, střídání glaciálních cyklů má vliv na teplotní pole pod zemským povrchem. Na Obr. 85 je model odezvy hustoty tepelného toku na střídání glaciálních cyklů v posledních 550 tisících letech pro různé hodnoty tepelné difuzivity. Pomocí tohoto modelu byly opraveny teplotní gradienty 190 teplotních karotáží a sestavena mapa hustoty tepelného toku a následně mapy teplot v různých hloubkách pod zemským povrchem, které zohledňují změny tepelné vodivosti hornin. Jedna z těchto map je na Obr. 86. Jedná se o mapu teplot v hloubce 500 m, přičemž díky opravě na klimatické změny se jedná o ustálené teplotní pole. Teplota v mapě je tak teplotou maximální, které by bylo dosaženo po odeznění vlivu glaciálních cyklů.



Obr. 85 Nestacionární složka hustoty tepelného toku jako odezva střídání glaciálních cyklů pro různé hodnoty tepelné difuzivity



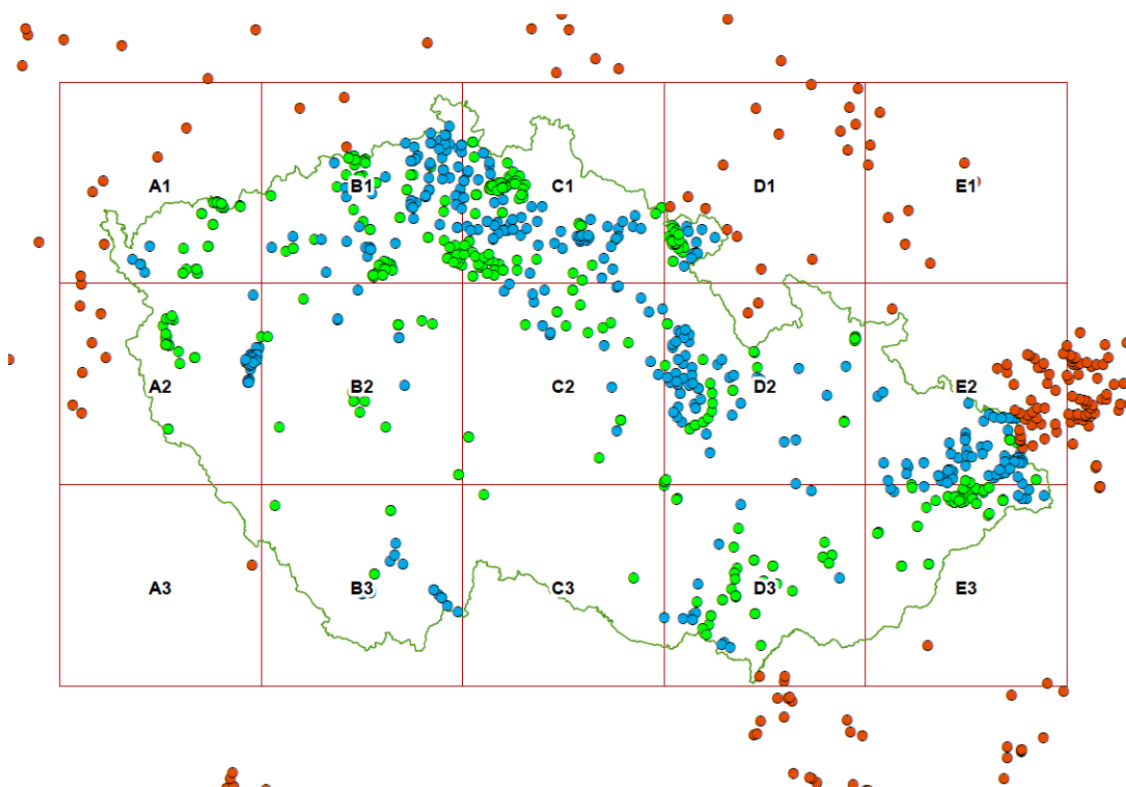
Obr. 86 Mapa teplot v hloubce 500 m po provedení korekce na glaciální cykly

### 5.3 Souhrnné vyhodnocení problematiky

Pro co nejlepší znalost teplotního pole krystalinika českého masivu je třeba znát co nejlépe hustotu tepelného toku v daném místě. Při znalosti tepelné vodivosti horniny, její tepelné produkci a dalších vlivech jako je zejména vliv reliéfu terénu, lze poměrně spolehlivě predikovat teplotu, resp teplotní gradient pod zemským povrchem. Problémem však je velice malý počet použitelných teplotních záznamů z vrtů. Všechny mapy citované v této kapitole jsou založeny na cca 190 vrtech na území České republiky, přičemž velký počet vrtů je

poměrně mělkých (řádově 1. stovky metrů) a často pouze v sedimentárních horninách, což značně komplikuje jejich interpretaci. V úvahu je třeba brát také vliv minulých klimatických změn na teplotní pole pod zemským povrchem. Významný je také vliv vegetace. Rozdíl v průměrné roční teplotě půdy mezi loukou a (smrkovým) lesem je podle pozorování Geofyzikálního ústavu +1.2 K v Krušných horách (podle teplotních karotáží ve vrtech) a +0.9 K v Jizerských horách (podle dlouhodobého monitoringu půdních teplot).

V červnu 2022 končí víceletý projekt TAČR s názvem Analýza potenciálu geotermální energie ve středních a velkých hloubkách na území ČR na základě disponibilních údajů, jehož spoluřešiteli jsou Česká geologická služba a GFÚ. Projekt má za cíl vyhledání všech dostupných archivních teplotních karotáží v databázích Geofondu a zpřesnění mapy tepelného toku ČR a vytvoření map teplot v různých hloubkových úrovních do 5000 m. Na Obr. 87 jsou vyznačeny dostupné použitelné teplotní karotáže na území ČR. Zeleně jsou znázorněna data z databáze GFÚ a zeleně pak nová získaná v rámci projektu z databází ČGS. Je patrné, že data jsou v rámci ČR rozmístěna značně nerovnoměrně, což souvisí s důvody vrtných prací v daných lokalitách. Nicméně se i přes to podařilo získat nová cenná data a vyhotovit zpřesněné mapy teplot. Jejich finální podoby bude prezentována během května 2022.



Obr. 87 Přehled dostupných použitelných teplotních karotáží na území ČR (zeleně databáze GFÚ, modře ČGS a červeně data z okolních států dostupná na <http://ihfc-iugg.org/>)

## 5.4 Důsledky pro řešení projektu

Získané informace umožní zpracovat komplexní model teplotního pole horninového masivu v okolí důlního díla. Jak bylo uvedeno v kapitole 5.2.2 jsou k dispozici informace o tepelné produkci hornin zastižených vrtem v 18. patře důlního díla. Dále má řešitel k dispozici dosud nepublikovaná data z teplotní karotáže výše zmíněného vrtu. Zhodnocen bude také vliv reliéfu terénu a ctřídání glaciálních cyklů na teplotní pole.



## 6 Vývoj teplot v okolí důlních děl

### 6.1 Přehled zdrojů

Primárním zdrojem byl *Web of science*.

Vyhledávané řetězce byly různými kombinacemi níže uvedených klíčových slov:

- (deep) mine + (virgin rock) temperature + cooling,
- radial + axial + temperature + field + rock.

Při rešerši bylo zhodnoceno několik desítek publikací. V přehledu jsou uvedeny pouze vybrané publikace, které pokrývají různé typy úloh/modelů a jejichž obsah má alespoň částečnou relevanci k našemu projektu (Tab. 4). Z množin publikací se shodným tématem či podobným obsahem s nižší relevancí (např. modelování konkrétního ventilačního systému) jsou pak vybrány jedna či dvě typické publikace.

Problematika šíření tepla v podzemí a jejího modelování zahrnuje obrovskou škálu možných úloh, která svou velikostí přesahuje rámec této rešerše. Jedná se například o oblast využití geotermální energie, výzkum litosféry a procesů v ní probíhajících apod. Nicméně fyzikální procesy a jejich matematické formulace jsou vždy podobné.

Pozn.: Převažují publikace čínských autorů. Čína je jednak největším světovým producentem černého uhlí, dále pak při mohutné výstavbě dopravního spojení do Tibetu musí řešit např. problematiku zamrzání dlouhých tunelů ve vysokohorském prostředí. Obé poskytuje náměty ke konkrétním projektům a použití matematického modelování (v neposlední řadě je zřejmě k dispozici též dostatek financí), a publikace jsou tudíž aktuální a zahrnují současnou úroveň znalostí.

Hodnocení publikací je provedeno formou krátkého textového shrnutí, popř. obrázkem či schématem tak, aby výsledný rozsah nepřekročil jednu stranu textu. Další doplňující obrázky nad rámec jedné strany jsou pak umístěny do Přílohy, stejně tak fyzikální a matematické vzorce a přehled veličin či parametrů. Z toho důvodu nejsou k převzatým vzorcům vkládaným formou obrázků v textu nebo popisku vysvětlovány všechny parametry a implicitně je čtenář odkázán na původní citovaný zdroj.

Tab. 4 Přehled zpracovaných publikací se základními charakteristikami (CI označuje počet citací).

reference	CI	měření	model	num. řešení
Temperature Prediction Model in the Main Ventilation System of an Underground Mine (Bascompta 2020)	4	in-situ	1D, lineární aproximace	neuveдено
Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel (Liu 2019)	17	in-situ	analytický + 2D	analytický; FLAC3D
Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine (Sasmito 2015)	52	ne	3D numerický	Ansys Fluent
Study on the Radial and Axial Temperature Fields of Coal Roadway under Seasonal Fluctuation Boundary (Song 2019)	1	ne	1D axisym.	neuveдено
Effects of seasonal air temperature variation on airflow and surrounding rock temperature of mines (Yi 2019)	8	in-situ	statistické vyhodnocení	---
Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation (Zhang 2017)	17	experiment	analytický	---
A robust numerical method for modeling ventilation through long tunnels in high temperature regions based on 1D pipe model (Zhao 2021)	4	experiment (převzatý), in-situ (vstupní parametry)	1D + 3D numerický	COMSOL
Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures (Zhou 2021)	12	in-situ (vstupní parametry)	1D + 1D axisym.	neuveдено
Study of the Influence of Ventilation Pipeline Setting on Cooling Effects in High-Temperature Mines (Zhou 2019)	4	ne	3D numerický	Ansys Fluent
Using seasonal temperature difference in underground surrounding rocks to cooling ventilation airflow: A conceptual model and simulation study (Zhu 2020)	7	in-situ	2D, pseudo 3D numerický	Abaqus
An Underground Air-Route Temperature Prediction Model for Ultra-Deep Coal Mines (Zhu 2015)	11	ne	1D analytický	Microsoft Excel

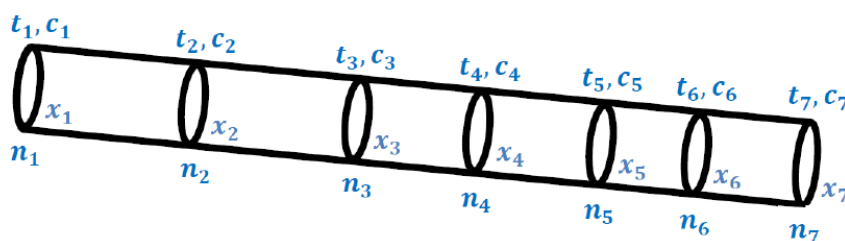
## 6.2 Vyhodnocení zdrojů

### 6.2.1 Temperature Prediction Model in the Main Ventilation System of an Underground Mine (Bascompta 2020)

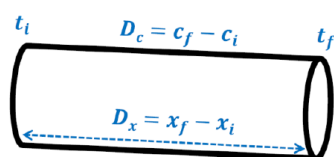
Článek prezentuje „jednoduchý“ přístup lineární aproximace teplot v důlním díle (hlubinný důl na potaš), zkalibrované na základě měřených dat (teploty, výkon ventilace) v sedmi kontrolních bodech po dobu 3,5 roku (schéma modelované části štoly je znázorněno na Obr. 88 a Obr. 89). Proud vzduchu štolou byl uvažován jako ustálený.

Byly uvažovány dva lineární modely (s neznámými parametry  $a_i$ ) pro predikci výstupní teploty  $t_f$  z daného úseku štoly (rovnice na Obr. 90). Z naměřených hodnot byly použity denní mediány. Po kalibraci byla shoda vypočtených hodnot s naměřenými s relativní chybou do 10% (korelace  $R^2 = 0.933$ , absolutní chyba  $\pm 2$  °C). Ukázka výsledků je na Obr. 103 a Obr. 104 v Příloze.

Model vychází z předpokladu, že výsledná teplota je dána součtem teploty vstupní a příspěvků jednotlivých zdrojů tepla v dole (viz Navarro 2008 nebo Zhu 2015), kdy rozhodujícím členem je přenos tepla ze stěn štoly (lineárně závislý na délce úseku štoly či kapacity ventilace). Nutnost kalibrování na konkrétní případovou studii (zároveň jsou nutná dlouhodobá data z měření) je vyvážen jednoduchostí modelu.



Obr. 88 Část štoly se sedmi kontrolními body ( $t_i$ ,  $c_i$ ,  $x_i$  jsou po řadě teplota, objem proudění, souřadnice pro  $i$ -tý kontrolní bod).



Obr. 89 Schéma jednotlivého úseku štoly ( $t_i$  je vstupní teplota,  $t_f$  výstupní).

$$t_f = a_0 + a_1 t_i + a_2 D_x + a_3 D_c,$$

$$t_f = a_0 + a_1 t_i + a_2 D_x + a_3 D_c + a_4 t_i D_x + a_5 t_i D_c + a_6 D_x D_c,$$

Obr. 90 4-parametrový (nahore), 7-parametrový (dole) model.



## 6.2.2 Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel (Liu 2019)

Článek se věnuje výpočtu radiálního teplotního pole v betonovém obložení a masivu, obklopujících vysokohorský silniční tunel v Číně. Cílem výpočtu je optimalizace izolační vrstvy kolem tunelu za účelem snížení rizika promrzání masivu kolem tunelu.

Díky dlouhodobému měření teplot v tunelu in-situ (Obr. 105 v Příloze) bylo možno aproximovat teplot na různých pozicích v tunelu periodickými funkcemi (viz Obr. 92 pro pozici vjezdu do tunelu, pro další pozice viz Obr. 106 v Příloze). Díky tomu pak byl sestaven jeden společný konkrétní analytický předpis (obecný vzorec viz Obr. 91) pro teplotu vzduchu v tunelu v závislosti na čase a délkové souřadnici, který pak plní funkci okrajové podmínky pro úlohu výpočtu radiálního teplotního pole.

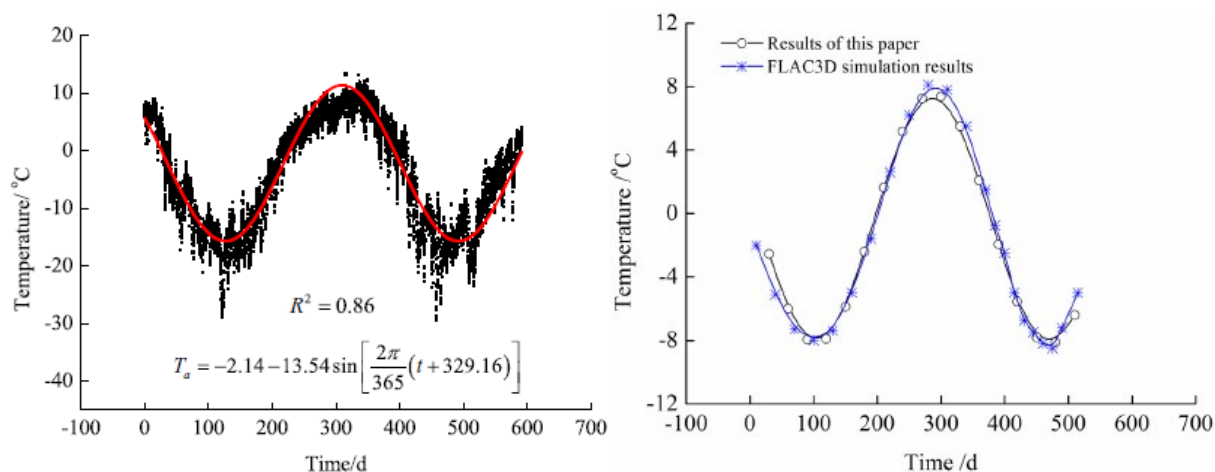
$$T_c = A + B \sin \left[ \frac{2\pi}{365} (t + \varphi) \right]$$

$$T_{cz} = A_1 + A_2 e^{A_3 z} + (B_1 + B_2 e^{B_3 z}) \sin(\omega t + \varphi), \quad (A_3 < 0 \text{ and } B_3 < 0)$$

Obr. 91 Nahoře: periodická funkce, popisující teplotu v tunelu na konkrétní pozici. Dole: obecný funkční předpis pro teplotu uvnitř tunelu v závislosti na čase  $t$  a délkové souřadnici  $z$ .

Model radiálního teplotního pole je víceméně standardní, s předpoklady shodnými např. se (Song 2019). Úloha je řešena analyticky za pomoci kombinace Laplaceovy transformace pro časovou proměnnou a Fourierovy transformace pro délkovou proměnnou, k verifikaci výsledků je pak použit komerční software FLAC3D. Kromě citlivostní analýzy modelu na parametr tloušťky izolační vrstvy (který není pro naše účely relevantní) byl prokázán malý vliv koeficientu přestupu tepla (stěna tunelu – vzduch) na výsledné teploty.

Pozn.: Autor nazývá model trojrozměrný, přesnější by bylo 2D axisymetrický (stupni volnosti jsou délka  $z$  a radiální pozice  $r$ ).



Obr. 92 Vlevo: roční průběh teploty vzduchu na vjezdu do tunelu. Vpravo: průběh teploty na pozici  $z = 10$  m (0,5 m hluboko od stěny tunelu); srovnání numerických řešení.

### 6.2.3 Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine (Sasmito 2015)

Článek se zabývá modelováním řízení teplot v hlubinném dole a vlivu vstupních parametrů ventilace či okrajových podmínek na výsledné teploty. Jako zdroj tepla zahrnuje též razicí stroj. Model vychází ze zjednodušené trojrozměrné geometrie (části) štoly, vybavené ventilačním potrubím (Obr. 93 vlevo).

Matematická formulace zahrnuje rovnice zachování hmoty, momentu a energie (rovnice 1-3 na Obr. 107 v Příloze) v kombinaci s konstitutivními vztahy (rovnice 4-8 na Obr. 108 v Příloze). Popis veličin je uveden v tabulce Tab. 5 v Příloze. Turbulentní kinetická energie  $k$  závisí na použitém turbulentním modelu. V článku byl použit tzv. k-epsilon model (rovnice 9-10 na Obr. 109 v Příloze).

Modely byly validovány proti měřením. Charakter testovacích úloh byl volen s cílem optimalizace návrhu ventilace. Byly spočteny úlohy s různými konfiguracemi umístění ventilace.

Zajímavým zdrojem informací pro naše účely jsou komplexnost a charakter použitých okrajových podmínek modelu (použité číselné hodnoty nejsou z tohoto úhlu pohledu podstatné):

- konstantní teplota na povrchu rozrážky = prvotní teplota horniny,
- konstantní rychlost vzduchu vtláčeného ventilačním potrubím,
- konstantní teplota vtláčeného vzduchu,
- předepsaný tlak na výstupu z rozrážky = atmosférický tlak,
- nulový gradient teploty na výstupu z rozrážky,
- předepsaný tepelný tok hranicí těžebního stroje.

Numerická implementace byla provedena v programu Ansys Fluent (specializovaný výpočetní software pro dynamiku tekutin). Podrobnosti viz článek.

Případové studie zkoumaly kromě rozložení teplot ve slepé štole (Obr. 93 vpravo) také citlivost řešení na změnu okrajových podmínek (teplota okolní horniny, výkon ventilace, teplota vzduchu ve ventilaci apod.).

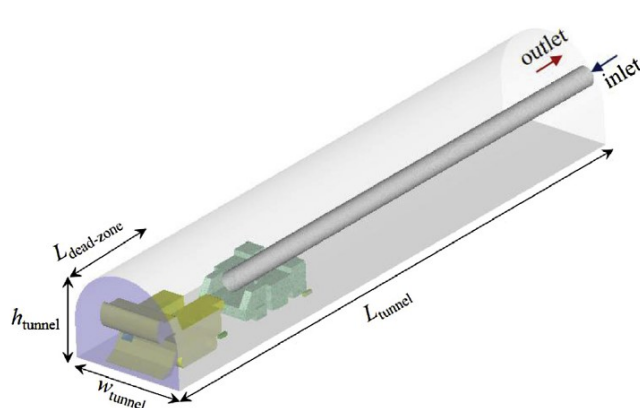


Fig. 1. Computational domain of underground mine cul-de-sac.

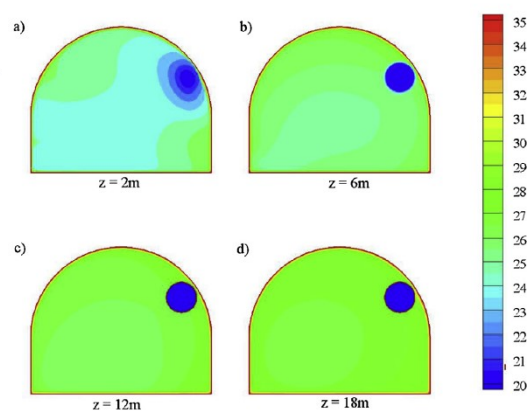


Fig. 2. Local temperature distribution ( $^{\circ}\text{C}$ ) at the underground tunnel for (a)  $z = 2\text{ m}$ ; (b)  $z = 6\text{ m}$ ; (c)  $z = 12\text{ m}$  and (d)  $z = 18\text{ m}$  from the mining face.

Obr. 93 Vlevo – geometrie modelované oblasti. Vpravo – ukázka výsledků (vertikální řezy štolou v různé vzdálenosti od čelby).

## 6.2.4 Study on the Radial and Axial Temperature Fields of Coal Roadway under Seasonal Fluctuation Boundary (Song 2019)

Článek prezentuje zjednodušenou metodu výpočtu radiálního a podélného teplotního pole v horninovém masivu v okolí štoly (každého zvlášť). Periodickou okrajovou podmínkou pro teplotu ventilace se snaží postihnout sezónní fluktuační teplot v masivu.

Model vychází ze zjednodušených předpokladů:

- štola má kruhový průřez a její tepelně ovlivněné okolí má válcový tvar,
- okolní hornina je homogenní, izotropní s konstantní počáteční teplotou v celém objemu,
- vliv vlhkosti vzduchu a tepelný vliv horniny vně tepelně ovlivněného okolí jsou zanedbány,
- proudění vzduchu je laminární a tlak se nemění s teplotou,
- vstupní teplota vzduchu je periodická funkce (viz rovnici (3) na Obr. 110 v Příloze; pro příklad funkce nabitované z reálných dat viz Obr. 92 (Liu 2019)).

Pozn.: Předchozí publikace autora na dané téma (s podrobným odvozením modelu) či jiné práce, na které se při odvození formulace odkazuje, jsou bohužel v čínštině.

### Šíření tepla v radiálním směru

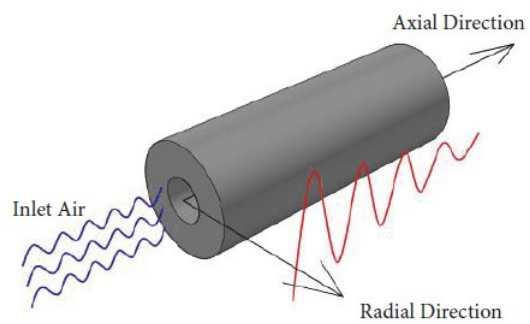
Rovnice vedení tepla v masivu je popsána Fourierovým zákonem v cylindrických souřadnicích (rovnice nahoře na Obr. 110 v Příloze), který se po transformaci veličin a s použitím Biotova a Fourierova čísla pro danou horninu (Obr. 111 v Příloze) převede na úlohu s bezrozměrnou teplotou (Obr. 112 v Příloze). Popis veličin je uveden v tabulce Tab. 6 v Příloze.

Numerický řešič nebyl uveden. Výsledky byly validovány proti experimentálnímu měření na reálném zmenšeném modelu štoly (viz Obr. 114 v Příloze). Výsledky potvrzují obecný předpoklad exponenciálního poklesu ovlivnění (amplitudy) teplot se vzdáleností od štoly (ukázka na Obr. 115 v Příloze).

### Šíření tepla v podélném směru

Rovnice zachování energie (Obr. 113 v Příloze), podobně jako např. v (Zhu 2015), uvažuje množství tepla získaného z masivu přímo úměrné délce úseku štoly. Teplotu povrchu štoly (nezávisle na délkové pozici) pak uvažuje jako periodickou funkci získanou řešením radiální úlohy. Pro konkrétní postup řešení pak odkazujeme na článek.

Shrnutí výsledků: teplotní pole vykazují jak v radiálním, tak v podélném směru očekávaný exponenciální pokles amplitud. Teplotní pole v radiálním směru je nejvíce citlivé na délku cyklu, v podélném směru navíc na relativní délkové pozici ve štole.



Obr. 94 Zjednodušené schéma proudění vzduchu štolou a konfigurace jejího okolí.

## 6.2.5 Effects of seasonal air temperature variation on airflow and surrounding rock temperature of mines (Yi 2019)

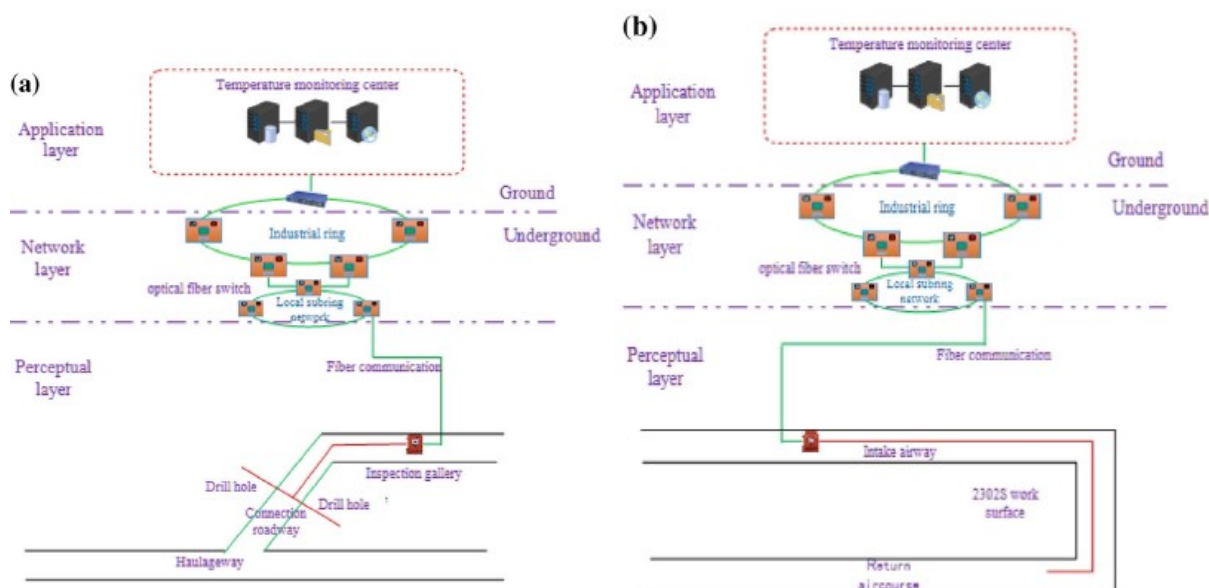
Článek se zabývá korelací mezi vstupní teplotou vzduchu do ventilace a naměřenými teplotami masivu, a to v ročních cyklech. Metodika výpočtu korelace (Obr. 95) je převzata z (Deng et al. 2014). Měření probíhalo v bodech na povrchu horniny a třech padesátimetrových vrtech, osazenými teplotně citlivými optickými vlákny. Schéma měření je znázorněno na Obr. 96.

$$P = \frac{n[\sum XY - (\sum X)(\sum Y)]}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Obr. 95 Výpočet koeficientu korelace  $P$  dvou datových množin  $X$  a  $Y$ .

Relevantní pro naše účely mohou být závěry z článku, byť jsou některé z nich obecně zřejmé: sezónní variace teplot vzduchu na povrchu ovlivňují především vstupní část dolu pro ventilační vzduch. Vliv klesá s hloubkou šachty. Teplota vzduchu na výstupu z ventilace je sezónními variacemi teplot na povrchu ovlivněná jen minimálně. V zimním období je vyšší variace teplot vzduchu mezi povrchem a vnitřkem dolu. Sezónní variace povrchových teplot ovlivňují masiv, obklopující štolu, do vzdálenosti cca 30 m.

Ukázka charakteru publikovaných výsledků je na Obr. 120 a Obr. 121 v Příloze.



Obr. 96 Schéma měření (a) teplot horniny a (b) teplot vzduchu.

## 6.2.6 Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation (Zhang 2017)

Autoři článku na základě naměřených dat v modelovém experimentu menšího měřítka popisují prostorově-časovou závislost pole bezrozměrné teploty v horninovém masivu, obklopujícího štolu, v průběhu ventilace. Předpoklady pro odvození tohoto vztahu jsou:

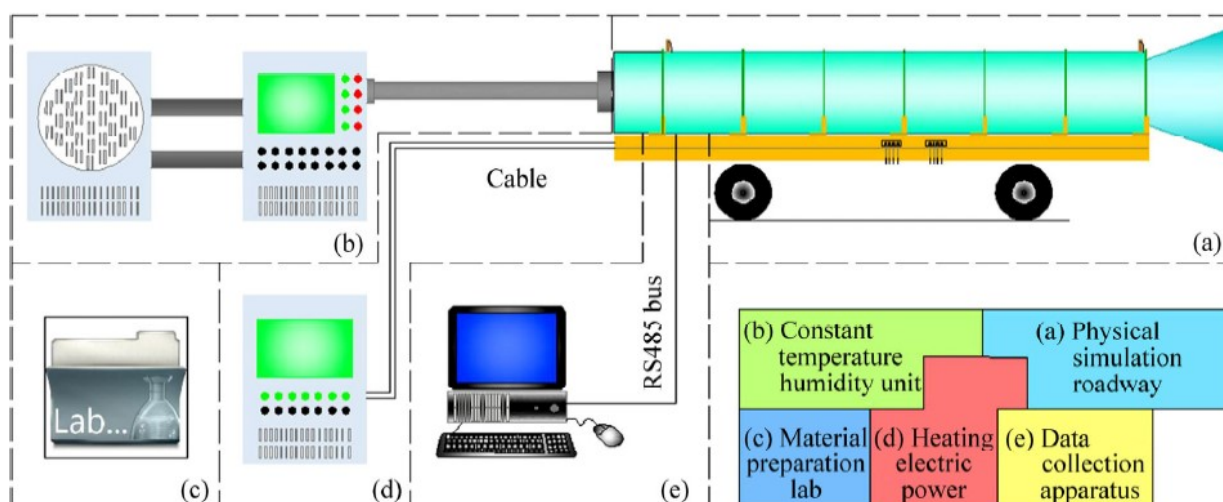
- štola má kruhový průřez a její tepelně ovlivněné okolí má válcový tvar,
- okolní hornina je homogenní, izotropní s konstantní počáteční teplotou v celém objemu,
- proudění vzduchu je laminární, distribuce tepla ideální po celé délce štoly, gradient teploty podél štoly je nulový.

Zavedení bezrozměrných veličin teploty  $\theta$ , poloměru  $R$  (radiální pozice) a času  $F_0$  je analogické tomu v (Song 2019), viz Obr. 122 v Příloze.

Experiment tvoří 6 válců o průměru 1 m a délce 1 m (viz Obr. 123 v Příloze) seřazených za sebou a zahříváných na zvolenou teplotu. Vnitřní válcovou dutinou (představující štolu) protéká vzduch o zvolené vlhkosti a teplotě, se zvolenou velikostí toku. Schéma experimentu je znázorněno na Obr. 97.

Naměřené hodnoty (ukázka na Obr. 124 v Příloze) pak byly s vysokým stupněm korelace aproximovány a) exponenciální funkcí pro vztah  $\theta(R)$ , b) Hillovou funkcí pro vztah  $\theta(F_0)$ . Výsledky experimentu potvrzují obecné předpoklady:

- oblast masivu ovlivněná ventilací se postupem času zvětšuje,
- závislost  $\theta(R)$  bezrozměrné teploty na bezrozměrném poloměru je exponenciální (viz Obr. 125 vlevo, Obr. 126 vlevo v Příloze),
- závislost  $\theta(F_0)$  bezrozměrné teploty na bezrozměrném čase se limitně blíží Hillově funkci (viz Obr. 125 vpravo, Obr. 126 vpravo v Příloze).



Obr. 97 Schéma experimentu tepelného ovlivnění horniny proudícím vzduchem.



## 6.2.7 A robust numerical method for modeling ventilation through long tunnels in high temperature regions based on 1D pipe model (Zhao, 2021)

Článek představuje jednorozměrný sdružený model proudění vzduchu a šíření tepla v dlouhém tunelu (motivací je simulace teplot v plánovaném železničním tunelu v Číně). Model je validován oproti experimentálnímu laboratornímu měření (viz Obr. 130 v Příloze), publikovanému v (Zeng et al. 2020).

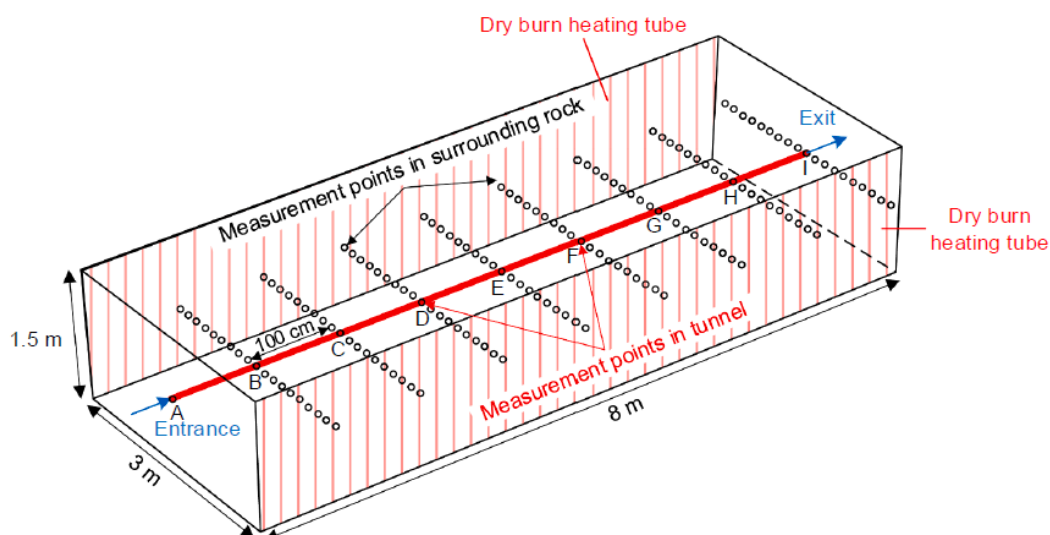
Model kombinuje konvektivní přenos tepla prouděním vzduchu po délce tunelu s přestupem tepla do masivu a jeho následným radiálním šířením. Vzhledem k rozdílu několika řádů mezi průměrem tunelu a jeho délkou uvažuje jednorozměrnou reprezentaci tunelu (přímka) v třírozměrném masivu. Geometrie modelu odpovídá měřítku experimentu (viz Obr. 98).

Zjednodušující předpoklady modelu:

- ustálené proudění vzduchu,
- periodická teplotní okrajová podmínka simulující roční cyklus teploty na vstupu do tunelu,
- nulový tepelný tok na ústí tunelu,
- hydraulický tlak na stěnách tunelu = atmosférický tlak (tj. do tunelu z masivu nic neteče),
- počáteční teplota vzduchu v tunelu = teplota nenarušené horniny.

Těžiště článku leží v případové studii konkrétního železničního tunelu, s výbornou znalostí materiálových parametrů horninového prostředí (tunel probíhá několika druhy hornin a přetíná několik zlomů, viz Obr. 131 v Příloze) a teplotních a hydraulických okrajových podmínek. Příklad vizualizace výsledků je na Obr. 132 a Obr. 133 v Příloze.

Citlivostní analýza se věnuje efektu kapacity či denní doby provozu ventilace a efektu izolační vrstvy na stěnách tunelu. Implementace modelu byla v konečně-prvkovém programu Abaqus.



Obr. 98 Schéma experimentu (Zeng, 2020) s měřicími body.



## 6.2.8 Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures (Zhou 2021)

Článek je (podobně jako např. u Liu 2019) motivován omezení zamrzání horniny v okolí vysokohorského železničního tunelu. Uvažuje navíc (jako vstupní podmínku) vliv často projíždějícího vlaku na proudění vzduchu v tunelu. Navrhuje vyhřívání tunelu pomocí tepelného výměníku, umístěného v tepelně neovlivněné části masivu.

Model opět vychází ze zjednodušených předpokladů:

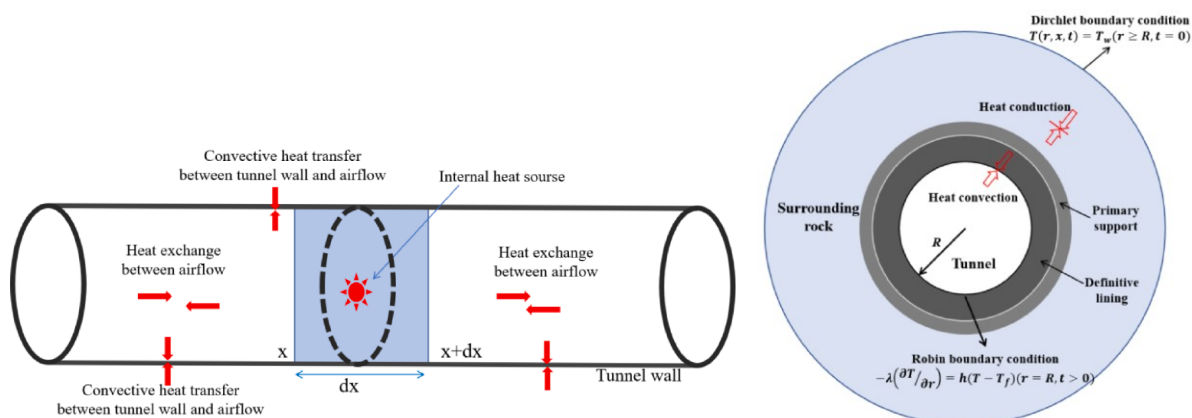
- štola má kruhový průřez a její tepelně ovlivněné okolí má válcový tvar,
- okolní hornina je homogenní, izotropní s konstantní počáteční teplotou v celém objemu,
- proudění vzduchu je laminární a tlak se nemění s teplotou.
- teplota vzduchu na vstupu je periodická funkce (nařítovaná z reálných dat).

Další vstupní podmínky:

- rychlost proudění vzduchu je schodovitá funkce s velikostí podle režimu provozu (viz Obr. 139 v Příloze).

Kombinuje radiální šíření tepla v masivu s přestupem stěna/tunel a podélnou konvekci tepla prouděním vzduchu (viz rovnice na Obr. 136 a Obr. 137 v Příloze). Numerické řešení je metodou konečných diferencí.

Případová studie konkrétního tunelu využívá znalosti horninového prostředí (řez masivem na Obr. 138 v Příloze) a dalších parametrů (např. empiricky určené hodnoty koeficientu přestupu tepla). Sleduje odezvu na různé režimy vstupního proudění vzduchu (dle Obr. 139 v Příloze), dále pak varianty se zahřívacím potrubím v obložení tunelu.

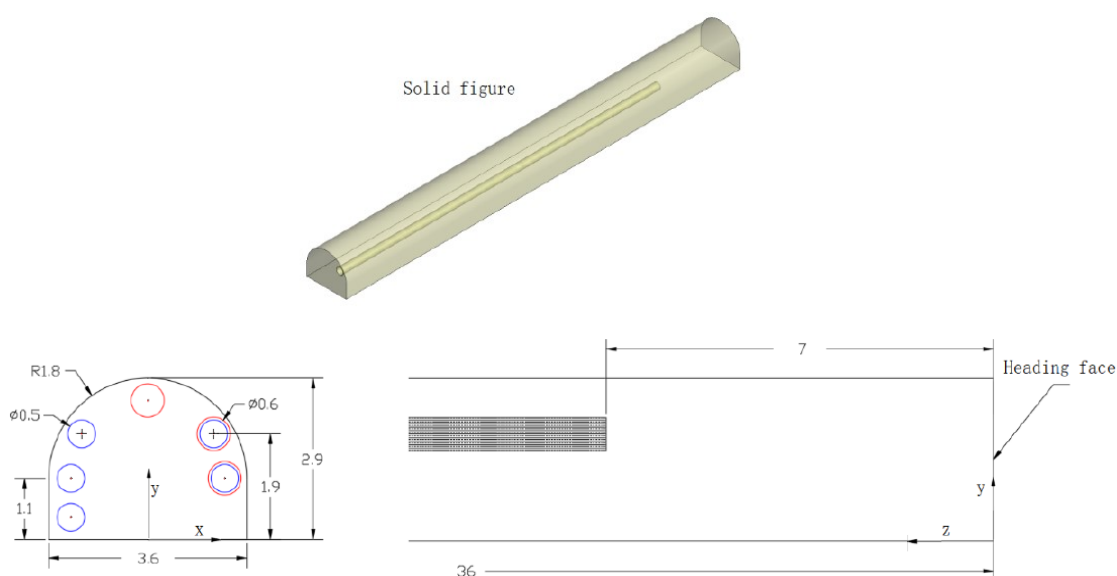


Obr. 99 Vlevo: schéma axiální tepelné konvekce. Vpravo: schéma radiálního vedení tepla.

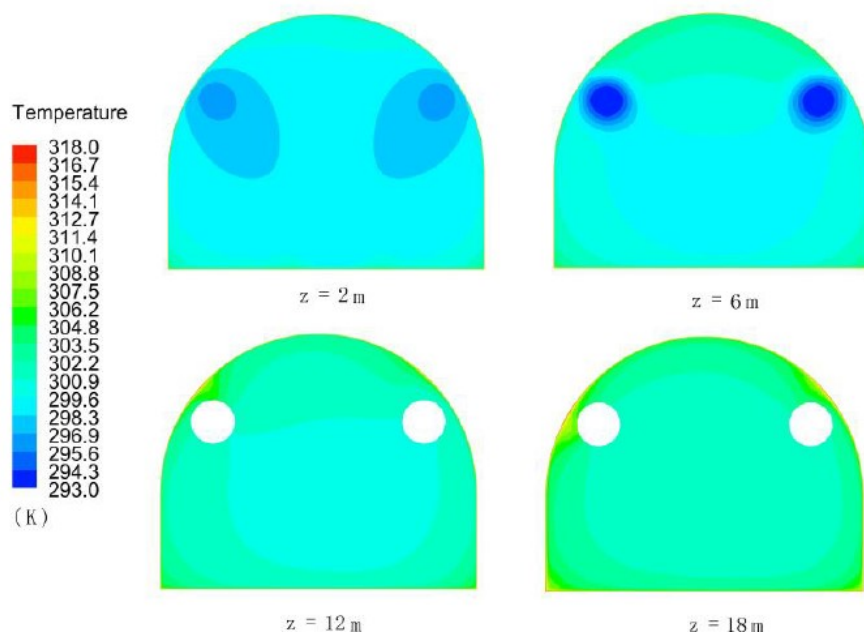
## 6.2.9 Study of the Influence of Ventilation Pipeline Setting on Cooling Effects in High-Temperature Mines (Zhou et al. 2019)

Prezentovaný model plně formulačně čerpá z modelu z článku (Sasmito et al. 2015), s podobnou geometrií (slepá větev rozrážky s ventilačním potrubím, viz Obr. 100 nahoře a vpravo dole) a shodnými okrajovými podmínkami. Přidanou hodnotu přináší odlišné případové studie (6 různých konfigurací umístění ventilace s jedním či dvěma potrubími, viz Obr. 100 vlevo dole).

Geometrie byla vytvořena programem ICEM-CFD. Numerické řešení bylo implementováno opět v programu Ansys Fluent, stejně jako u (Sasmito et al. 2015). Výsledky modelu nebyly validovány oproti měření. Pro ilustraci uvádíme vizualizaci teplotního pole pro konfiguraci potrubí, která dle prezentovaných výsledků simulací přináší největší chladicí efekt. Pro další výsledky odkazujeme na článek samotný (prezentace výsledků tvoří asi 60 % jeho obsahu).



Obr. 100 Nahoře: geometrie úlohy. Vlevo dole: Různé konfigurace ventilačního potrubí. Vpravo dole: podélný vertikální řez štolou.



Obr. 101 Teplotní pole v různých vzdálenostech od čelby – příčné vertikální řezy.

## 6.2.10 Using seasonal temperature difference in underground surrounding rocks to cooling ventilation airflow: A conceptual model and simulation study (Zhu et al. 2020)

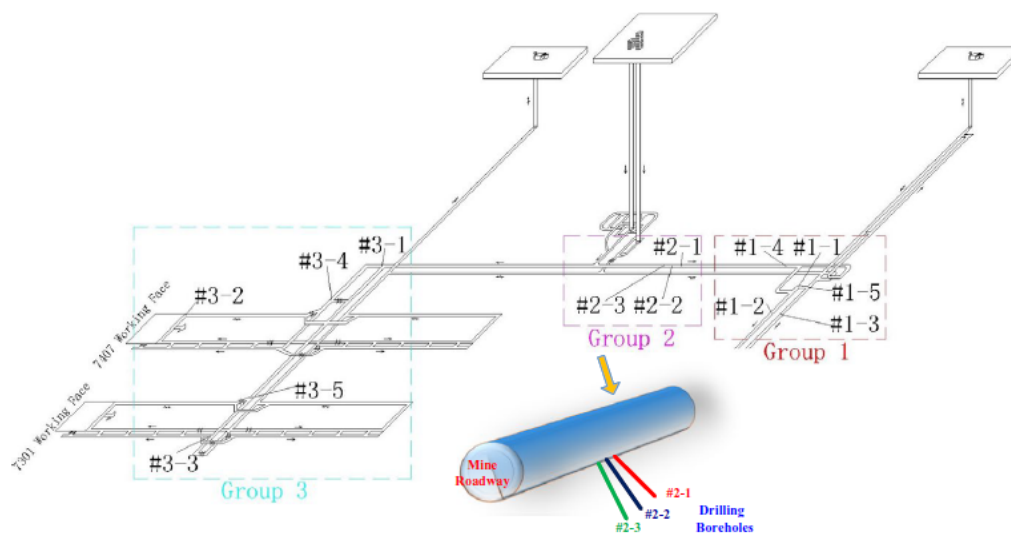
Článek zkoumá velikost tepelně ovlivněné hloubky masivu v závislosti na sezónních změnách teploty ventilace. Tuto ovlivněnou oblast nazývá HRC (heat regulation circle). Shrnuje obecně známé předpoklady: poloměr HRC je výsledkem interakce mezi geotermální energií nezasazené oblasti a proudění vzduchu ve štole (včetně např. režimu ventilace), zvětšuje se s dobou (či délkou perody) ventilace, ustálí se po cca 2 letech nepřetržité ventilace.

Součástí projektu bylo dlouhodobé měření rozložení teplot v masivu obklopujícím štolu, celkem ve 13 vrtech (Obr. 102), s důrazem na zjištění reprezentativních rozložení teplot, typických pro jednotlivá roční období (ukázka na Obr. 135 v Příloze). Výsledky měření tak přináší zajímavé informace jak o profilech teplot po délce vrtu, tak o proměnné velikosti HCR, která silně závisí na pozici konkrétního vrtu (a typu horniny) a variuje mezi 1-18 m.

Žádnou přidanou hodnotu nepřináší publikované jednoduché 2D a 3D modely (geometrie na Obr. 134 v Příloze), založené na standardní rovnici šíření tepla (Fourierův zákon) s empiricky odvozeným koeficientem přestupu tepla. Případové studie popisují odezvu HCR na měnící se teplotě vzduchu z ventilace (ta je zadána formou Dirichletovy OP na stěně štoly – proudění vzduchu není součástí modelu) – typicky mrazivý vzduch v zimě, horký v létě.

Autoři si kladou za cíl modelování využití energie ze sezónních rozdílů HRC pro chlazení během léta (jakýsi chladicí potenciál, ukládaný v hornině během zimy). Ve výsledku se omezují na obecná zřejmá konstatování typu, že např. během jara se masiv postupně ohřívá (jak zevnitř, tak zvnějšku postupně teplejším vzduchem) a ztrácí svůj chladicí potenciál. Případové studie pak např. vyčíslují, kolik lze ušetřit na energii za ventilaci (chlazení) během léta (integrací tepelného toku ze štoly do horniny během léta), pokud budeme během 3 měsíců zimy pouštět ventilací vzduch o teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Model byl implementován v programu COMSOL Multiphysics 5.5.



Obr. 102 Schéma dolu s měřicími stanovišti.

## 6.2.11 An Underground Air-Route Temperature Prediction Model for Ultra-Deep Coal Mines (Zhu et al. 2015)

Motivací práce bylo modelování teplot v hlubinném (černouhelném) dole z hlediska bezpečnosti a teplotního komfortu horníků. Modelové výsledky byly validovány oproti měření. Matematický model pracuje výhradně s analytickými vztahy, povětšinou experimentálně (statisticky) odvozenými pro jiné čínské černouhelné doly. Ve svém zaměření na in-situ stav v konkrétních dolech nejsou obecně použitelné, nicméně se lze inspirovat např. vztahy pro stanovení koeficientů přestupu tepla v různých časových obdobích chlazení. Stejně tak je opět užitečné sledovat fyzikální předpoklady či charakter a komplexnost okrajových podmínek modelu:

- kruhový průřez štol,
- homogenní izotropní hornina v okolí rozrážek,
- teplotní gradient podél rozrážek je brán jako zanedbatelný,
- teplota masivu v dané výšce je uvažována jako konstantní, nezávisle na vzdálenosti od rozrážky,
- v modelovaném úseku rozrážky nedochází ke ztrátám vzduchu,
- hodnota koeficientu přestupu tepla ze stěn rozrážky silně závisí na délce doby ventilace (rovnice na v Příloze)

Prezentovaný model vychází ze zákona zachování energie při ustáleném stavu přenosu tepla: součet zdrojů tepla, generovaných v důlním díle (přesněji v jeho modelované části, např. úseku štoly), musí být roven rozdílu energie obsaženého ve vzduchu na vstupu do ventilace a na výstupu z dolu (rovnice na Obr. 116 v Příloze). Při znalosti počátečních podmínek lze pak spočítat pomocí termodynamické rovnice (na Obr. 117 v Příloze) teplotu vzduchu na výstupu.

Stavové rovnice jednotlivých zdrojů tepla jsou uvedeny v rovnicích na Obr. 118 v Příloze. V souhrnu se jedná o teplo ze šachty, teplo ze stěn štoly, teplo ze stěn čerstvé rozrážky, oxidační teplo v důsledku chemických reakcí na stěnách štoly a teplo pocházející z činnosti strojů. Použité analytické vztahy vesměs obsahují koeficienty, statisticky odvozené z měření in-situ. Veličiny a parametry stavových rovnic jsou popsány v Tab. 7 v Příloze.

V případových studiích bylo počítáno jen s teplem generovaným stěnami štoly a oxidací. Numerická implementace byla provedena formou listů v tabulkovém kalkulátoru Microsoft Excel.

Pozn.: V případě některých analytických vztahů se článek odkazuje na publikaci Qin, Y.; Hou, Q. *Environmental Engineering in Mines*; Wuhan Industrial University Press: Wuhan, China, 1989. Tato však není k dohledání. Existuje kniha se shodným názvem (Vutukuri, 2010). Jednou ze zásadních knih v oboru je pak (Sengupta 1990) s podobným názvem. Vzhledem k celkovému rozsahu rešerše už tyto knihy nebyly studovány.

## 6.3 Shrnutí

### 6.3.1 Oblast „ventilace“

Drtivá většina publikací v oblasti monitoringu či modelování teplotního pole v důlních dílech se věnuje vlivu existující ventilace na tyto teploty (ať vzduchu nebo masivu) nebo návrhům, modelování a optimalizaci ventilačních systémů, a to z hlediska (ekonomiky) provozu a bezpečnosti důlního díla. Formulace úloh má široký rozsah: a) úlohy typu fitování naměřených dat pomocí 1D analytických vztahů (Zhu et al. 2015) či „pouhé“ lineární aproximace (Bascompta 2020) po exponenciální aproximace (Zhang et al. 2017); b) úlohy založené na popisu fyzikálních dějů pomocí parciálních diferenciálních rovnic: 2D úlohy (Zhu 2020) přes kombinace podélné konvekce tepla v tunelu a radiálního šíření teploty v masivu (1D axisymetrické úlohy), CFD modely ve 3D (Sasmito et al. 2015; Zhou et al. 2019), až po komplexní termodynamické modely ve 3D (Danko, 2017), (Danko et al., 2020). Převažují však 1D, 2D, popř. 1D axisymetrické modely šíření tepla. Způsoby výpočetního řešení jsou od analytických přes neuvedené (možná vlastní řešiče) po využití komerčních konečně-prvkových či konečně-objemových softwarových balíčků.

Modely ventilace důlního díla většinou uvažují horninový masiv jakožto stálý zdroj tepla a teplotu masivu na stěnách rozrážky jako konstantní (výjimkou je např. (Zhu 2020), který zadává jakožto konstantní teplotu vzduchu ve štole). Cílem je pak modelovat výslednou teplotu vzduchu ve štole (pro dodržení bezpečnostních norem pro pracovníky apod.).

Sezónním změnám vzduchu na vstupu do ventilace a odezvy v teplotním poli masivu v blízkém okolí štoly (jednotky až nízké desítky metrů) se věnují především publikace z oblasti „vymrzání tunelů“, či v obecné rovině (Song 2019). Společným jmenovatelem je shodná formulace úlohy radiálního šíření tepla, která umožňuje snadno zahrnout do okrajových podmínek periodickou funkci pro teplotu ventilace. Úlohy radiálního či podélného + radiálního šíření tepla svým charakterem také umožňují některé předpoklady, hypotézy či funkční vztahy ověřit experimentálně (Zeng 2020; Zhang 2017).

Publikace, které příliš nepřinášejí v oblasti modelování (jedná se o fitování dat), mohou naopak poskytovat významné kvalitativní informace o teplotách v masivu díky měřením in-situ. To je případ např. (Zhu 2020) s profily teplot pro různá roční období či (Yi 2019), zkoumající stupeň korelace mezi vstupní teplotou ventilace a odezvou masivu.

### 6.3.2 Oblast „vymrzání tunelů“

Obsáhlou množinu publikací nabízí oblast silničních či železničních tunelů v náročných klimatických podmínkách. Zde se jedná o úlohy typu kombinace podélné konvekce tepla prouděním v tunelu a radiálního šíření tepla v masivu v okolí tunelu samotném (Liu 2019; Zhou 2021). (Zhao, 2021) však zajímavě kombinuje podélnou konvekci v 1D reprezentaci tunelu s reálnou 3D geometrií horninového masivu. Způsoby výpočetního řešení jsou také různé, od analytických (Liu 2019) přes metodu konečných diferencí (Zhou 2021) po metodu konečných prvků (Zhao, 2021).

Ač mají tyto články o odlišnou oblast zájmu, než jsou hlubinné doly (a liší se např. klíčovými slovy při vyhledávání), fyzikálním charakterem se jedná o úlohy ekvivalentní (a proto stejně relevantní).



### 6.3.3 Doplnění

Existují i publikace, věnující se modelování využití opuštěných dolů pro získávání geotermální energie, např. (Loredo 2016). Společné průniky s obsahem (Zhu 2015; Yi 2019) má (Torres 2008)

## 7 Shrnutí závěrů z rešerše

Ze zjištění v rámci jednotlivých tematických kapitol lze udělat následující celkové závěry. Z uvedeného vyplývá, že vertikální tepelné pole (zemské teplo) a ovlivnění okolí podzemních prostor větráním, jsou v nalezených zdrojích studovány výlučně odděleně. V tomto smyslu tedy zahajovaný projekt slibuje podstatný prvek novosti, s využitím monitoringu teplot v okolí chodeb dolu současně pro studium ovlivnění větráním v měřítku metrů až prvních desítek metrů a identifikaci vertikálního pole v měřítku stovek metrů.

Technické řešení monitoringu:

- Je zřejmé, že je v současné době řešen teplotní monitoring dvěma hlavními způsoby. Jednak pomocí teplotních čidel a pak také metodou DTS, kdy je teplota měřena pomocí optického vlákna. S oběma metodami má řešitel dlouholeté zkušenosti.
- Zásadním problémem se jeví dlouhodobá udržitelnost a spolehlivost monitoringu v prostředí HÚ.

Lokální tepelné pole důlních prostor:

- Práce s modely tepelného pole v okolí důlních prostor nebo tunelů často pracují s radiální geometrií (osově symetrické modely) a předpoklady homogenní izotropní horniny. Původní teplota, použitá také jako podmínka na umělé „vnější“ hranici, je volena konstantní, tj. nezahrnuje geotermický gradient a zemský tepelný tok a jeho odchylky.
- Modely a metodiky vyhodnocení v pracích v souvislosti s větráním tunelů nekorespondují plně s aplikovanými koncepčními předpoklady při vyhodnocení detailnějších měření při monitoringu a experimentech v podzemních laboratořích pro výzkum hlubinného úložiště – např. byly hypotézy o nerovnoměrné tepelné vodivosti po obvodu tunelu nebo vzdálenosti od stěny vlivem porušení ražbou, nebo příspěvkem vyvěrající vody k transportu tepla. Přístup je pravděpodobně podmíněn rozdílnou motivací pro detail v jednom a druhém kontextu.
- Některé práce v souvislosti s větráním zahrnující reálné simulace proudění vzduchu ukazují, že pohyb vzduchu spolu s nekruhovým tvarem tunelu/chodby vede na znatelnou odchylku od rotační symetrie pole teploty, ale není vyhodnoceno, do jaké vzdálenosti odchylka odezní (lze předpokládat, že v dostatečné vzdálenosti pole rotačně symetrické bude).
- V citovaných pracích je postižena řada detailů týkajících se tepelné interakce horniny a proudícího vzduchu.
- Metodika vyhodnocení vertikálních profilů teplot v souvislosti s tepelným tokem ukazuje na podstatný vliv nehomogenity a anizotropie horniny.

Vertikální tepelné pole:

- V kandidátních lokalitách HÚ v zahraničí byla v řadě případů hustší síť hlubokých vertikálních vrtů, než se obvykle dělá pro geotermální průzkum, což umožňuje do vyhodnocení vertikálního pole uvažovat statistické rozdíly, nejistoty, nebo explicitnější prostorovou nehomogenitu.
- Vzhledem k malé vrtné prozkoumanosti krystalinických masivů na území ČR je obtížné s vyšší mírou přesnosti predikovat teploty v hloubkách budoucího HÚ.
- Díky datům z teplotní karotáže již neexistujícího hlubokého vrtu na 18. patře dolu, naměřené tepelné vodivosti a tepelné produkci bude možné celkem přesně určit

hodnotu neporušeného tepelného toku v horninovém masivu a tu pak využít v numerických modelech porušení teplotního pole vlivem existujícího důlního díla.

- Protože se důlní dílo nachází ve zvlněném terénu, bude třeba do numerických modelů teplotního pole zahrnout vliv topografie.
- Je vhodné provést analýzu vlivu minulých klimatických změn na teplotní pole.

Tepelné parametry:

- Pro realistické modelování transportu tepla jak v měřítku okolí ražených prostor, tak v měřítku celého dolu od povrchu s využitím dat laboratorních měření tepelných vodivostí a kapacit je nutno korigovat tyto parametry o vliv měřítka. V rámci studií v podzemních laboratořích bylo citováno několik případových studií s možnými metodikami podrobného vyhodnocení.
- Může být účelné kombinovat více metod měření tepelných vodivostí např. v souvislosti s měřítkem nebo mírou různých parazitních vlivů.
- Pro rozpukanou horninu existují studie zahrnutí příspěvků puklin do tepelné vodivosti ve větším měřítku než kompaktní vzorek pomocí homogenizace. To může být využitelné pro budoucí modely v rámci projektu.
- V prostřední HÚ bude hrát důležitou roli teplotní závislost tepelné vodivosti/difuzivity, kdy v případě křemenem bohatých hornin tyto tepelné vlastnosti se vzrůstající teplotu výrazně klesají. To může vést ke zvýšení teplotního gradientu a tím teploty v hornině v okolí kontejnerů s vyhořelým palivem.

Obecně ve vztahu k HÚ:

- Vzhledem k požadavku na co nejnižší teplotu v místě budoucího HÚ se jeví ideálním místem horninový masiv s malou tepelnou produkcí a vysokou tepelnou vodivostí v místě s nízkou bazální hodnotou hustoty tepelného toku. V případě kopcovitého terénu s výrazným převýšením by pak HÚ nemělo být umístěno v údolí.

## Reference

- ADL-ZARRABI B. (2007): Borehole KLX03, KLX05, KLX07, KLX10 and KLX11A. Thermal properties of rocks using calorimeter and TPS method, and mineralogical composition by modal analysis. Oskarshamn site investigation. SKB P-07-62.
- AITEMIN (2013): MODERN - State of Art Report on Monitoring Technology.
- ALHO P., LIPPING T. & NYGRÉN E. (2021): Results of Monitoring at Olkiluoto in 2020 - Environment. POSIVA WR 2021-45.
- BAHRAMI M., CULHAM J. R., YANANOVICH M. M. & SCHNEIDER G. E. (2006): Review of Thermal Joint Resistance Models for Nonconforming Rough Surfaces. *Applied Mechanics Reviews* 59(1): 1–12. <https://doi.org/10.1115/1.2110231>
- BASCOMPTA M., ROSSELL J. M., SANMIQUEL L. & ANTICOI H. (2020): Temperature Prediction Model in the Main Ventilation System of an Underground Mine. *Applied Sciences* 10(20): 7238. <https://doi.org/10.3390/app10207238>
- BERCHENKO I., DETOURNAY E., CHANDLER N. & MARTINO J. (2004): An in-situ thermo-hydraulic experiment in a saturated granite I: design and results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(8): 1377–1394. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.006>
- BERCHENKO I., DETOURNAY E., CHANDLER N., MARTINO J. & KOZAK E. (1998): In-situ measurement of some thermoporoelastic parameters of a granite. THIMUS, J.F., ABOUSLEIMAN, Y., CHENG, A.H.D., COUSSY, O., & DETOURNAY, E. (eds) *Poromechanics: A Tribute to Maurice a. Biot*, AA Balkema Publishers, Leiden.
- BERTRAND. (2019): Modern2020 - Deliverable 3.4 – New sensors for repository monitoring
- BUHMANN P., MOORMANN C., WESTRICH B., PRALLE N. & FRIEDEMANN W. (2016): Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects. *Geomechanics for Energy and the Environment* 8: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2016.10.006>
- ČERMÁK V. & RYBACH L. (eds). (1991): *Terrestrial heat flow and the lithosphere structure*. Springer-Verlag, Berlin; New York, 507 pp.
- CHANDLER, N. A. (2003): Twenty Years of Underground Research at Canada's URL. WM'03 Conference, Tucson AZ.
- CHO W.-J., KIM J.-S., LEE C., KWON S. & CHOI J.-W. (2012): In situ experiments on the performance of near-field for nuclear waste repository at KURT. *Nuclear Engineering and Design* 252: 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.06.020>
- CLAUSER C. (2009): Heat Transport Processes in the Earth's Crust. *Surveys in Geophysics* 30(3): 163–191. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9058-2>
- DANKO G., BAHRAMI D. & STEWART C. (2020): Applications and verification of a computational energy dynamics model for mine climate simulations. *International Journal of Mining Science and Technology* 30(4): 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.019>
- DANKO G. L. (2017): *Model Elements and Network Solutions of Heat, Mass and Momentum Transport Processes*. 1st ed. 2017 – Springer Berlin Heidelberg: Imprint: Springer, Berlin, Heidelberg, 1 p.

- DEDECEK P., UXA T., SAFANDA J. & CERMAK V. (2018): Heat flow map of the Czech Republic. 17037.
- DENG J., WANG K., ZHANG Y. & YANG H. (2014): Study on the kinetics and reactivity at the ignition temperature of Jurassic coal in North Shaanxi. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry* 118(1): 417–423.
- DETOURNAY E., SENJUNTICHAJ T. & BERCHENKO I. (2004): An in situ thermo-hydraulic experiment in a saturated granite II: analysis and parameter estimation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(8): 1395–1411. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.007>
- DIXON D., CHANDLER N., GRAHAM J. & GRAY M. N. (2002): Two large-scale sealing tests conducted at Atomic Energy of Canada's underground research laboratory: the buffer-container experiment and the isothermal test. *Canadian Geotechnical Journal* 39(3): 503–518. <https://doi.org/10.1139/t02-012>
- FAIRHURST C. (2004): Nuclear waste disposal and rock mechanics: contributions of the Underground Research Laboratory (URL), Pinawa, Manitoba, Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(8): 1221–1227. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.001>
- FARHOUD R., DELEPINE-LESOILLE S., BUSCHAERT S. & RIGHINI-WAZ B. (2015): Monitoring System Design of Underground Repository for Radioactive Wastes – In Situ Demonstrator. *International Journal of Engineering and Technology* 7(6): 484–489. <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.842>
- GAO J. & XIANG Y. (2016): A model test of effects of three-dimensional water flow and heat transfer on temperature and stress of sparsely irregularly fractured rocks. *Rock and Soil Mechanics* 37(11): 3145–3155. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2016.11.014>
- GARCIA A. V. & SANTAMARINA J. C. (2021): Heat Flow in Fractured Rocks: Stress and Moisture-Dependent Thermal Contact Resistance. *Geothermics* 95: 102113. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102113>
- GAUTAM P. K., VERMA A. K., SINGH T. N., HU W. & SINGH K. H. (2019): Experimental investigations on the thermal properties of Jalore granitic rocks for nuclear waste repository. *Thermochimica Acta* 681: 178381. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178381>
- GENS A., SÁNCHEZ M., GUIMARÃES L. D. N., ALONSO E. E., LLORET A., OLIVELLA S., VILLAR M. V. & HUERTAS F. (2009): A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: Observations, analysis and interpretation. *Geotechnique* 59(4): 377–399. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.4.377>
- GOUDARZI R. (2020): Prototype Repository – Sensor data report. Period 01-09-17–20-01-01 Report No 30. SKB P-20-33.
- GOUDARZI R., AKESSON M. & HÖKMARK H. (2020): Temperature Buffer Test. Sensors Data Report (period 030326-050701) Report no:6. SKB IPR-05-20.
- GUO R. (2011): Thermohydromechanical modelling of the buffer/container experiment. *Engineering Geology* 122(3–4): 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.005>
- GUO R., CHANDLER N., MARTINO J. & DIXON D. (2005): Application of numerical modelling in the design of a full-scale heated Tunnel Sealing Experiment. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 29(12): 1171–1197. <https://doi.org/10.1002/naq.451>

- GUO R. & DIXON D. (2006): Thermohydromechanical simulations of the natural cooling stage of the Tunnel Sealing Experiment. *Engineering Geology* 85(3): 313–331. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.03.003>
- GUPTA H. K. & JAMES D. E. (eds). (2011): *Encyclopedia of solid earth geophysics*. Revised and expanded edition. Springer, Dordrecht, 2 pp.
- HAAPALEHTO S., MALM M., KAISKO O., LAHTINEN S. & SAARANEN V. (2021): Results of Monitoring at Olkiluoto in 2020, *Rock Mechanics*. POSIVA WR 2021-47.
- HAMA K., SASAO E. & IWATSUKI T. (2016): Synthesized Research Report in the Second Mid-term Research Phase – Mizunami Underground Research Laboratory Project, Horonobe Underground Research Laboratory Project and Geo-stability Project. JAEA-Review 2016-014.
- HÖKMARK H. & FÄLTH B. Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and nearfield design on the maximum canister surface temperature. SKB TR-03-09.
- HOPKIRK R. J., GILBY D. J. & SCHWANNER I. (1983): Preliminary calculations of the temperature distributions around a type C (highly active) nuclear waste repository. NAGRA NTB 83-20.
- HRNČIAROVÁ T., MACKOVČIN P., ZVARA I. ET AL. (2009): *Atlas krajiny České republiky*. Landscape atlas of the Czech Republic. Praha, Průhonice: Ministerstvo životního prostředí České republiky, Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, 331 s. ISBN: 978-80-85116-59-5.
- HURTIG E. (1992): *Geothermal atlas of Europe*. Hermann Hack Verlagsgesellschaft: Geographisch-Kartographische Anstalt. ISBN: 978-3-7301-0034-9.
- IKONEN K. (2005): Thermal Condition of Open KBS-3H Tunnel. Posiva PR 2005-04.
- IKONEN K. & RAIKO H. (2012): Thermal Dimensioning of Olkiluoto Repository for Spent Fuel. POSIVA WR 2012-56.
- KJELLSTRÖM E., STRANDBERG G., BRANDEFELT J., NÄSLUND J.-O., SMITH B. & WOHLFARTH B. (2009): Climate conditions in Sweden in a 100,000-year time perspective. Updated 2010-02. SKB TR-09-04.
- KOBYLKA D. (2017): Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS. SÚRAO: TZ 135/2017.
- KREŠL M., VAŇKOVÁ V. & JANÁČKOVÁ A. (1978): Radioactivity and heat production data from several boreholes in the Bohemian Massif. *Studia Geophysica et Geodaetica* 22(2): 165–176. <https://doi.org/10.1007/BF01614041>
- KRISTENSSON O. & HÖKMARK H. (2007): Prototype Repository. Thermal 3D modelling of Äspö Prototype Repository. SKB IPR-07-01.
- KUBÍK J. (1990): Subsurface temperature field of the Bohemian Massif. *Studia Geophysica et Geodaetica* 34(2): 110–128. <https://doi.org/10.1007/BF02295831>
- KUKKONEN I. (2015): Temperature Dependencies of Thermal Properties of Olkiluoto Rocks Measured with the Flash Method. POSIVA WR 2015-48.
- KUKKONEN I., KORPISALO A. & KOSKINEN T. (2011): Inverse Temperature Gradient Method for Estimating Thermal Conductivity in Drillholes. POSIVA WR 2011-79.
- KUKKONEN I., RATH V. & KORPISALO A. (2015): Paleoclimatic Inversion of Ground Surface Temperature History from Geothermal Data on the Olkiluoto Drill Hole OL-KR56. POSIVA WR 2015-49.



- KULL H. & MIEHE R. (1995): Grimsel Test Site The influence of tunnel ventilation on the hydraulic flow conditions in the crystalline rock zone in the tunnel near-field. NAGRA NTB 94-04.
- KWON S., CHO W. J. & CHOI J. W. (2011): Initial thermal conditions around an underground research tunnel at shallow depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48(1): 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.08.011>
- KWON S., LEE C., YOON C.-H. & CHO W.-J. (2013): In situ borehole heater test at the KAERI Underground Research Tunnel in granite. *Annals of Nuclear Energy* 62: 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.07.017>
- LANYON G. W. & GAUS I. (2016): Main outcomes and review of the FEBEX In Situ Test (GTS) and Mock-up after 15 years of operation. NAGRA NTB 15-04.
- LEE J. O., KIM G. Y., KIM J.-S., LEE C., YOON S. & CHOI Y.-C. (2021): In-situ demonstration of engineered barrier system (In-DEBS) at KURT: Coupled thermal-hydro-mechanical behavior of buffer. *Annals of Nuclear Energy* 160: 108429. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108429>
- LI Z.-W., LIU Y., MEI S.-M., XING S.-C. & WANG X.-K. (2021): Effective Thermal Conductivity Estimation of Fractured Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 54(12): 6191–6206. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02599-5>
- LIU D. & XIANG Y. (2020): Thermoelastic analysis of a geological repository with distributed decay heat sources by the image method in combination with a numerical integration scheme. In *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014301016>
- LIU D., XIANG Y. & SUN J. (2020): A boundary element formation for three-dimensional thermo-elasticity of a semi-infinite space with buried decaying heat sources. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 135. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104509>
- LIU W., FENG Q., WANG C., LU C., XU Z. & LI W. (2019): Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel. *Cold Regions Science and Technology* 164: 102787. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102787>
- LÖFMAN J. (2001): The Effect of an Anisotropic Bedrock on the Temperature Rise of the Repository – Preliminary Study. POSIVA WR 2001-17.
- LÖNNQVIST M. & HÖKMARK H. (2013): Thermal and thermo-mechanical evolution of the Äspö Prototype Repository rock mass. Modelling and assessment of sensors data undertaken in connection with the dismantling of the outer section. SKB R-13-10.
- LÖNNQVIST M. & HÖKMARK H. (2008): Thermo-mechanical analyses of a KBS-3H deposition drift at Olkiluoto site. SKB R-08-30.
- LOREDO C., ROQUEÑÍ N. & ORDÓÑEZ A. (2016): Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *International Journal of Coal Geology* 164: 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
- LU W. & XIANG Y. (2010): A Preliminary Physical Modeling Experiment of Coupled Flow and Heat Transfer in Fractured Rocks. SUN, J.H., HAN, H.L., & ZHANG, H. (eds) *Civil Engineering in China – Current Practice and Research Report*, Aussino Acad Publ House, Marrickville.
- LU W., XIANG Y. & TANG C. (2011): Model experiment and numerical simulation of flow and heat transfer for sand-filled fractured rock model. *Rock and Soil Mechanics* 32(11): 3448–3454.
- MARSCHALL P. & VOMVORIS S. (1995): Grimsel Test Site Developments in Hydrotesting, Fluid Logging and Combined Salt/Heat Tracer Experiments in the BK Site (Phase III). NAGRA NTB 93-47.

- MARTINO J. B., DIXON D. A., KOZAK E. T., GASCOYNE M., VIGNAL B., SUGITA Y., FUJITA T. & MASUMOTO K. (2007): The tunnel sealing experiment: An international study of full-scale seals. *Physics and Chemistry of the Earth* 32(1–7): 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.04.023>
- MOBERG A., GOUIRAND I., SCHONING K., WOHLFARTH B., KJELLSTRÖM E., RUMMUKAINEN M., JONG, RIXT L., HANS Z., & EDUARDO. (2006): Climate in Sweden during the past millennium – Evidence from proxy data, instrumental data and model simulations. SKB TR-06-35.
- MOTTAGHY D., VOSTEEN H.-D. & SCHELLSCHMIDT R. (2008): Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks. *International Journal of Earth Sciences* 97(2): 435–442. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0238-3>
- OBAYASHI CORPORATION. (1998): KRISTALLIN-I: Repository Layout Study Preliminary Calculation of Temperature Distributions around an Emplacement Tunnel. NAGRA NAB 94-13.
- PAPAFOTIOU A. & SENGER R. (2014): Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Nördlich Lägern. NAGRA NAB 13-56.
- PENG H., ZHAO Z., CHEN W., CHEN Y., FANG J. & LI B. (2020): Thermal effect on permeability in a single granite fracture: Experiment and theoretical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 131: 104358. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104358>
- POPOV Y. A., PRIBNOW D. F. C., SASS J. H., WILLIAMS C. F. & BURKHARDT H. (1999): Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics* 28(2): 253–276. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00007-3)
- RATH V., SUNDBERG J., NÄSLUND J.-O. & LILJEDAHL L. C. (2019): Paleoclimatic inversion of temperature profiles from deep boreholes at Forsmark and Laxemar. SKB TR-18-06.
- SAEGUSA H. & MATSUOKA T. (2010): Final Report on the Surface-based Investigation Phase (Phase I) at the Mizunami Underground Research Laboratory Project. JAEA-Research 2010-067.
- ŠAFANDA J. (1995): Effect of thermal conductivity anisotropy of rocks on the subsurface temperature field. *Geophysical Journal International* 120(2): 323–330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb01821.x>
- ŠAFANDA J. (1994): Effects of topography and climatic changes on the temperature in borehole GFU-1, Prague. *Tectonophysics* 239(1–4): 187–197. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90114-7)
- ŠAFANDA J. (1999): Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field. *Tectonophysics* 306(3–4): 367–375. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00066-9)
- ŠAFANDA J. & MATYSKA C. (1987): Some remarks on the estimation of geothermal topocorrections. *Studia Geophysica & Geodaetica* 31(3): 284–300. <https://doi.org/10.1007/BF01624759>
- ŠAFANDA J. & RAJVER D. (2001): Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. *Global and Planetary Change* 29(3–4): 241–257. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00093-5)
- ŠAFANDA J., VERNER K., FRANĚK J., PEŘESTÝ V., HOLEČEK J. & FISCHER T. (2020): Geology and geothermal potential in the eastern flank of Eger Rift (Litoměřice area, Czech Republic). *Geothermics* 86: 101808. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101808>

- SASMITO A. P., KURNIA J. C., BIRGERSSON E. & MUJUMDAR A. S. (2015): Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine. *Applied Thermal Engineering* 90: 1144–1150. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.062>
- SCHNEEFUSS J., GLASS F., GOMMLICH G. & SCHMIDT M. (1989): Grimsel Test Site Heater Test. NAGRA NTB 88-40.
- SEDIGHI M., BENNETT D., MASUM S. A., THOMAS H. R. & JOHANSSON E. (2013): Analysis of Temperature Data at the Olkiluoto. POSIVA WR 2013-58.
- SEIPOLD U. (1998): Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks — a general law. *Tectonophysics* 291(1–4): 161–171. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00037-7)
- SEIPOLD U. & HUENGES E. (1998): Thermal properties of gneisses and amphibolites — high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples. *Tectonophysics* 291(1–4): 173–178. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00038-9)
- SELVADURAI A. P. S. & NGUYEN T. S. (1997): Scoping analyses of the coupled thermal-hydrological-mechanical behaviour of the rock mass around a nuclear fuel waste repository. *Engineering Geology* 47(4): 379–400. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00100-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00100-7)
- SENGUPTA M. (1990): Mine environmental engineering. CRC Press, Boca Raton, Fla, 288 pp.
- SONG H., QIN Y., WU J., WANG G., LI S., NIU C. & WU Z. (2019): Study on the Radial and Axial Temperature Fields of Coal Roadway under Seasonal Fluctuation Boundary. *Mathematical Problems in Engineering* 2019: 1–17. <https://doi.org/10.1155/2019/2120618>
- SUNDBERG J. (2003): Thermal properties at Äspö HRL. Analysis of distribution and scale factors. SKB R-03-17.
- SUNDBERG J., BACK P.-E. & HELLSTROM G. (2005): Scale dependence and estimation of rock thermal conductivity. Analysis of upscaling, inverse thermal modelling and value of information with the Äspö HRL prototype repository as an example. SKB R-05-82.
- SUNDBERG J., BACK P.-E., LONDELL M. & SUNDBERG A. (2009): Modelling of temperature in deep boreholes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. Updated 2010-09. SKB TR-09-14.
- SUNDBERG J., WRAFTER J., BACK P.-E. & ROSÉN L. (2008): Thermal properties Laxemar. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. SKB R-08-61.
- SUPPALA I., KUKKONEN I., KORPISALO A. & KOSKINEN T. (2013): Thermal Diffusivity of a Rock Mass Estimated from DrillHole Temperature Monitoring in the ONKALO. POSIVA WR 2013-35.
- THOMAS H. R., CLEALL P. J., DIXON D. & MITCHELL H. P. (2009): The coupled thermal-hydraulic-mechanical behaviour of a large-scale in situ heating experiment. *Geotechnique* 59(4): 401–413. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.4.401>
- TORRES V. R. N., GAMA C. D. da & SINGH R. N. (2008): Mathematical modelling of thermal state in underground mining. *Acta Geodyn. Geomater* 5(4 (152)): 341–349.
- VOSTEEN H.-D. & SCHELLSCHMIDT R. (2003): Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 28(9–11): 499–509. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00069-X)
- VUTUKURI V. S. & LAMA R. D. (2010): Environmental engineering in mines. Cambridge University Press, Cambridge.

- WANG C., CHEN L., LIU J. & LIU J. (2015): Experimental characterisation of thermo-mechanical coupling properties of Beishan granite. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19: S29–S42. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1064618>
- WANG J. (2019): Site characterization for the Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development*. CRC Press.
- WANG J., CHEN L., SU R. & ZHAO X. (2018): The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10(3): 411–435. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.002>
- WERNER K. (2019): Hydrological monitoring in Forsmark – surface waters, ground moisture and ground temperature. October 1, 2017 – September 30, 2018. SKB P-19-08.
- WERNER K. (2020): Hydrological monitoring in Forsmark – surface waters, ground moisture and ground temperature. October 1, 2018–September 30, 2019. SKB P-20-10.
- YI X., REN L., MA L., WEI G., YU W., DENG J. & SHU C. (2019): Effects of seasonal air temperature variation on airflow and surrounding rock temperature of mines. *International Journal of Coal Science & Technology* 6(3): 388–398. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00268-1>
- YOON C., KWON S., KIM J. & CHOI H. (2013): An experimental study regarding the determination of seasonal heat transfer coefficient in KURT by convection conditions. *Safety Science* 51(1): 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.06.023>
- ZENG Y., TAO L., YE X., ZHOU X., FANG Y., FAN L., LIU X. & YANG Z. (2020): Temperature reduction for extra-long railway tunnel with high geotemperature by longitudinal ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology* 99: 103381. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103381>
- ZHANG Y., WAN Z., GU B., ZHOU C. & CHENG J. (2017): Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation. *Journal of Central South University* 24(2): 374–381. <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3439-3>
- ZHANG Y. & XIANG Y. (2010): A Semi-analytical Analysis of Advective-conductive Heat Transfer for Nuclear Waste Repositories in Sparsely Fractured Rocks. LIU, J.J., ZHANG, H., & ZHAO, R. (eds) 2010 International Symposium on Multi-Field Coupling Theory of Rock and Soil Media and Its Applications, Orient Acad Forum, Marrickville.
- ZHAO H. G., SHAO H., KUNZ H., WANG J., SU R. & LIU Y. M. (2014): Numerical analysis of thermal process in the near field around vertical disposal of high-level radioactive waste. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6(1): 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.004>
- ZHAO X. G., WANG J., CHEN F., LI P. F., MA L. K., XIE J. L. & LIU Y. M. (2016): Experimental investigations on the thermal conductivity characteristics of Beishan granitic rocks for China's HLW disposal. *Tectonophysics* 683: 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.021>
- ZHAO X. G., XU H. R., ZHAO Z., GUO Z., CAI M. & WANG J. (2019): Thermal conductivity of thermally damaged Beishan granite under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 115: 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.01.014>
- ZHAO Z., XU H., LIU G., LIU F. & WANG G. (2021): A robust numerical method for modeling ventilation through long tunnels in high temperature regions based on 1D pipe model. *Tunnelling and Underground Space Technology* 115: 104050. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104050>

- ZHOU H., LIU H., HU D., ZHANG F., YANG F. & LU J. (2016): Estimation of the effective thermal properties of cracked rocks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 20(8): 954–970. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1084386>
- ZHOU X., REN X., YE X., TAO L., ZENG Y. & LIU X. (2021): Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 111: 103843. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103843>
- ZHOU Z., CUI Y., TIAN L., CHEN J., PAN W., YANG S. & HU P. (2019): Study of the Influence of Ventilation Pipeline Setting on Cooling Effects in High-Temperature Mines. *Energies* 12(21): 4074. <https://doi.org/10.3390/en12214074>
- ZHU S., CHENG J., SONG W., BOROWSKI M., ZHANG Y., YU B., WANG Y., QI C., TUKKARAJA P., HUA G., XU Y., GHOSH A., WANG C. & PENG Y. (2020): Using seasonal temperature difference in underground surrounding rocks to cooling ventilation airflow: A conceptual model and simulation study. *Energy Science & Engineering* 8(10): 3457–3475. <https://doi.org/10.1002/ese3.619>
- ZHU S., WU S., CHENG J., LI S. & LI M. (2015): An Underground Air-Route Temperature Prediction Model for Ultra-Deep Coal Mines. *Minerals* 5(3): 527–545. <https://doi.org/10.3390/min5030508>

### **www stránky**

CNSC research on geological repositories [online] [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/waste/cnsc-research/geologic-repositories/>

China starts building underground lab: Waste & Recycling. *World Nuclear News* [online] [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/China-starts-building-underground-lab>

Underground Research Laboratory. *Wikipedia* [online] [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Underground\\_Research\\_Laboratory&oldid=1037871573](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Underground_Research_Laboratory&oldid=1037871573)

Ansys | Engineering Simulation Software. *Aa* [online] [cit. 2022a-04-07]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>

COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. *COMSOL* [online] [cit. 2022b-04-10]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/>

Design and Engineering Simulation | SIMULIA – Dassault Systemes [online] [cit. 2022c-04-10]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/>

Document Library. *Japan Atomic Energy Agency Geological Isolation Research and Development* [online] [cit. 2022d-04-10]. Dostupné z: [https://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/index/l2\\_03.html](https://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/index/l2_03.html)

Document search – *Web of Science Core Collection*. *Clarivate* [online] [cit. 2022e-04-10]. Dostupné z: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>

Download centre. *Nagra* [online] [cit. 2022f-04-10]. Dostupné z: <https://www.nagra.ch/en/download-centre>

Grimsel Test Site publications list. *GTS Grimsel Test Site* [online] [cit. 2022g-04-01]. Dostupné z: <https://www.grimsel.com/media-and-downloads/grimsel-test-site-publications-list>

Nuclear Fuel Cycle. CAEA [online] [cit. 2022h-04-09]. Dostupné z: <http://www.caea.gov.cn/english/n6759365/n6759368/c6793479/content.html>

Publications. Mizunami Underground Research Laboratory [online] [cit. 2022i-04-10]. Dostupné z: [https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu\\_e/publ/publications.html](https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu_e/publ/publications.html)

Publications. SKB.com [online] [cit. 2022j-04-01]. Dostupné z: <https://www.skb.com/publications/>

Reports & Resources. AECL [online] [cit. 2022k-04-09]. Dostupné z: <https://www.aecl.ca/reports-resources/>

Tabulkový software Microsoft Excel. Microsoft 365 [online] [cit. 2022l-04-10]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/cs-cz/microsoft-365/excel>

Technical Reports – R&D. NUMO Web Site [online] [cit. 2022m-04-10]. Dostupné z: <https://www.numo.or.jp/en/>

The Äspö Hard Rock Laboratory. SKB.com [online] [cit. 2022n-04-10]. Dostupné z: <https://www.skb.com/research-and-technology/laboratories/the-aspö-hard-rock-laboratory/>

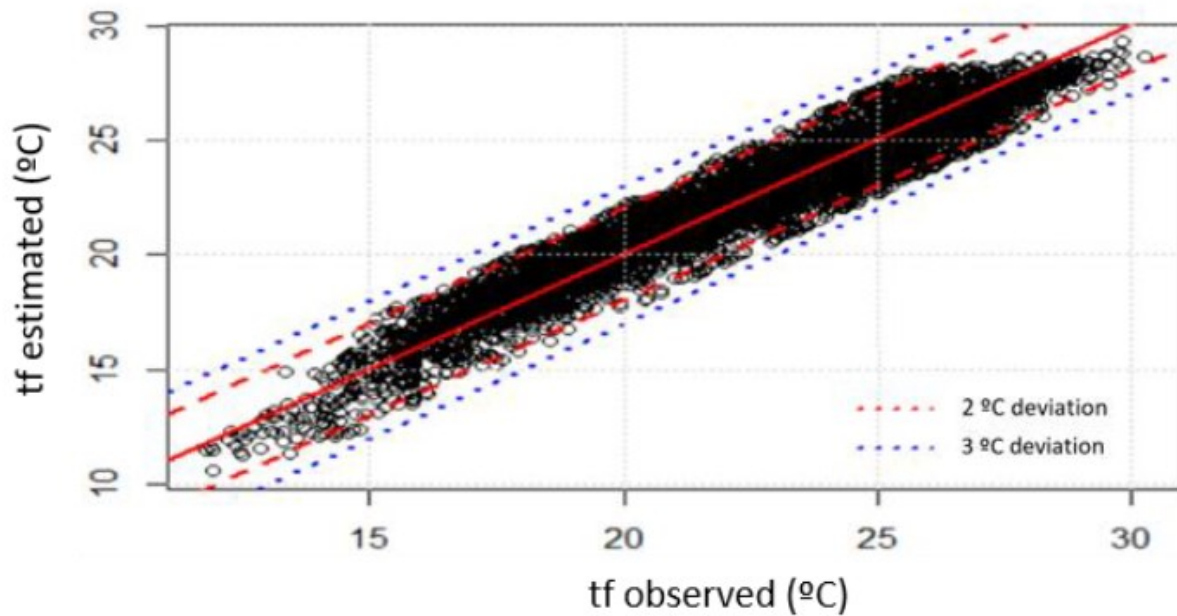
TVO – Reports and publications. Posiva [online] [cit. 2022o-04-10]. Dostupné z: <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>

Ventsim | 3D Mine Ventilation Design. [online] [cit. 2022o-04-07]. Dostupné z: <https://ventsim.com/>

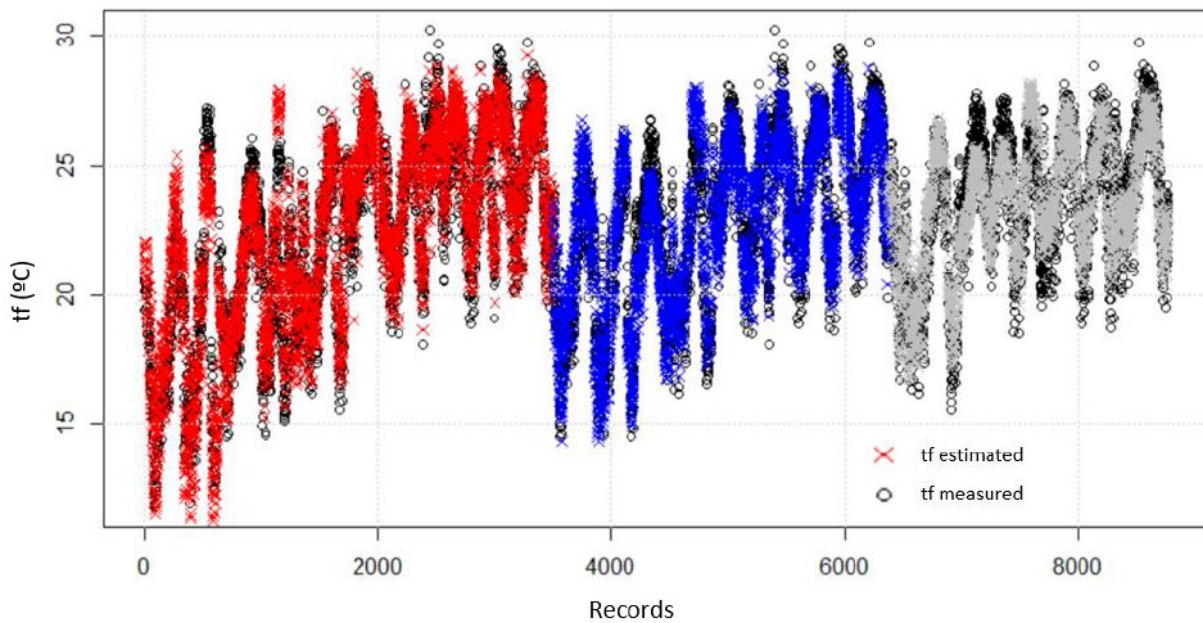


## Příloha 1

### Temperature Prediction Model in the Main Ventilation System of an Underground Mine

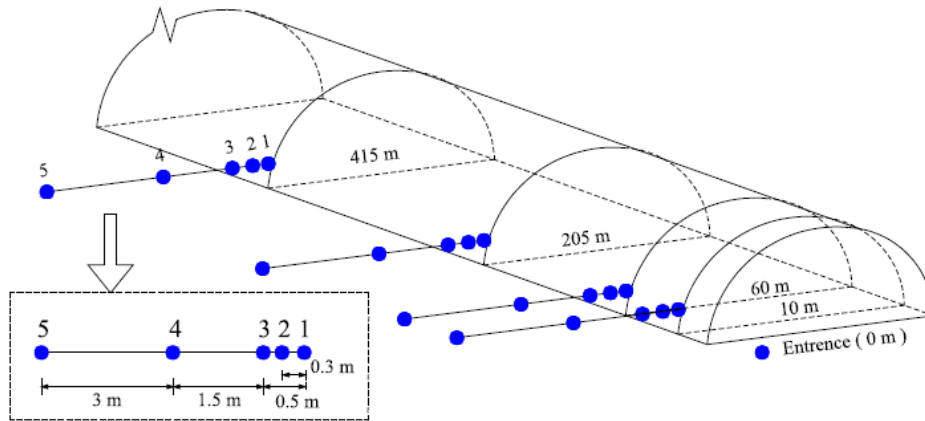


Obr. 103 Srovnání shody naměřených a spočtených hodnot teplot.

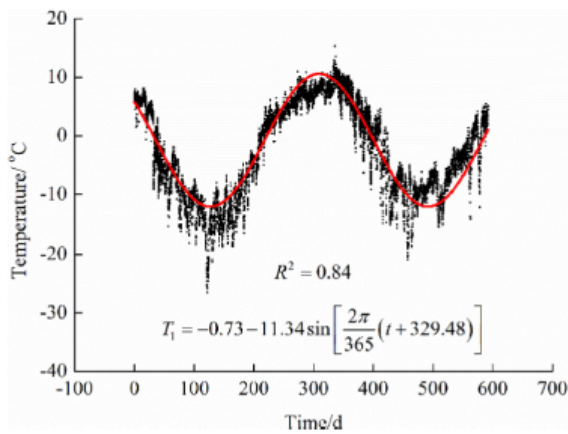


Obr. 104 Průběh teplot – srovnání naměřených (černě) a spočtených (barevně) hodnot. Jednotlivé barvy se liší použitou metodou aproximace.

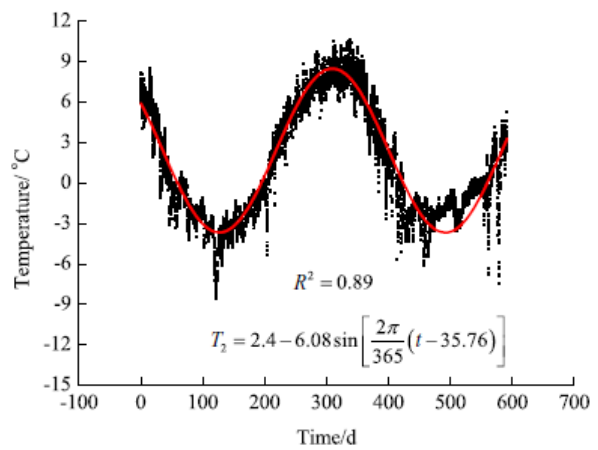
## Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel



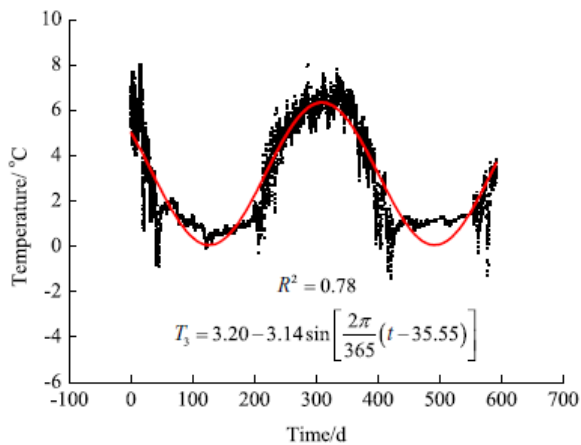
Obr. 105 Schéma teplotního měření v tunelu.



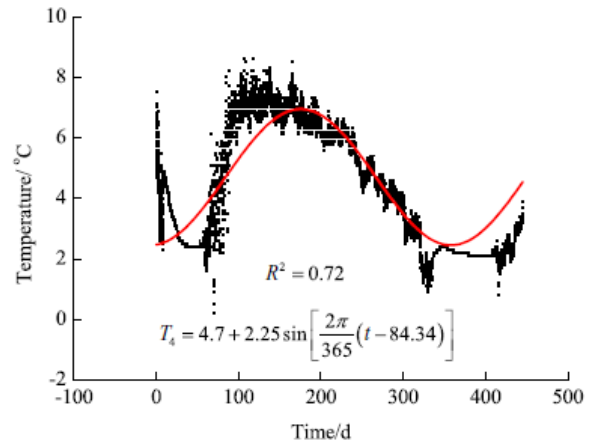
(a) Section 1



(b) Section 2



(c) Section 3



(d) Section 4

Fig. 3. Air temperature at each monitoring section.

Obr. 106 Průběh naměřených hodnot teplot vzduchu v tunelu (během 600 dnů) a aproximace dat periodickou funkcí.

## Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{U} \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{U} T) = \nabla \cdot \left( k_{eff} + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \nabla T, \quad (3)$$

Obr. 107 Rovnice zachování hmoty, momentu a energie.

$$\boldsymbol{\tau} = -(\mu + \mu_t) \left( \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} - \rho k \mathbf{I}], \quad (4)$$

$$\rho_{air} = 1.076 \times 10^{-5} T^2 - 1.039 \times 10^{-2} T + 3.326 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu_{air} = & 5.21 \times 10^{-15} T^3 - 4.077 \times 10^{-11} T^2 + 7.039 \times 10^{-8} T \\ & + 9.19 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (6)$$

$$k_{air} = 4.084 \times 10^{-10} T^3 - 4.519 \times 10^{-7} T^2 + 2.35 \times 10^{-4} T - 0.0147 \quad (7)$$

$$c_{p,air} = -4.647 \times 10^{-6} T^3 + 4.837 \times 10^{-3} T^2 - 1.599 T + 1175 \quad (8)$$

Obr. 108 Stavové rovnice veličin z rovnic na Obr. 107.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_B - \rho \varepsilon, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = & \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_B) \\ & - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (10)$$

Obr. 109 Transportní rovnice turbulentního modelu proudění.  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  jsou konstanty,  $G_k, G_B$  jsou zdroje turbulentní rychlostní, resp. vztlakové kinetické energie. Turbulentní viskozita  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ , kde  $C_\mu$  je konstanta modelu. Pro hodnoty odkazujeme na příslušnou publikaci.

Tab. 5 Popis veličin a parametrů z rovnic na Obr. 107 až Obr. 109.

veličina	označení	jednotka
rychlost tekutiny	$\mathbf{U}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
hustota tekutiny	$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
tlak	$p$	Pa
tenzor napětí	$\tau$	Pa
teplota	$T$	K
gravitační zrychlení	$\mathbf{g}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
měrná tepelná kapacita	$c_p$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná vodivost	$k_{eff}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná vodivost vzduchu	$k_{air}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$\text{Pr}_t$	1
dynamická viskozita tekutiny	$\mu$	Pa · s
jednotkový tenzor	$\mathbf{I}$	1
turbulentní kinetická energie	$k$	J
rychlost disipace	$\varepsilon$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

**Study on the Radial and Axial Temperature Fields of Coal Roadway under Seasonal Fluctuation Boundary**

$$\frac{\lambda_r}{\rho_r C_r} \frac{\partial T_r}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} \quad (1)$$

$$q = -\lambda_r \left. \frac{\partial T_r}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = h(T_r|_{\Gamma_1} - T_f) \quad (2)$$

$$T|_{\Gamma_2} = T_{gu}$$

$$T|_{t=0} = T_{gu}$$

$$T_f = \bar{T}_f + A_f \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} + \varphi\right) \quad (3)$$

Obr. 110 Rovnice vedení tepla (1) s okrajovými (2) a počátečními (3) podmínkami;  $\tau$  je 1 rok.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{T_r - \bar{T}_f}{T_{gu} - \bar{T}_f}; \\ R &= \frac{r}{r_0}; \\ Bi &= \frac{hr_0}{\lambda_r}; \\ Fo &= \frac{a_r t}{r_0^2}; \\ Fo_T &= \frac{a_r \tau}{r_0^2}; \\ \theta_{Af} &= \frac{A_f}{T_{gu} - \bar{T}_f} \end{aligned} \quad (4)$$

Obr. 111 Transformace veličin a zavedení Biotova a Fourierova čísla.

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=1} &= Bi(\theta|_{R=1} - \theta_f) \\ \theta|_{R=\infty} &= 1 \\ \theta|_{Fo=0} &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta_f = \theta_{Af} \cos\left(\frac{2\pi Fo}{Fo_T} + \varphi\right)$$

Obr. 112 Rovnice vedení tepla pro bezrozměrnou teplotu (5) s okrajovými a počátečními podmínkami (6).

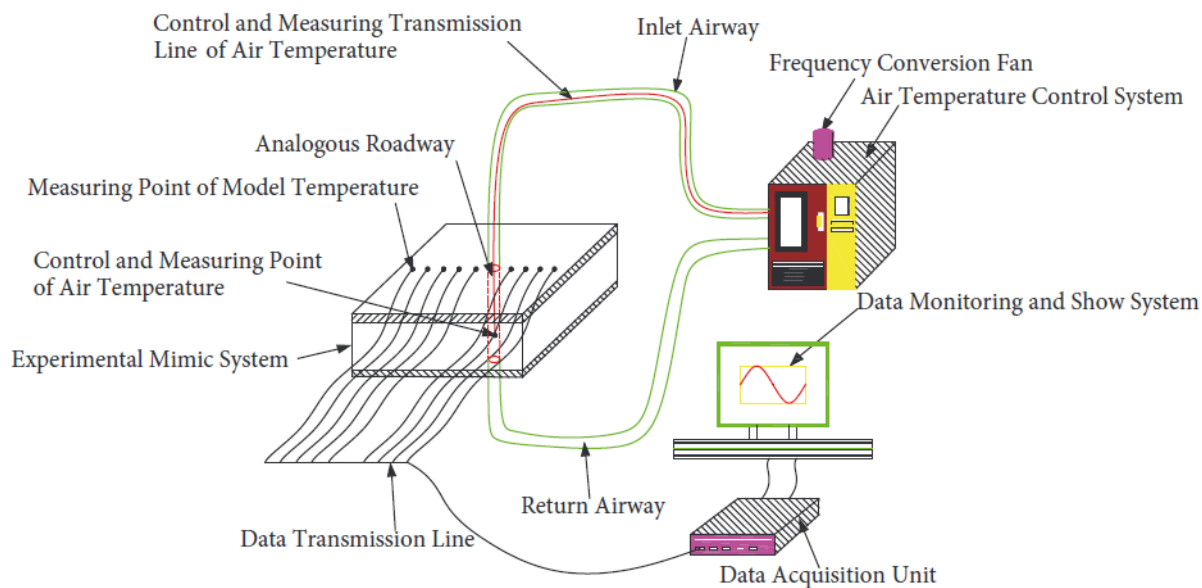
$$GC_f dT_{af} = qUdL$$

Obr. 113 Rovnice zachování tepla podél štoly.

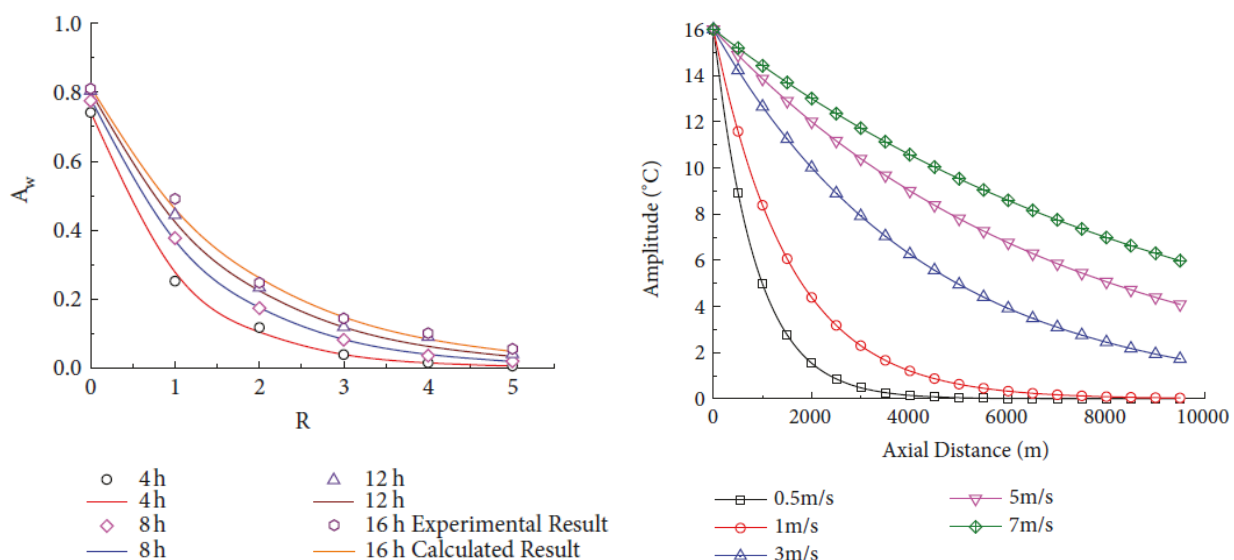
Tab. 6 Popis veličin a parametrů z rovnic na Obr. 110 až Obr. 113.

veličina	označení	jednotka
teplota masivu	$T_r$	$^{\circ}\text{C}$
tepelná vodivost horniny	$\lambda_r$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
hustota horniny	$\rho_r$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
tepelná kapacita horniny; vzduchu	$C_r, C_f$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
počáteční teplota masivu	$T_{gu}$	$^{\circ}\text{C}$
radiální hloubka	$r$	$\text{m}$
koeficient přestupu tepla	$h$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelný tok	$q$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
proměnná teplota vzduchu	$T_f$	$^{\circ}\text{C}$
průměrná teplota vzduchu/rok	$\bar{T}_f$	$^{\circ}\text{C}$
doba výměny tepla masiv-vzduch	$t$	$\text{s}$
amplituda teploty vzduchu	$A_f$	1
fázový posun teploty vzduchu	$\varphi$	rad
bezrozměrný přírůstek teploty	$\theta$	1
bezrozměrný poloměr	$R$	1
poloměr štoly; obvod štoly	$r_0, U$	$\text{m}$
tepelná difuzivita horniny	$a_r$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Biotovo číslo	$Bi$	1
Fourierovo číslo	$Fo$	1
bezrozměrná doba ročního cyklu	$Fo_T$	1
bezrozměrná amplituda fluktuace teploty	$\theta_{Af}$	1
tok vzduchu	$G$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$





Obr. 114 Experiment měření radiálního teplotního pole.



Obr. 115 Vlevo: Průběh amplitud tepelné vlny v radiálním směru podle vzdálenosti od stěny štoly pro různé dlouhé cykly. Vpravo: Průběh amplitud tepelné vlny v podélném směru podle vzdálenosti od ústí štoly pro různé rychlosti ventilace. Srovnání naměřených a spočtených hodnot.

## An Underground Air-Route Temperature Prediction Model for Ultra-Deep Coal Mines

$$\sum Q = G(i_2 - i_1)$$

Obr. 116 Zákon zachování energie (součet zdrojů tepla v důlním díle je roven rozdílu tepla ve ventilovaném vzduchu na výstupu a vstupu).

$$i = 1.005t + 0.001d(25016 + 1.884t)$$

Obr. 117 Vztah mezi entalpií vzduchu, teplotou vzduchu  $t$  a specifickou vlhkostí vzduchu  $d = f()$ . Pro podrobný popis odkazujeme na příslušnou pasáž v článku.

$$Q_{Shaft} = -0.976G(273 + t_1) \left[ \left( 1 + \frac{0.0124h}{101.325 + 0.012H} \right)^{0.286} - 1 \right]$$

$$Q_{Rock} = k_{\tau}UL(\bar{t}_{Rock} - \bar{t}_{Air})$$

$$Q_{Oxidation} = ULq_{Wall}$$

$$Q_{W.Face} = \alpha_F U_w L_w (\bar{t}_{Rock} - \bar{t}_{Air})$$

$$t_{Rock-1} = t_{Rock-0} + \frac{H_{Rock-0} - H_{Rock-1}}{G_R}$$

Obr. 118 Zdroje tepla v důlním díle (neuvádíme zde stavové rovnice tepelných zdrojů strojů).

When the ventiation time is less than 10 years

$$K_{\tau} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_g}{2\alpha R}} \cdot \left[ \frac{\lambda_g}{2R} + \frac{b}{2\sqrt{\tau} \left( 1 + \frac{\lambda_g}{2\alpha R} \right)} \right] \\ 0.5 \frac{\lambda_g^{0.65} (C_g \gamma_g)^{0.2} \alpha^{0.15}}{R^{0.4} \tau^{0.2}} \end{array} \right.$$

When the ventiation time is more than 10 years

Obr. 119 Výpočet koeficientu přestupu tepla v závislosti na době ventilace  $\tau$ .

Tab. 7 Popis veličin a parametrů z rovnic na Obr. 116 až Obr. 119.

veličina	označení	jednotka
entalpie vzduchu na vstupu; výstupu	$i_1; i_2$	J. kg <sup>-1</sup>
výška šachty	$h$	m
specifická vlhkost vzduchu	$d$	1
hloubka pozice ústí šachty	$H$	m
teplota vzduchu na povrchu	$t_1$	°C

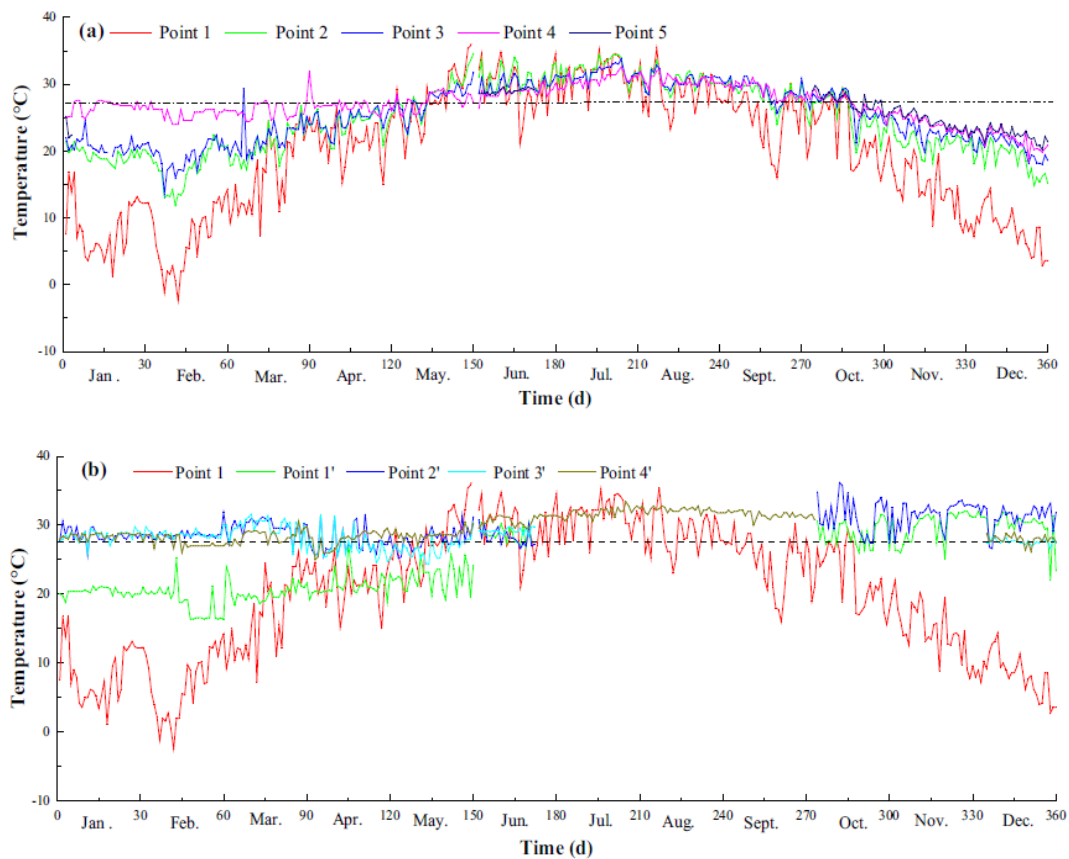
veličina	označení	jednotka
výkon ventilace	$G$	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
teplota masivu v bodě 1	$t_{Rock-1}$	$^{\circ}\text{C}$
konstantní teplota masivu pod povrchem	$t_{Rock-0}$	$^{\circ}\text{C}$
hloubka bodu 1	$H_{Rock-1}$	m
hloubka vrstvy s konstantní teplotou (cca 15-50 m)	$H_{Rock-0}$	m
geotermální gradient	$G_R$	$\text{m} \cdot \text{K}^{-1}$
(nestacionární) koeficient přestupu tepla	$k_{\tau}$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
obvod štoly; čerstvé rozrážky	$U; U_w$	m
doba ventilace	$\tau$	h
délka štoly; čerstvé rozrážky	$L; L_w$	m
plocha průřezu štolou	$S$	$\text{m}^2$
průměrná teplota masivu; vzduchu na koncích štoly	$\bar{t}_{Rock}; \bar{t}_{Air}$	$^{\circ}\text{C}$
tepelná vodivost horniny	$\lambda_g$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
tepelná kapacita horniny	$C_g$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
hustota horniny	$\rho_g$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
drsnost horniny	$\varepsilon$	1
koeficient přestupu tepla ze stěny štoly	$\alpha \sim \frac{2\varepsilon G^{0.8} U^{0.2}}{S}$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
koeficient přestupu tepla z čelby	$\alpha_f$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
hydraulický rádius štoly	$R = 0.564\sqrt{S}$	m
koeficient ukládání tepla	$b = 2 \sqrt{\frac{\lambda_g C_g \rho_g}{\varepsilon}}$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-\frac{1}{2}}$

## Effects of seasonal air temperature variation on airflow and surrounding rock temperature of mines

**Table 2** Correlations between surface air temperatures and temperatures recorded at underground MPs

Location	Correlation coefficient	Correlation
1-2	0.950	Correlated
1-4	0.923	Correlated
1-5	0.755	Correlated
1-7	0.551	Uncorrelated
1-1'	0.409	Uncorrelated
1-2'	0.373	Uncorrelated
1-3	0.294	Uncorrelated
1-3'	0.647	Correlated

Obr. 120 Koeficienty korelace mezi teplotou vzduchu na povrchu a v podzemních stanovištích (ukázka).

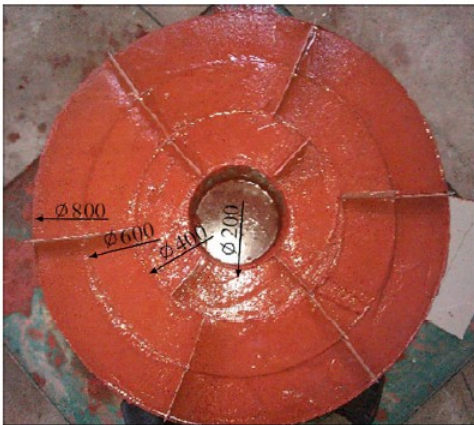


Obr. 121 Roční průběh teplot vzduchu na (a) vstupní cestě a (b) výstupní cestě ventilací.

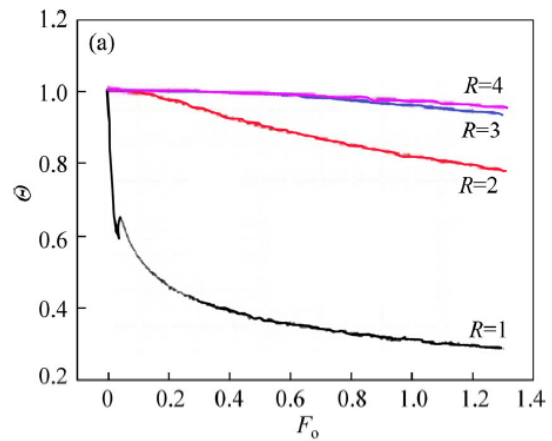
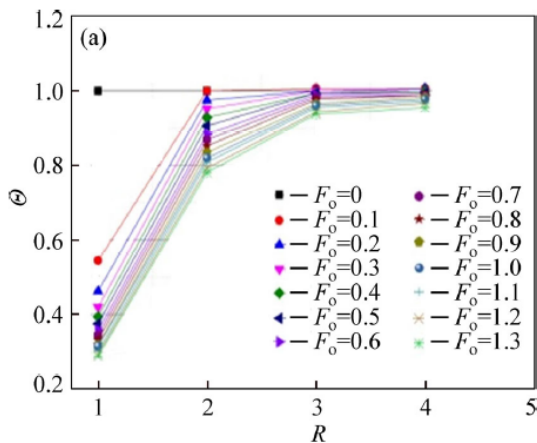
## Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation

$$\begin{cases} \Theta = (t - t_f) / (t_0 - t_f) \\ R = r / r_0 \\ F_o = a\tau / r_0^2 \end{cases}$$

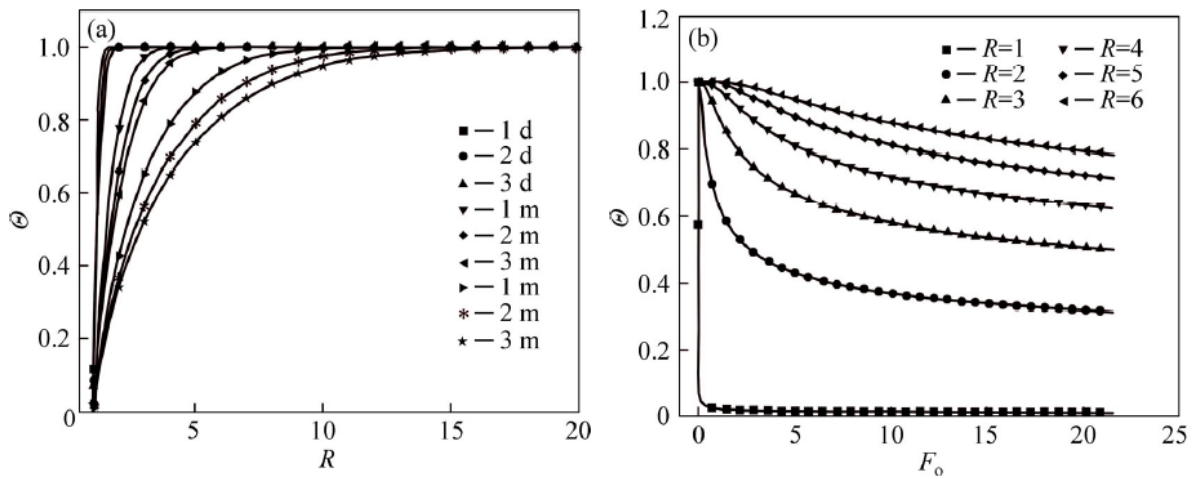
Obr. 122 Bezrozměrné veličiny: teplota  $\Theta$ , rádius  $R$ , čas  $F_o$  ( $t$  je teplota masivu,  $t_0$  je počáteční teplota masivu,  $r$  je radiální souřadnice od středu štoly,  $r_0$  je poloměr štoly,  $a$  je tepelná difuzivita štoly,  $\tau$  je čas ventilace).



Obr. 123 Zmenšený model štoly s okolní horninou.



Obr. 124 Vlevo: závislost bezrozměrné teploty na bezrozměrném poloměru. Vpravo: závislost bezrozměrné teploty na bezrozměrném čase. Naměřené hodnoty.



Obr. 125 Vlevo: závislost bezrozměrné teploty na bezrozměrném poloměru. Vpravo: závislost bezrozměrné teploty na bezrozměrném čase. Simulace.

**Table 1** Relation formula between dimensionless temperature and dimensionless radius

$F_0$	Fitting formula	Goodness-of-fit index
0.1	$\Theta = -8.4323 \exp(-3.4308R) + 1.0001$	1
0.2	$\Theta = -3.3037 \exp(-2.263R) + 1.0019$	0.9999
0.3	$\Theta = -2.4363 \exp(-1.8246R) + 1.0053$	0.9989
0.4	$\Theta = -2.1407 \exp(-1.6191R) + 1.0039$	0.9934
0.5	$\Theta = -1.8037 \exp(-1.3969R) + 1.0066$	0.9942
0.6	$\Theta = -1.7686 \exp(-1.3489R) + 1.0006$	0.9929
0.7	$\Theta = -1.6228 \exp(-1.2314R) + 1.0031$	0.9944
0.8	$\Theta = -1.6346 \exp(-1.2002R) + 0.9974$	0.9932

**Table 2** Relation formula between dimensionless temperature and dimensionless time

$R$	Fitting formula	Goodness-of-fit index
1	$\Theta = -1.3104 / (F_0^{-0.4087} + 1.2757) + 1.0652$	0.9969
2	$\Theta = -0.4809 / (F_0^{-1.5355} + 1.5408) + 1.0030$	0.9973
3	$\Theta = -0.0688 / (F_0^{-2.3911} + 0.3333) + 0.9960$	0.9432
4	$\Theta = -0.0495 / (F_0^{-1.9472} + 0.4576) + 1.0004$	0.9126

Obr. 126 Vlevo: funkční závislost bezrozměrné teploty na bezrozměrném poloměru s koeficientem korelace. Vpravo: funkční závislost bezrozměrné teploty na bezrozměrném čase s koeficientem korelace. Simulace.

**A robust numerical method for modeling ventilation through long tunnels in high temperature regions based on 1D pipe model**

$$\phi \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}) = Q_m \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu_w} (\nabla P - \rho_w \mathbf{g} \nabla z) \quad (2)$$

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,w} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q \quad (3)$$

$$(\rho C_p)_{eff} = (1 - \phi) \rho_r C_{p,r} + \phi \rho_w C_{p,w} \quad (4)$$

$$k_{eff} = (1 - \phi) k_r + \phi k_w \quad (5)$$

$$\mathbf{q}_{fr} = -\frac{\kappa_{fr}}{\mu_w} d_{fr} (\nabla_T P + \rho_w \mathbf{g} \nabla_T z) \quad (6)$$

$$d_{fr} \phi \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla_T (\rho_w \mathbf{q}_{fr}) = d_{fr} Q_m \quad (7)$$

$$d_{fr} (\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + d_{fr} \rho_w C_{p,w} \mathbf{u} \cdot \nabla_T T = \nabla_T (d_{fr} k_{eff} \nabla_T T) + d_{fr} Q \quad (8)$$

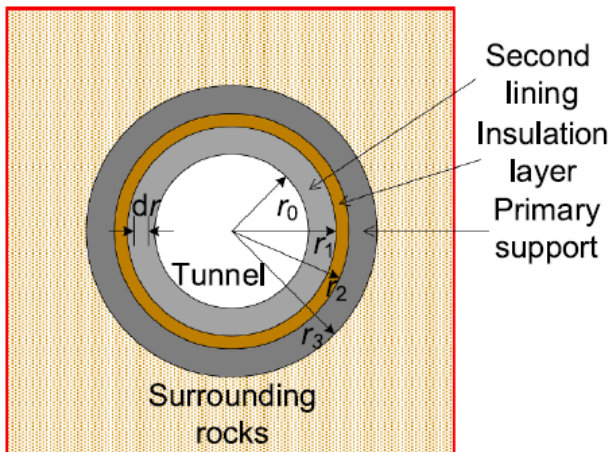
Obr. 127 Rovnice, popisující proudění a přenos tepla v horninovém masivu: (1) Darcyho zákon, (2) Darcyho rychlost, (3) rovnice tepelné konvekce-difúze, (4) objemová tepelná kapacita horniny, (5) efektivní tepelná vodivost horniny, (6) Darcyho zákon pro puklinové proudění, (7), (8) rovnice kontinuity pro puklinové proudění.

$$\rho_a A C_{p,a} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a A C_{p,a} \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot A k_a \nabla T = f_D \frac{\rho_a A}{2d_h} |u|^3 + Q_{wall} \quad (9)$$

$$Q_{wall} = h_{eq} (T_r - T_a) \quad (12)$$

$$h_{eff} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0 h_{eq}} + \frac{\ln(r_1/r_0)}{k_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_i} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_p}} \quad (23)$$

Obr. 128 Rovnice, popisující proudění a přenos tepla ve štolě: (9) zákon zachování energie pro 1D proudění vzduchu, (12) rovnice přestupu tepla mezi horninou a štolou, (23) koeficient přestupu tepla pro tunel kruhového průřezu (se třemi vrstvami obložení – viz Obr. 129).

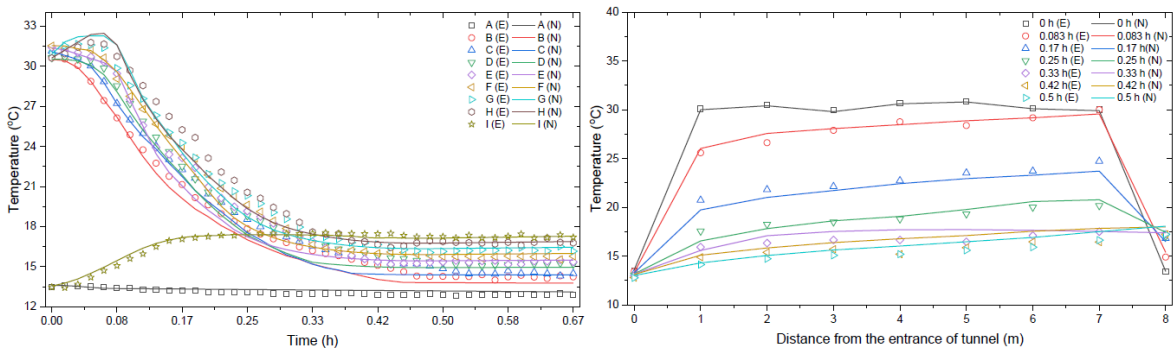


Obr. 129 Řez tunelem se třemi vrstvami obložení.

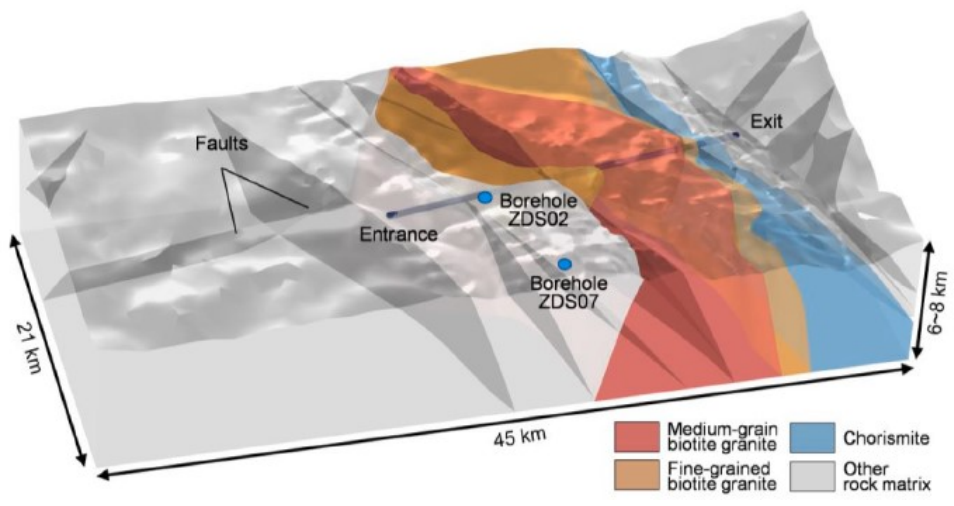


Tab. 8 Popis veličin a parametrů z rovnic na Obr. 127 a Obr. 128.

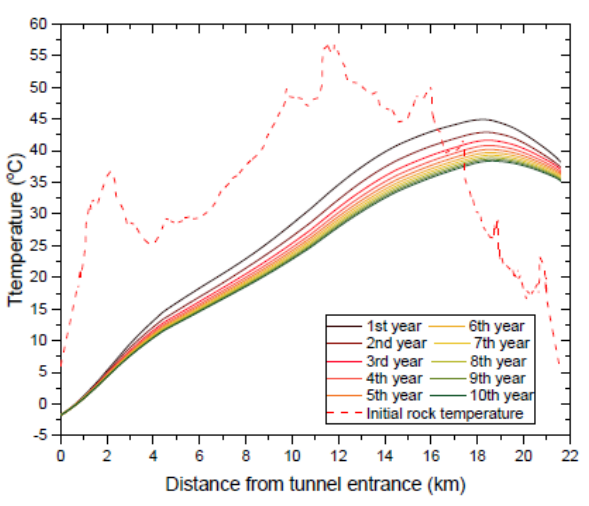
Veličina	označení	Jednotka
porozita horniny	$\phi$	1
hustota vody; horniny; vzduchu	$\rho_w; \rho_r; \rho_a$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
zdroj vody	$Q_m$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
vektor rychlosti proudění	$\mathbf{u}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
permeabilita horniny; pukliny	$\kappa; \kappa_{fr}$	$\text{m}^2$
dynamická viskozita vody	$\mu_w$	$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
gravitační zrychlení	$\mathbf{g}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
výšková souřadnice	$z$	m
hydraulický tlak	$P$	Pa
měrná tepelná kapacita vody; horniny; vzduchu	$C_{p,w}; C_{p,r}; C_{p,a}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
teplota; teplota vzduchu; horniny	$T; T_a; T_r$	$^{\circ}\text{C}$
tepelný zdroj v masivu; na stěně štoly (přestup)	$Q; Q_{wall}$	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
koeficient přestupu tepla	$h_{eff}$	
měrná tepelná vodivost vody; horniny; vzduchu	$k_w; k_r; k_a$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
objemový tok jednotkou délky pukliny	$\mathbf{q}_{fr}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
rozevření pukliny	$d_{fr}$	M
průřez štoly	$A$	$\text{m}^2$
průměrná rychlost proudění vzduchu ve štole	$u$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
hydraulický poloměr; Omočený obvod	$d_h = 4 \frac{A}{Z}; Z$	m
Darcyho součinitel ztráty třením	$f_D = f \left( Re, \frac{e}{d_h} \right)$	1
relativní drsnost	$e$	1
Reynoldsovo číslo	$Re$	1



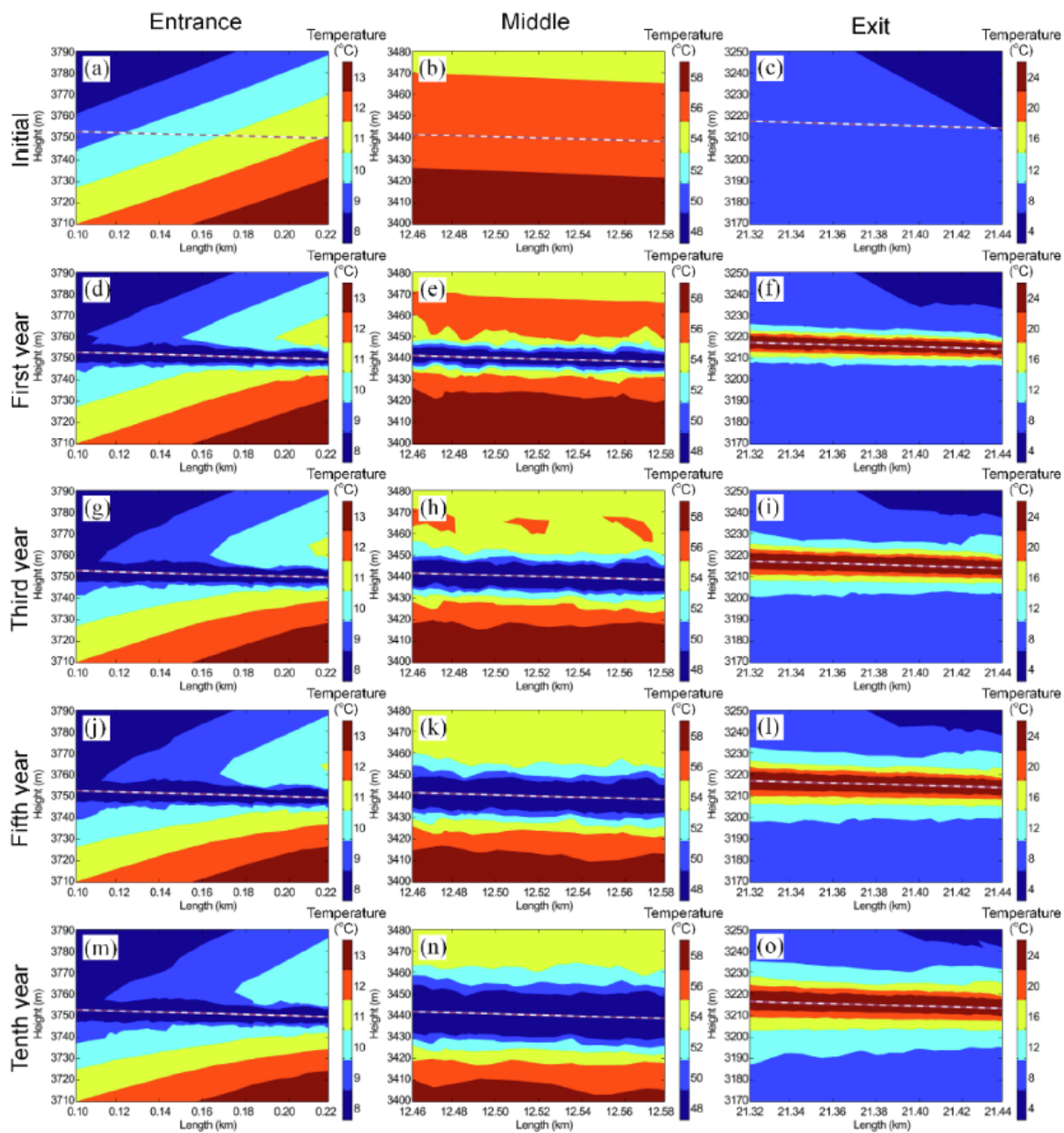
Obr. 130 Vlevo: Časový vývoj teplot v tunelu v 9 měřících bodech. Vpravo: Profil teplot podél tunelu v různých časech. Srovnání měření (body) a simulace (čáry).



Obr. 131 Geologický model okolí tunelu.

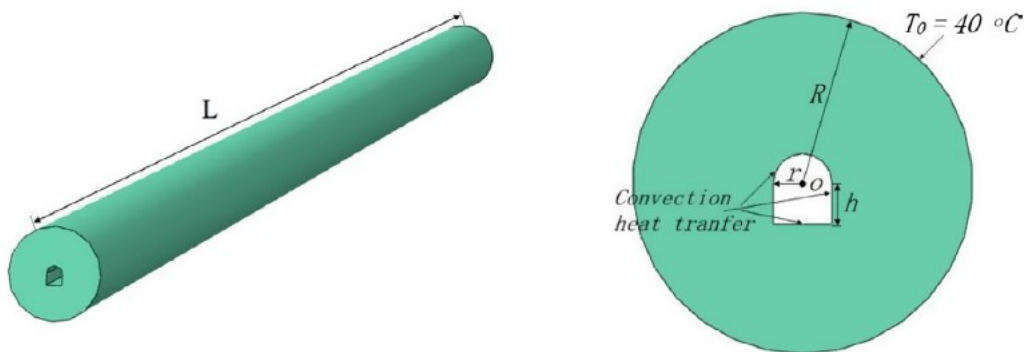


Obr. 132 Podélný profil teplot vzduchu v tunelu pro různé časy (výsledky simulace).

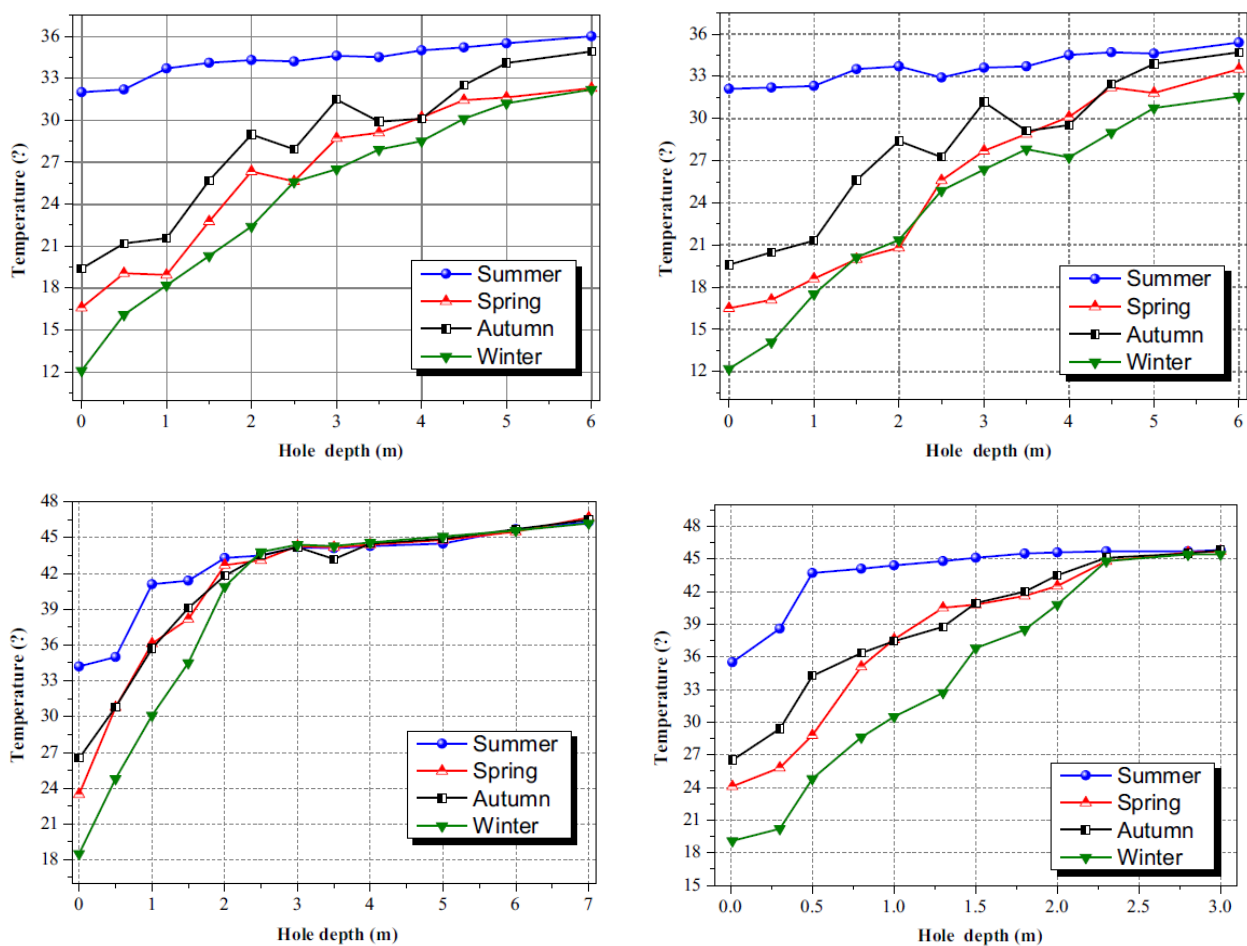


Obr. 133 Rozložení teplotního pole ve třech různých úsecích tunelu v různých časech. Svislé podélné řezy.

## Using seasonal temperature difference in underground surrounding rocks to cooling ventilation airflow: A conceptual model and simulation study



Obr. 134 Vlevo: geometrie 3D modelu štolý a okolní horniny. Vpravo: řez štolou.



Obr. 135 Profily teplot podél vrtů v různých ročních obdobích. Výběr vrtů 1-1 (vlevo nahoře), 1-5 (vpravo nahoře), 1-2 (vlevo dole), 1-3 (vpravo dole). Pozn.: Změna teplot mezi podzimem a zimou je větší než mezi zimou a jarem, což autoři shrnují do hypotézy, že masiv se snáze ochlazuje, než zahřívá – s čímž ovšem nekorespondují rozdíly jaro/léto a léto/zima. Spíše asi záleží na volbě časového období, pro které zvolili reprezentativní křivku teplot.

**Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) (r \geq R, t > 0) \quad (1)$$

$$T(r, x, t) = T_w (r \geq R, t = 0) \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_f) (r = R, T > 0) \quad (3)$$

Obr. 136 Rovnice vedení tepla (1) s okrajovými podmínkami (2) a (3).

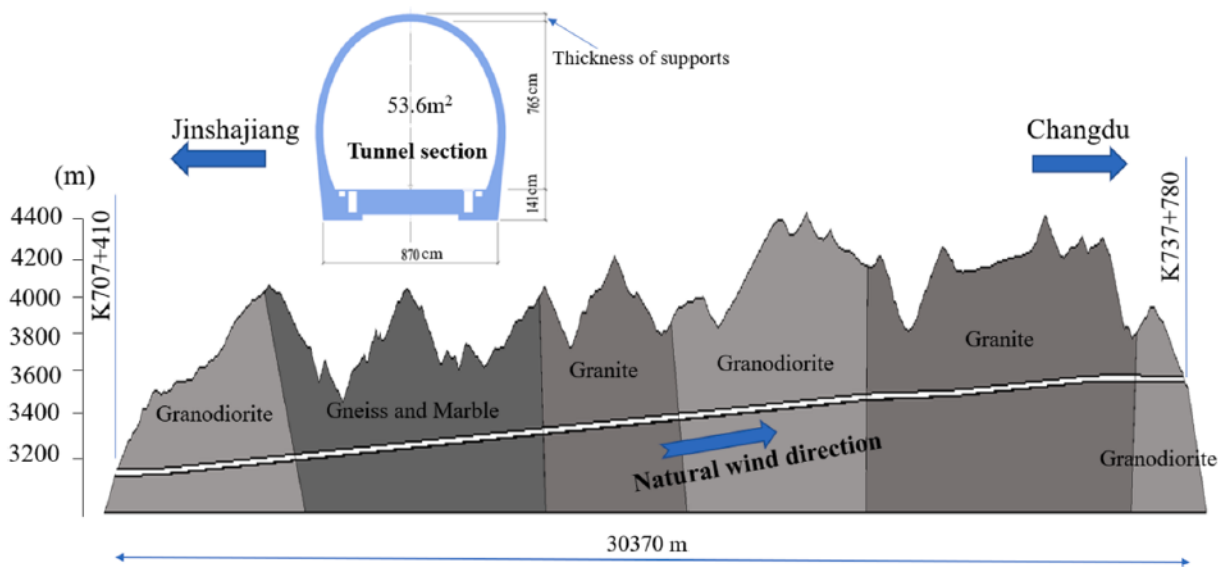
$$\rho_f A c \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = hU(T_b - T_f) (\tau = 0) \quad (4)$$

$$T_f(x, \tau) = T_b (\tau = 0) \quad (5)$$

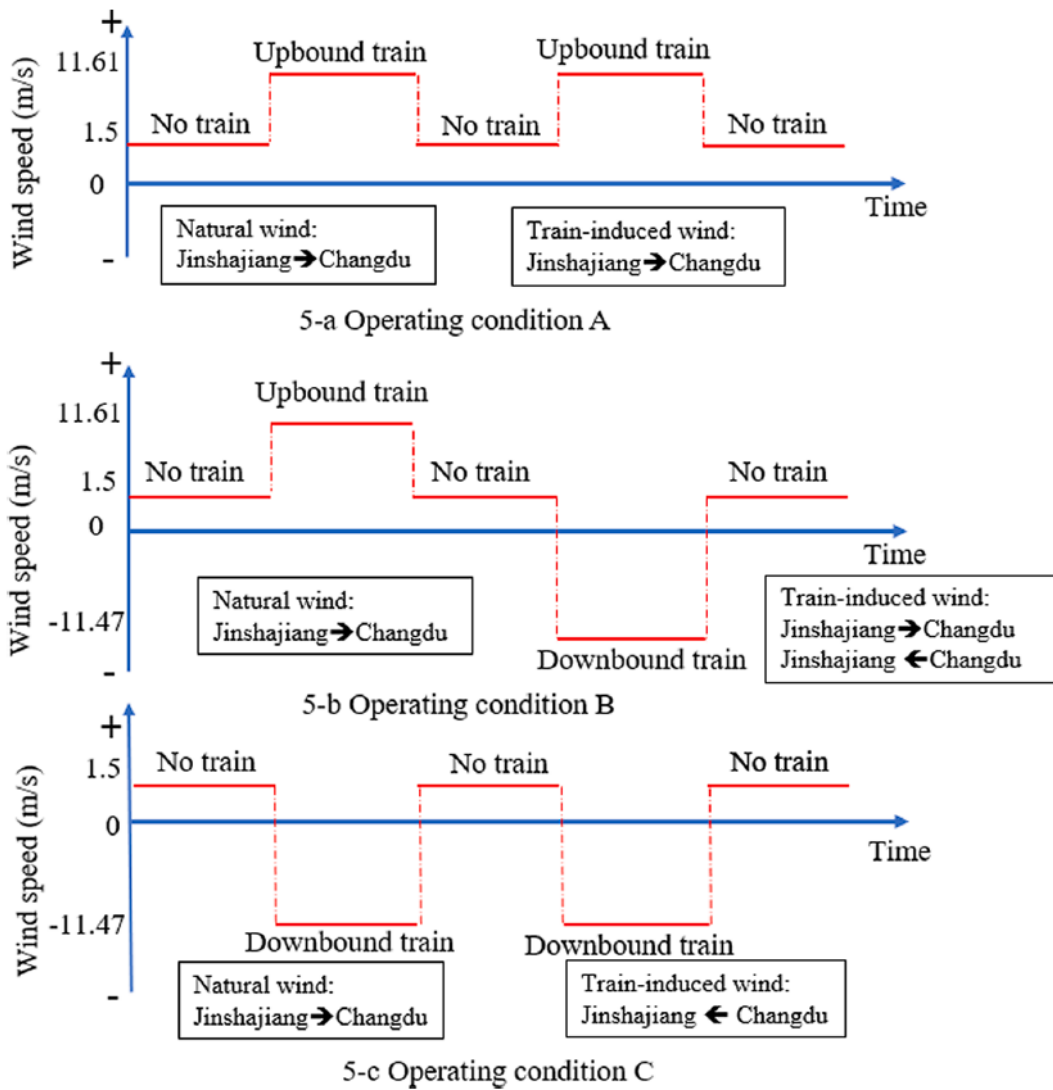
Obr. 137 Rovnice pro neustálené podélné proudění (4) s okrajovou podmínkou (5).

Tab. 9 Popis veličin a parametrů z rovnic na Obr. 136 a Obr. 137.

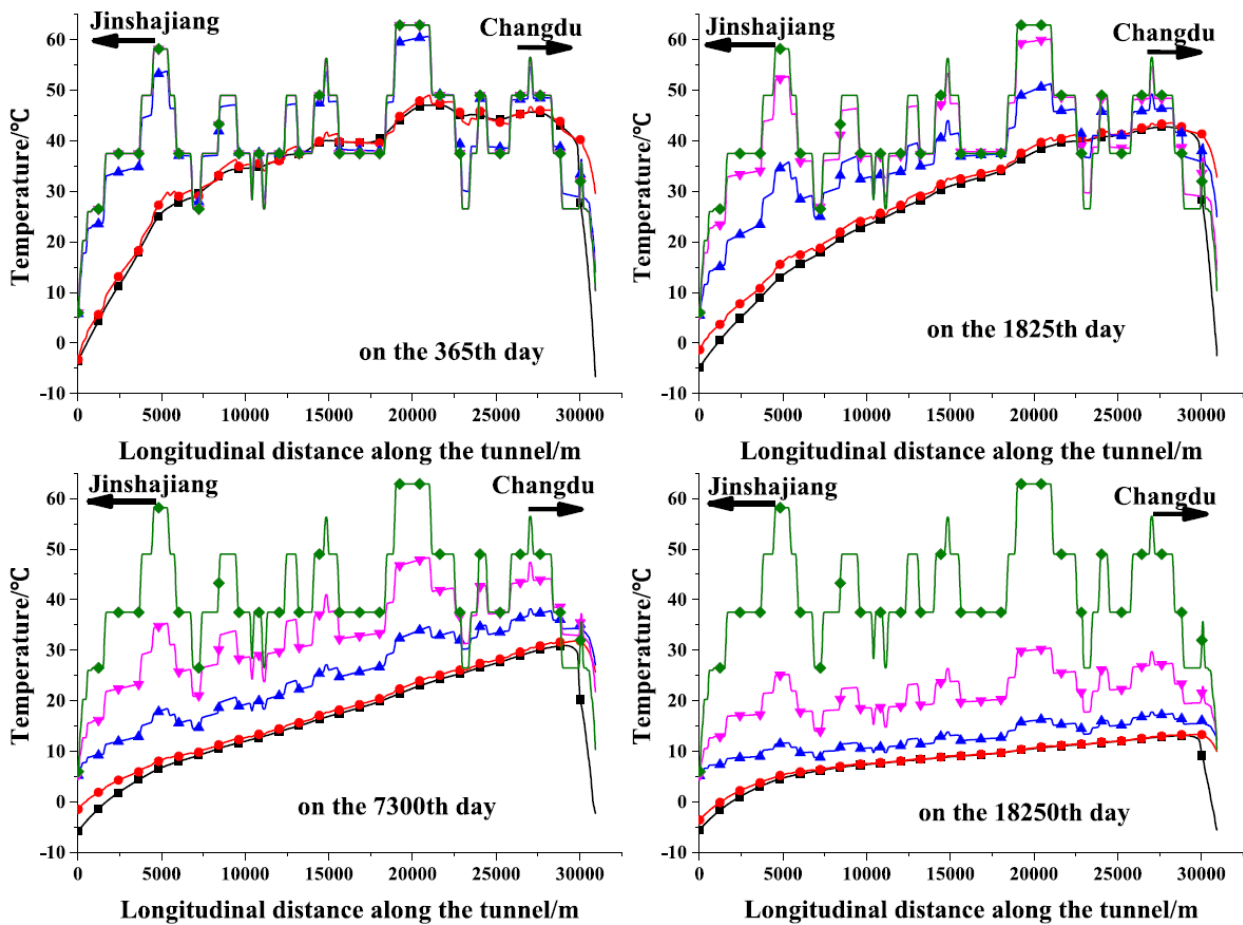
Veličina	označení	Jednotka
teplota horniny; větru; počáteční teplota horniny	$T; T_f; T_w$	°C
radiální souřadnice	$r$	m
čas	$t$	s
hustota horniny; vzduchu	$\rho; \rho_f$	kg. m <sup>-3</sup>
koeficient přestupu tepla	$h$	W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup>
měrná tepelná kapacita horniny; vzduchu	$c_p; c$	J. m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
tepelná vodivost horniny	$\lambda$	W. m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
teplota na stěně tunelu	$T_b$	°C
průměr tunelu	$U$	m
plocha průřezu tunelem	$A$	m <sup>2</sup>
rychlost větru	$v$	m. s <sup>-1</sup>



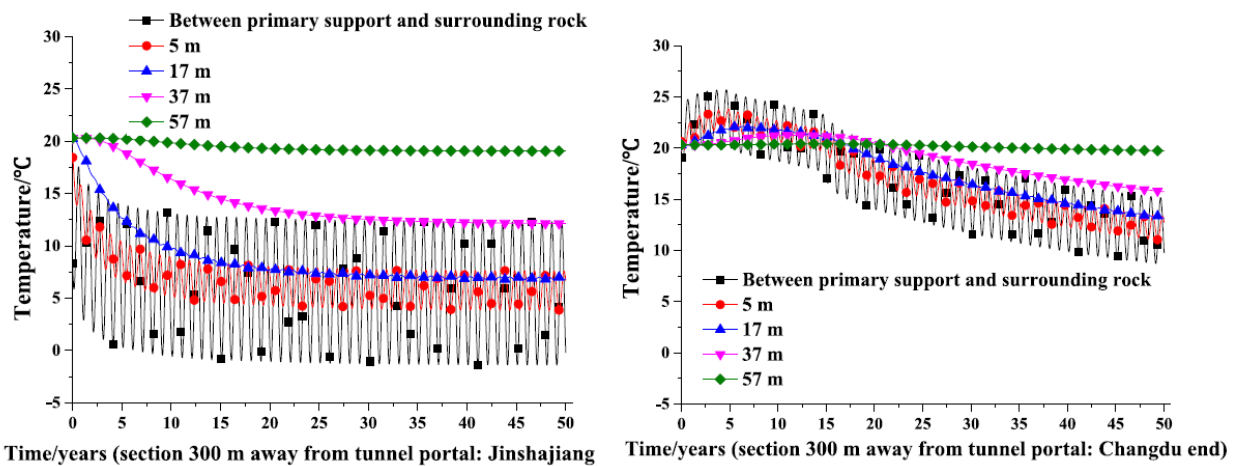
Obr. 138 Geologický profil podél tunelu.



Obr. 139 Rychlost proudění vzduchu v tunelu a její změny v důsledku projíždějících vlaků.



Obr. 140 Teplotní profily podél tunelu v různých hloubkách masivu: 1, 11, 28, 37 m + původní teplota masivu (zeleně); v časech: 1, 5, 20, 50 let provozu.



(b) Condition B (the direction of the natural wind remains unchanged, and the train runs alternately)

Obr. 141 Simulace časového vývoje teplot v kontrolních bodech v různých hloubkách masivu. Varianta provozu B (viz Obr. 139 uprostřed).





**SÚRAO**

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ  
RADIOAKTIVNÍCH  
ODPADŮ

NAŠE  
BEZPEČNÁ  
BUDOUCNOST

[www.surao.cz](http://www.surao.cz)