

Nová metóda merania tepelného toku

Slávka Grexová¹

New methode of measurement of temperature flow

The subject of this article is a measurement of thermal flow under laboratory conditions. We define the thermal flow as an amount of heat transmitted through a surface of rock over a certain period of time.

According to the Atlas of Geothermal Energy, thermal flow ranges from 40 to 120 mW/m². It is not possible to measure it directly on the rock surface. The conventional ways of measurement is a "separation bar" thermic conduction measurement system or measurement of the temperature of the rock in two different places at selected underground depth intervals.

These measurements and analyses are not sufficient to make a final conclusion. It is necessary to repeat the measurements under real conditions.

Key words: thermal flow, accumulator, thermostat, geothermal energy

Úvod

Geotermálna energia má pôvod v horúcom jadre Zeme, z ktorého uniká teplo cez vulkanické pukliny v horninách vo forme tekutej hmoty – magmy.

V celosvetovom meradle sa geotermálna energia využíva v nepatrnnej miere, pričom v oblasti Islandu je najviac využívaná transformácia tejto energie na elektrickú. Relatívne vo väčšej miere sa využíva na vykurovanie bytov, skleníkov ale najviac v termálnych kúpaliskách.

Dostupné geotermálne zdroje sú na miestach, kde je relatívne tenká zemská kôra, alebo kde bola porušená tektonickými pochodmi a vulkanickou aktivitou za posledných 10 miliónov rokov aj s jej postvulkanickými prejavmi a recentnou vulkanickou aktivitou (Rybár, 1998).

Geotermálna energia

Slovo geotermia pochádza z gréčtiny: „Ge“ v gréčtine znamená Zem a slovo „therma“ znamená teplo. Geotermika sa teda zaoberá vnútorným teplom Zeme.

V 10 km vrstve zemského obalu, ktorá je dostupná súčasnej vrtacej technike, sa nachádza dostatok energie na pokrytie našej spotreby tepla na obdobie niekoľko 100 až 1 000 rokov. Problém spočíva v tom, ako z tohto zdroja ekonomicky ťažiť. Teplo postupuje zo žeravého zemského jadra smerom k povrchu. Teplotný gradient sa pohybuje od 20 do 40 °C na vertikálny kilometer s miestnymi maximami (geotermálne pramene). V hĺbke zhruba 2500 metrov sa však často nachádza voda teplá až 200 °C. Teplotný gradient je miera narastania teploty v závislosti od hĺbky. Na našej planéte dosahujú priemerné hodnoty spravidla rast teploty o 3°C na 100 m hĺbky. To znamená, že keď navštívime vrt do hĺbky 200 m, tepelná hodnota bude o 6°C vyššia ako na povrchu Zeme. To platí vo väčšej časti našej planéty, avšak v zónach hraničiacich s platňami môže geotermický gradient dosiahnu oveľa vyššie hodnoty, a to až 100°C na 100 m. (Rybár, P., Sasvári, T., 1998).

K prínosu tepelnej energie z hĺbky v dôsledku prúdenia tepla cez zlomy, dochádza k tzv. tepelnému toku, ktorý je definovaný ako množstvo tepla prestupujúceho plochou horniny za určitý čas.

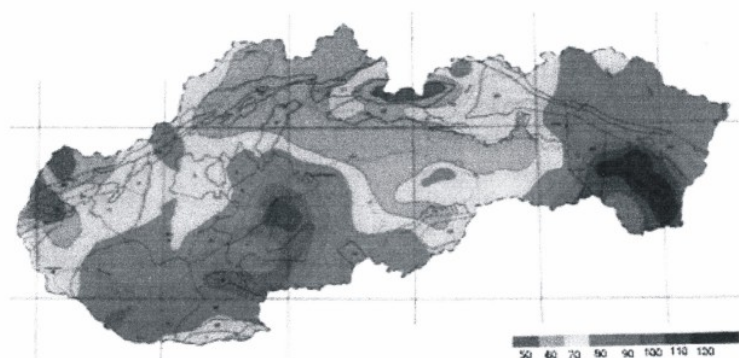
Prehľad o doterajších poznatkoch tepelného toku - technické problémy merania tepelného toku

Hodnoty tepelného toku na Slovensku podľa Atlasu geotermálnej energie sa pohybujú v rozmedzí od 40 – 120 mW/m² (obr.1). Maximálne hodnoty nad 90 mW/m² boli namerané v oblasti stredoslovenských neovulkanitov a v centrálnej časti podunajskej panvy.

Vieme, že tepelný tok závisí predovšetkým od tepelnej vodivosti hornín a je priamo úmerný tepelnému gradientu, čo znamená, že smeruje z miesta s vyššou na miesta s nižšou teplotou. Teda, najvyššie množstvo tepelného toku sa nachádza vo vnútornom jadre Zeme a smerom k zemskému povrchu sa znižuje.

Tepelný tok možno definovať ako množstvo energie tepelného výkonu, ktoré prejde jednotkou plochy.

¹ Ing Slávka Grexová, PhD., GEOSlovakia, s r.o., Košice, hydrogeologia@geoslovakia.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 19. 3. 2008)



Obr. 1. Mapa hustoty povrchového tepelného toku na Slovensku.
Fig. 1. Map of heat flow in Slovakia.

Meranie tepelného toku Zeme priamo na zemskom povrchu nie je možné uskutočniť. Príčinou je skutočnosť, že povrch Zeme je okrem tepelného toku z vnútra Zeme veľmi silne ovplyvnený energetickou bilanciou atmosféry zemského povrchu, kde dopadá slnečné žiarenie, ktoré je nerovnomerne rozložené od severného, južného pólu až po rovník. Okrem toho rôzne časti zemského povrchu pohlcujú respektíve odrazia značnú časť slnečnej energie na kontinentoch a na vodných plochách svetových oceánov. K tomu sa pridružuje aj výparné teplo spotrebované v povrchových oblastiach oceánov. Na základe tejto skutočnosti sú extrémne rozdiely v rôznych miestach zemegule, kde vzdušná masa má obrovskú diverzifikáciu akumulovanej teploty voči absolútnej nule Kelvinovej stupnice teploty respektíve voči nule Celsiovej stupnice, ktorá je odvodená od bodu mrazu. Okrem tejto skutočnosti dochádza aj k obrovskému pohybu vzdušných mäs medzi jednotlivými oblasťami zemskej atmosféry nad povrchom Zeme v dôsledku uvedenej diverzifikácie. Keď si zoberieme hrubý odhad rozdielu priemerných teplôt povrchu Zeme na severnom a južnom póle a v rovníkovej oblasti (asi 100 K), tak je samozrejmé, že tieto tepelné toky nemôžu byť exaktne merané na povrchu Zeme. (Sazima, M., 1971).

Doterajšie spôsoby merania tepelného toku spočívali v meraní tepelnej vodivosti na dvoch miestach vrtu v laboratórnych podmienkach, metódou divided - bar. Tepelný tok môžeme vypočítať na základe vzťahu

$$q = \lambda \cdot dT \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (2)$$

kde q – hustota tepelného toku [W m^{-2}],
 λ – súčiniteľ tepelnej vodivosti [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$],
 dT – tepelný gradient [K.m^{-1}].

Tento vzťah by bolo možné teoreticky aplikovať len v hlbinných vrtoch, pretože v baniach by sme potrebovali určiť bezpečnú vzdialenosť v masíve od steny banského diela, kde by sme mali umiestnený merací snímač. Ťažko by sme tiež mohli určiť tepelnú vodivosť hornín medzi dvoma horizontmi banského diela, ktoré predstavujú až 50 m. Horniny sú veľmi inhomogénne a z 50 m vzdialenosti by sme nevedeli vybrať reprezentatívne vzorky na určenie vodivosti v laboratórnych podmienkach. Zdanlivo riešiteľnejší problémom je meranie tepelného toku Zeme vo vrtoch, kde by sme mohli teoreticky namerať pri hĺbení vrtu teplotu napríklad v hĺbke 300 a 310 m. Tým by sme dostali tepelný gradient v rozdielnych hĺbkach 10 m, čo predstavuje pri geotermálnom stupni 30 m tepelný gradient 0,03 K / m. To znamená, že teplotné rozdiely medzi nameranými hodnotami teploty v rozdieloch hĺbok 1 m, by museli predstavovať citlivosť snímača kvôli presnosti merania aspoň o jeden rád vyššie, t.j. aspoň 0,003 K.

Keďže tepelná vodivosť sa určuje v laboratórnych podmienkach, na základe toho by muselo byť vytiahnuté celé jadro medzi dvoma úsekmi merania. Čím väčší bude tento hĺbkový interval, tým väčší by musel byť problém maximálnej výťažnosti jadra pri jadrovom hlbinnom vrtaní. V porušených horninách sa často nedostane von ani 60 % jadra z daného hĺbkového intervalu.

Ďalším zdrojom chýb môže byť nezanedbateľný rozdiel tepelnej vodivosti horniny v danom hĺbkovom intervale masívu a vo vytiahnutom jadre, ktoré je podrobené laboratórnemu meraniu. Hornina, ktorá sa nachádzala pôvodne v masíve pred vytiahnutím bola stlačená bočnými geostatickými tlakmi, pri naplnení pórov vodou z hydrostatického tlaku celého masívu. Vytiahnuté jadro je zbavené bočných geostatických tlakov a pri všetkých dostupných možnostiach zabezpečovania vysychania, postupne sa zbavuje vody z pórov. Najviac vody stráca pri samotnom laboratórnem meraní tepelnej vodivosti, kde sa musí vyvolať umelý tepelný tok.

Výsledkom týchto faktov je skutočnosť, že tepelná vodivosť, ktorá sa odmeria v laboratóriu na jadrách vytiahnutých hornín je odlišná od skutočnej tepelnej vodivosti horninového masívu v danom hĺbkovom intervale, kde sa uskutočnili merania základných údajov, t.j. tepelného gradientu.

Prepočet tepelného toku v zemskom telese Fourierovou transformáciou prestupu tepla.

Pri výpočte tepelného toku sa vychádza z doterajších poznatkov a údajov o Zemi. Základom je výpočet množstva tepelnej energie naakumulovanej vo vnútornom jadre Zeme podľa vzťahu:

$$Q = V \cdot \zeta \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [\text{J}] \quad (3)$$

kde V – objem vnútorného jadra Zeme [m^3],
 c_p – merná špecifické teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ζ – hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 ΔT – rozdiel teplôt [K].

Pomerom tepelnej energie a času zistíme množstvo tepelného výkonu:

$$Q_t = \frac{Q}{t} \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Tepelný tok v ďalších vrstvách zemského jadra je možné vypočítať metódou prestupu tepla guľovou stenou Fourierovou transformáciou.

Tento dej možno vyjadriť jednoduchou rovnicou:

$$Q = k(t_1 - t_2) \cdot \tau \quad [\text{J}] \quad (5)$$

kde, Q – množstvo tepla, respektíve tepelnej energie [J],
 k – súčiniteľ prestupu tepla guľovou plochou [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$],
 τ – čas prestupu [s],
 t_1, t_2 – teplota steny [K],
 R_i – polomery jednotlivých guľových plôch [m].

Súčiniteľ prestupu tepla k guľovou stenou zloženou z n – vrstiev o polomeroch $R_1 < R_i < R_{n+1}$ a tepelných vodivostiach λ_i až λ_n určíme z nasledujúcej rovnice:

$$k = \frac{4\pi}{\frac{1}{R_1^2} + \sum \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_{i+1}} \right) + \frac{1}{R_{n+1}^2}} \quad [\text{W} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6)$$

Teoretické základy navrhovaného merania tepelného toku

Návrh vychádza, ako už bolo uvedené z vylúčenia potreby merania tepelnej vodivosti a vylúčenia meraní na dvoch miestach zvoleného hĺbkového intervalu. Medený valček umiestnený na čelbe vrtu funguje ako akumulátor teploty, ktorá do neho vchádza vplyvom tepelného toku zemskej kôry. Akumulátor nie je schopný akumulovať celé množstvo energie vplyvom odvodu tepla cez vazelínovú a izolačnú vrstvu do vôd stekajúcich z vyšších častí horninového masívu ako aj odvodom tepla z tepelného akumulátora do okolia horniny. Tento bočný tepelný tok vychádzajúci z vazelíny vznikne v dôsledku vyššej tepelnej vodivosti vazelíny oproti okolitému horninovému masívu a vyššej tepelnej vodivosti akumulátora a teda musí vzniknúť teplotný spád medzi vazelínovým súvrstviem ako aj akumulátorovým valčekom a horninovým masívom. Keby k týmto uvedeným stratám nedochádzalo teplota v tepelnom akumulátore by narastala lineárne s časom. Množstvo tepla, ktoré by sa malo naakumulovať v medenom valčeku sa dá vyjadriť vzťahom:

$$Q_c = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{J}] \quad (7)$$

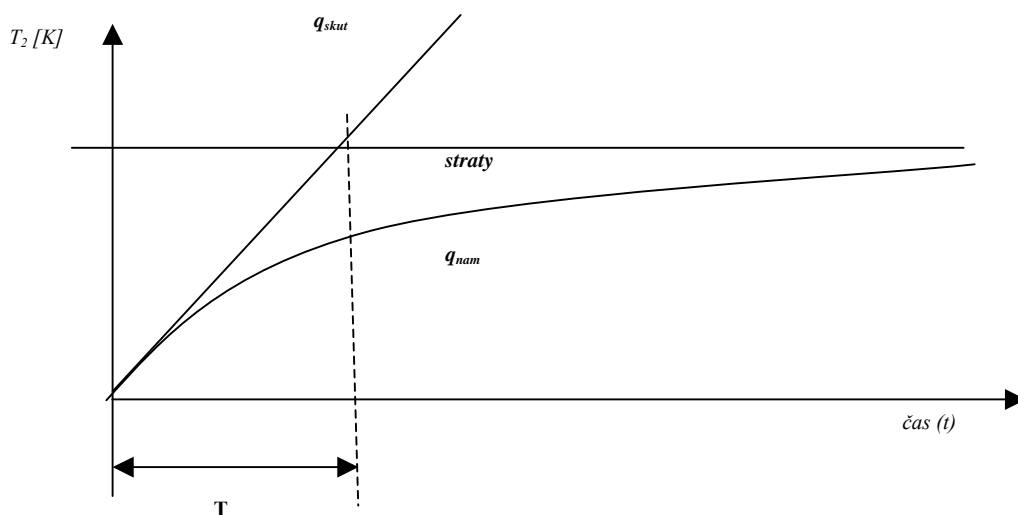
kde Q_c [J] – celkové množstvo tepla, ktoré by sa malo naakumulovať v tepelnom akumulátore v závislosti na čase pri teoretickom lineárnom narastaní teploty,
 m – hmotnosť medeného akumulátora [kg],
 T_2 – narastajúca teplota akumulátora v závislosti na čase [K],

T_1 – počiatočná teplota akumulátora pred začatím merania [K],

c_p – merné špecifické teplo [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

$dT = (T_2 - T_1)$ – rozdiely teplôt v akumulátore vo zvolenom časovom intervale (0 – t).

Pretože rozdiel teplôt nebude lineárne narastať kvôli uvedeným stratám, je možné hypoteticky predpokladať, že nárast bude prebiehať podľa krivky v čase blížiacom sa v nekonečnu k asymptote. Skutočný rozdiel teplôt dT_c a celkovo akumulované teplo v akumulátore Q_c sa dá určiť pomocou dotyčnice v nule uvedených funkcií a zvolenom časovom intervale (0 – t). Pozri schematický obrázok č.10. Keby sa vynášali skutočné funkčné hodnoty Q a dT funkcie budú mať rovnaký priebeh len budú mať iné konštanty. Rovnaký priebeh ako je znázornený na schematickom obrázku č.2 môžeme dosiahnuť upravenými mierkami.



Obr. 2. Teoretické grafické zobrazenie akumulácie tepla q_{skat} - skutočne nameraný tepelný tok, q_n - nameraný tepelný tok.
Fig. 2. The indication of theoretic graphic accumulation of heat.

Dá sa dokázať, že pomocou tepelného toku možno tiež vyjadriť celkové množstvo energie, ktoré vojde do akumulátora vo zvolenom časovom intervale. Uvedený vzťah pre výpočet tepelného toku podľa Mareša (Mareš, S., 1970) sa môže ďalej rozpísať.

$$q = \lambda \cdot (T_2 - T_1) / l \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (8)$$

kde

λ – je tepelná vodivosť [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

T_1 - teplota na rozhraní akumulátora a horniny [K],

T_2 – teplota na rozhraní akumulátora a vrstvy mazacieho tuku (vazelíny) [K],

l – vzdialenosť medzi rozhraniami [m],

keďže $\lambda_{Cu} > \lambda_h$ a $c_{Cu} > c_h$, teplota T_2 bude mať opäť hypoteticky vyššiu hodnotu ako skutočnú, pretože táto hodnota bude takisto narastať po krivke ako skutočná hodnota tepla znázornená na obrázku (10). Táto skutočnosť je ovplyvnená aj faktom, že v pásiku snímača z medi sa naakumuluje väčšie množstvo tepla ako v pásiku horniny. V navrhovanom meraní v skutočnosti hodnoty teplôt T_1 a T_2 nemerame. Merame len priemernú hodnotu teploty tepelného akumulátora, ktorá sa relatívne rýchle stabilizuje vzhľadom na dobrú tepelnú vodivosť medi. Hodnotu celkovej tepelnej energie možno potom vyrátať pomocou vzťahu

$$Q_c = q \cdot S \cdot t \quad [J] \quad (9)$$

kde

q – tepelný tok [$W \cdot m^{-2}$],

S – spodná plocha, ktorá je v dotyku s horninou [m^2],

t – zvolený časový interval [s].

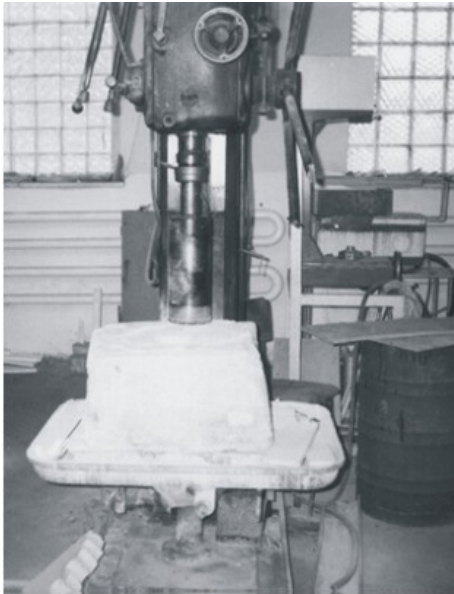
Pretože teploty T_1 a T_2 nemerame, vzťahy (8) a (9) sú uvedené len kvôli hypotetickému dôkazu fyzikálnej opodstatnenosti predpokladaných úvah o akumulácii tepla v navrhovanom meraní.

Na základe týchto skutočností bola v roku 2000 v laboratórnych podmienkach odskúšaná nová metóda merania hustoty tepelného toku ako súčasť dizertačnej práce pod vedením prof. Ing. Félixu Sekulu, DrSc.

Fyzikálny model

Fyzikálny model bol postavený vo februári 2000 v laboratórnych podmienkach na fakulte BERG na Katedre dobývania ložísk a geotechniky. Model pozostával z kamennej vzorky, z tepelnej špirály, z termostatu a tepelného snímača. Kamenná vzorka bola dodaná z Ústavu geotechniky SAV v Košiciach

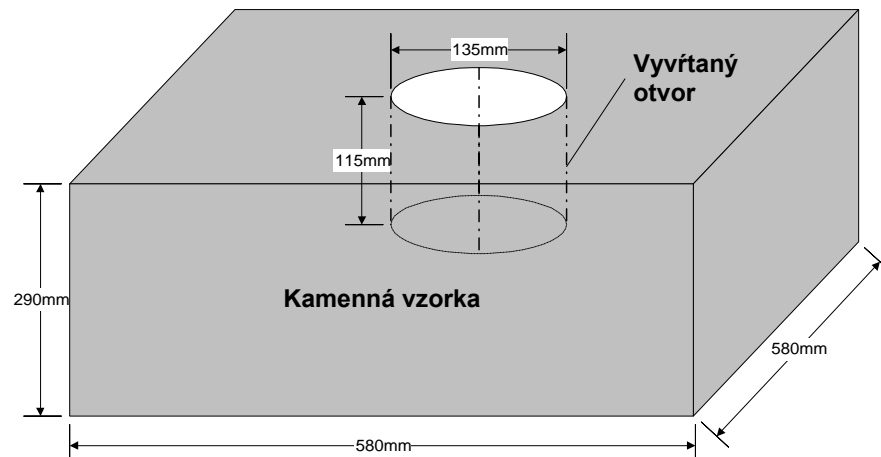
Cieľom bolo:



- odskúšať novú metódu merania tepelného toku v laboratórnych podmienkach,
- konštrukcia a realizácia meraných reťazcov na základe navrhnutých senzorov,
- vypracovanie softveru a hardveru na automatizovaný zber dát teplotných údajov v závislosti na reálnom čase,
- konfrontácia a výroba tepelného zdroja (tepelnej špirály) umiestneného na spodnej časti vzorky horniny,
- vyladenie stabilizačných prvkov regulácie teploty v termostatovej komore voči okoliu (predstavuje ju vyhlbená jama),
- meranie na fyzikálnom modeli, analýza výsledkov a návrh reálneho merania v podmienkach in situ.

Obr. 3. Príprava a opracovanie vzorky.
Fig. 3. Prepare aut treatment sample.

Týmto fyzikálnym modelom sme vytvorili kvázi horninové prostredie. Základom navrhovaného merača bol akumulátor tepelnej energie, ktorý bol umiestnený na dne vrtu po maximálnom vysatí výplachovej kvapaliny a zamedzení prítoku vôd z vrchných častí horninového masívu.

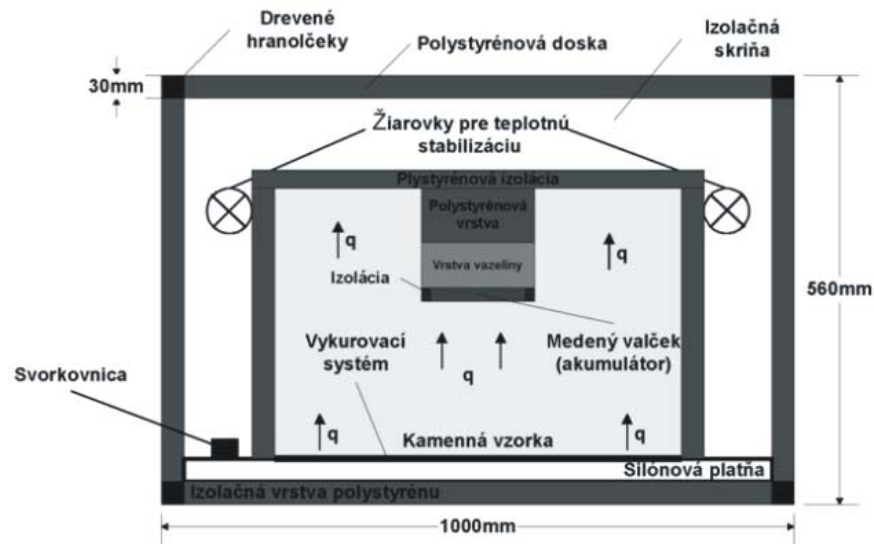


Obr. 4. Konštrukcia fyzikálneho modelu.
Fig. 4. Construction of the physical model.

Súčasti komplexného modelu

- kamenná vzorka (nahrádza horninové prostredie okolia vrtu)
- vykurovací systém (imituje sa pomocou neho tepelný tok)
- izolačná skriňa (udržiava stabilné podmienky aj pri zmene vplyvov vonkajšieho prostredia)
- prvky slúžiace k teplotnej stabilizácii kamennej vzorky a jej bezprostredného okolia (termostat, zdroj napätia, žiarovky, el. vodiče)

- medený valček (akumulátor), s 3 teplotnými snímačmi (slúžia na zachytenie tepelného toku vo vzorke kameňa)
- elektronické zariadenia potrebné pri snímaní a na prevod a štandardizáciu signálu, ktorého hodnota predstavovala teplotný gradient
- obslužný program (Borland Delphi), slúžiaci pri komunikácii medzi meracím zariadením a obsluhou PC



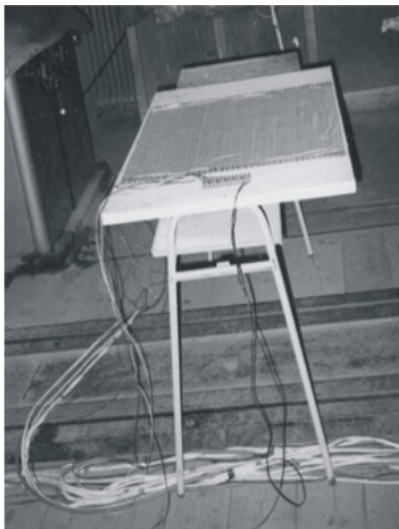
Obr. 5. Komponenty fyzikálneho modelu.

Fig. 5. Components of the physical model.

Do kamennej vzorky o rozmere 580 x 580 x 290 mm bol navŕtaný vrt o priemere 150 mm v hĺbke 110 mm. (obr. 3). Tento vrt bol navŕtaný stolovou vŕtačkou, pričom dno vrtu kamennej vzorky bolo opracované pomocou zabrusovačky do hladkého povrchu. Na dne vrtu bol uložený akumulátor z medi.

Kamenná vzorka bola umiestnená na tepelnej špirále, ktorá slúži na vyhrievanie vzorky. Pre fyzikálny model bolo potrebné vyhotoviť zdroj umelého tepelného toku. Aby bolo zabezpečené rovnomerné vykurovanie po celej ploche kameňa, uvažovali sme s použitím plochých pásov tenkého plechu.

V prvom rade bolo potrebné vyhľadať vhodný materiál pre vykurovanie. Z celej škály materiálov bol použitý transformátorový plech, pretože v rámci orientačného prepočtu vykurovacieho výkonu a z toho vyplývajúceho ohmického odporu najviac vyhovoval. (obr. 5).



Obr. 6. Tepelná špirála.

Fig. 6. The thermal screw.

Akumulátor pozostával z medeného valčeka ϕ 120 mm a hrúbke 6,5 mm. Medený materiál bol vybraný na základe jeho veľmi dobrej tepelnej vodivosti. Pokiaľ horniny dosahujú tepelnú vodivosť $1-3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, meď má hodnotu vodivosti $386 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Medený valček (akumulátor), bol po obvode obalený izolačnou páskou, aby sa zamedzilo nežiadúcemu šíreniu tepelného toku do okolia. Potom sú v rovnakej vzdialenosti od obvodu a jeho osi zavŕtané vrtákom ϕ 4,5 mm do hĺbky 5 mm tri prehĺbenia, ktoré boli od seba rovnako vzdialené.

Tieto zavŕtania boli dané rozmermi použitých tepelných snímačov. Do otvorov sú osadené teplotné snímače a upevnená krabička elektroniky, ktorá obsahovala neskôr popísané zariadenie pre prevod teploty na elektrický signál.

Ďalšou dôležitou časťou merača tepelného toku bolo pórové igelitové vrecúško, naplnené plastickým mazivom (vazelína). Jeho funkciou je zabránenie vniknutiu vôd k povrchu akumulátora. Tento faktor neplní v tomto modeli významnú rolu ale imituje podmienky, ktoré budeme dodržiavať pri meraní v reálnom vrte. (Grexová, S., 2002).

Zapojenie systému

Do montážnej šachtovej jamy lisu v hĺbke 2 m pod povrchom podlahy haly bola na doske uložená polystyrénová doska o rozmeroch 1000 x 660 mm. Na tejto izolačnej spodnej stene bola položená silónová doska s upevneným vykurovacím systémom. Pomocou žeriavu sa na vykurovaciu dosku položila kamenná vzorka so zavítaným otvorom. Celá vzorka spolu so silónovým a izolačným spodkom bola prikrytá izolačnou skriňou, ktorá bola kvôli izolácii obložená polystyrénom.

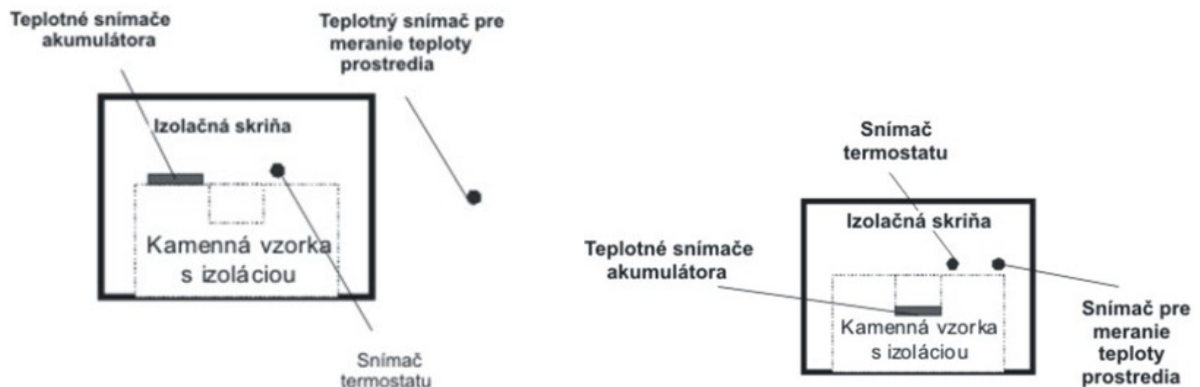
Po odstránení odnímateľného veka izolačnej skrine sa pristúpilo k zapájaniu elektrických súčastí. V priestore medzi vzorkou a krytom boli umiestnené dve sériovo zapojené žiarovky o menovitom výkone 20 W. potom sa otestovala správnosť zapojenia všetkých prívodných vodičov a overila sa funkčnosť stabilizačných žiaroviek a elektronického termostatu. Celkový výkon žiaroviek pri zapnutí snímača predstavoval len 17,3 W, pretože sústava sa napájala napätím 16,8 V.

Žiarovky sa zapínali a vypínali na základe termostatu, ktorého spínač bol umiestnený v priestore medzi vzorkou a stenami izolačnej skrine. Teplota termostatového spínača spínala pri časových intervaloch cca 20 minút. Pretože celá sústava sa nachádzala v montážnej šachtovej jame lisu, ktorá bola zakrytá drevenými doskami, celá sústava pracovala v relatívne tepelne stabilných podmienkach.

Celkový priebeh merania bol rozdelený do 3 fáz:

- experimentálna fáza
- prípravná fáza
- meranie tepelného toku

Rozloženie snímačov v jednotlivých fázach je zobrazené na obr. 6 a 7.

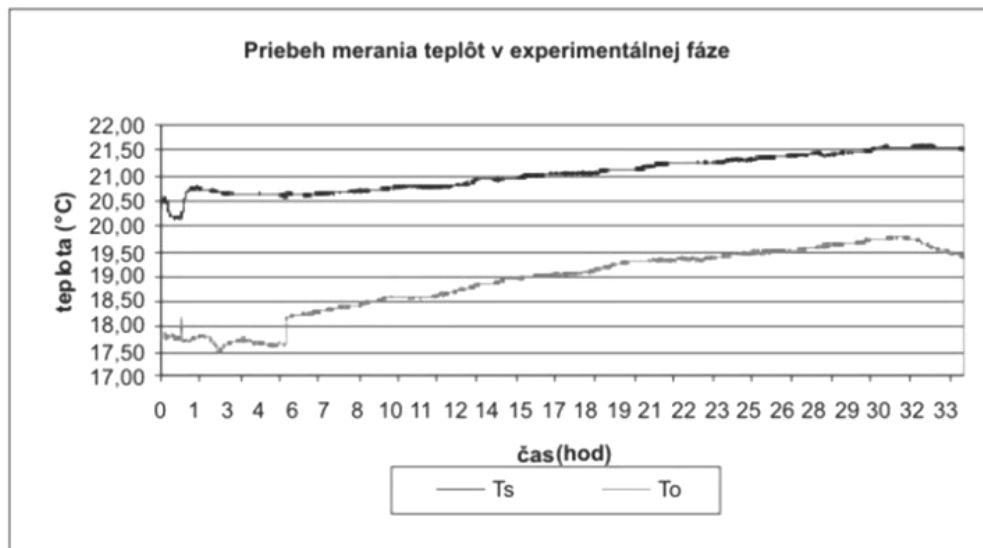


Obr. 7. Rozmiestnenie teplotných snímačov v prípravnej a experimentálnej fáze.
Fig. 7. The location of heat sensors in the preparation and experimental phase.



Obr. 8. Rozmiestnenie teplotných snímačov v priebehu merania tepelného toku.
Fig. 8. The location of heat sensors in the course of the heat flow measurement.

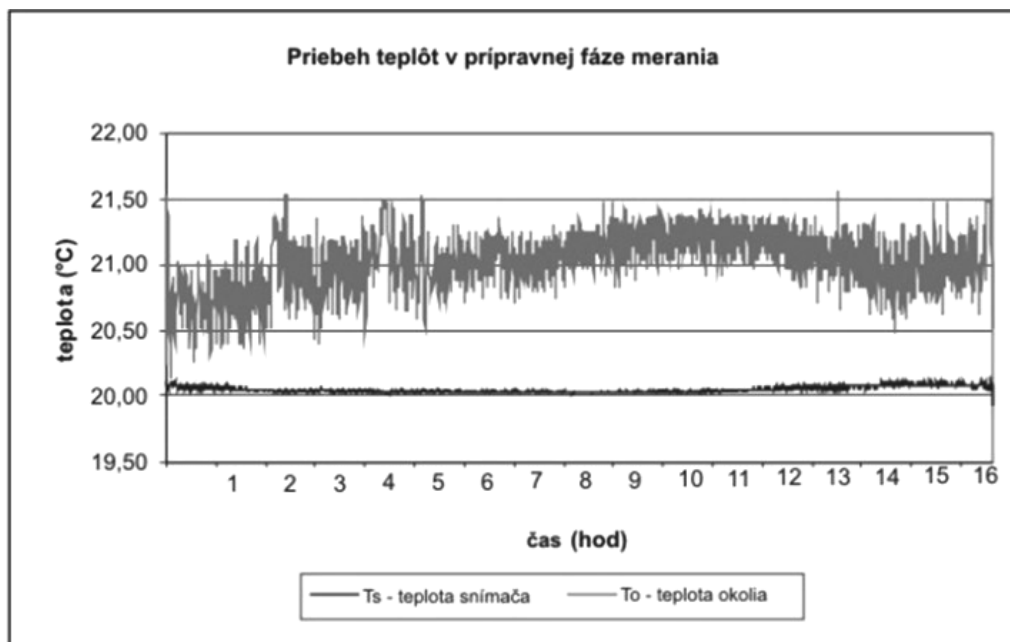
Cieľom experimentálnej fázy bolo vystabilizovanie kamennej vzorky v montážnej šachtovej jame lisu. Vzorku vyhrievali 3 vykurovacie žiarovky so snímačom prostredia mimo kamennej vzorky v izolačnej skrini modelu. Výsledok merania je zobrazený na grafe 1. Z grafu vidieť, že teplota okolia bola v tomto prípade nižšia ako teplota snímača, keďže teplotný rozdiel bol vyšší, pristúpili sme k zníženiu nastavenia teploty na termostate.



Graf 1. Priebeg merania teplôt v experimentálnej fáze.
Graph 1. The course of measurement in the experimental phase.

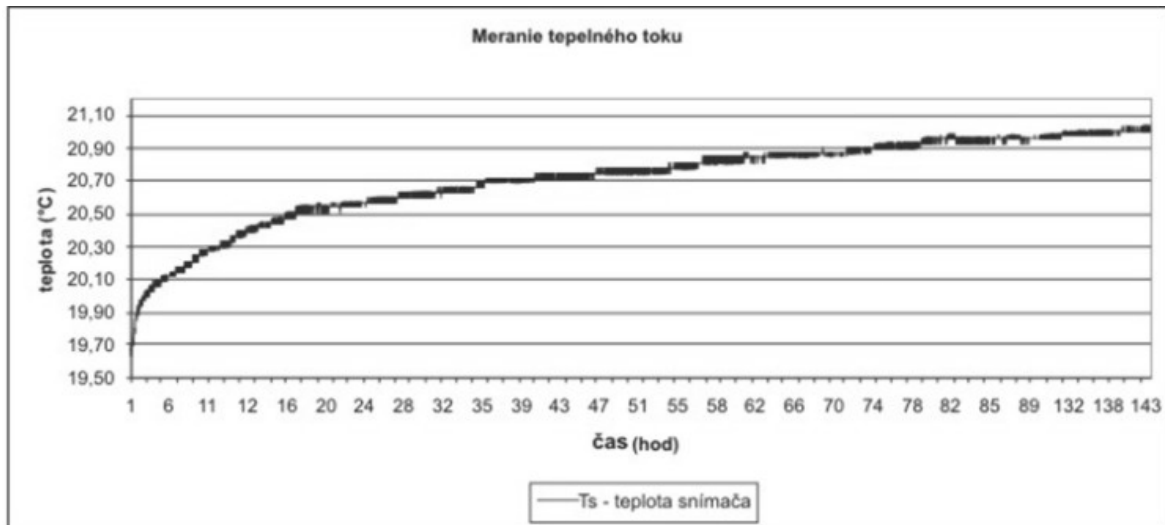
Po ukončení experimentálnej fázy bol premiestnený teplotný snímač prostredia do vnútra kamennej vzorky a akumulátor vložený do vrtu, čo nám umožnilo merať teplotu kamennej vzorky. (obr. 7) Teplotný snímač termostatu ostal v nezmenenej polohe a tým sa prešlo do prípravnej fázy merania.

Výsledky merania sú zobrazené na grafe. 2. Z teplotného priebehu sa odčítala min. a max. hodnota teploty, na ktorú takto nastavený termostat zapínal a vypínal vykurovacie žiarovky (udržiavanie teploty v danom teplotnom rozmedzí).



Graf 2. Priebeg merania teplôt v prípravnej fáze.
Graph 2. The course of measurement in the preparatory phase.

Závěrečnou fázou merania bolo meranie tepelného toku, ktoré trvalo 110 hodín. K vyvolaniu tepelného toku sa pristúpilo po stabilizovaní teploty, približne po hodine a to zapnutím vykurovacej špirály – samotné meranie tepelného toku trvalo 109 hodín (graf 3).



Graf 3. Priebeh merania hustoty tepelného toku.
Graph 3. The course of measurement of heat flow.

Vyjadrenie tepelného toku dostaneme podielom celkového množstva energie plochou akumulátorového valčeka a zvolenými časmi odčítaných teplôt podľa vzťahu

$$q = Qc / S \cdot t \quad (10)$$

kde

S – plocha akumulátorového valčeka [m²],
t – zvolený čas odčítania teploty [s].

Vstupné hodnoty potrebné na prepočet tepelného toku sú uvedené v tab. 1

Tab. 1. Vstupné hodnoty.
Tab. 1. The input data.

	hodnota	jednotky
Tepelná vodivosť Cu	386	W . m ⁻¹ K ⁻¹
Merná tep. Kapacita Cu	0,39	kJ . kg ⁻¹ K ⁻¹
Hmotnosť	0,658	kg
Obsah	0,01	m ²

Matematické vyjadrenie tepelného toku

Výsledný priebeh merania tepelného toku sa javí ako nelineárny, čím sme dosiahli požadované zakrivenie, preto ho môžeme ho stotožniť s matematickou funkciou vyššieho radu. Keďže rozdiel teplôt nie je lineárny, nárast prebieha podľa krivky v čase blížiacaj sa k asymptote. Na grafoch 4 a 5 sú znázornené tangenshyperbolické a exponenciálne funkčné priebehy tepelného toku. Tieto funkcie sme si zvolili na základe najmenších chýb zistených pri výpočte.

Ide o tangenshyperbolickú funkciu v tvare:

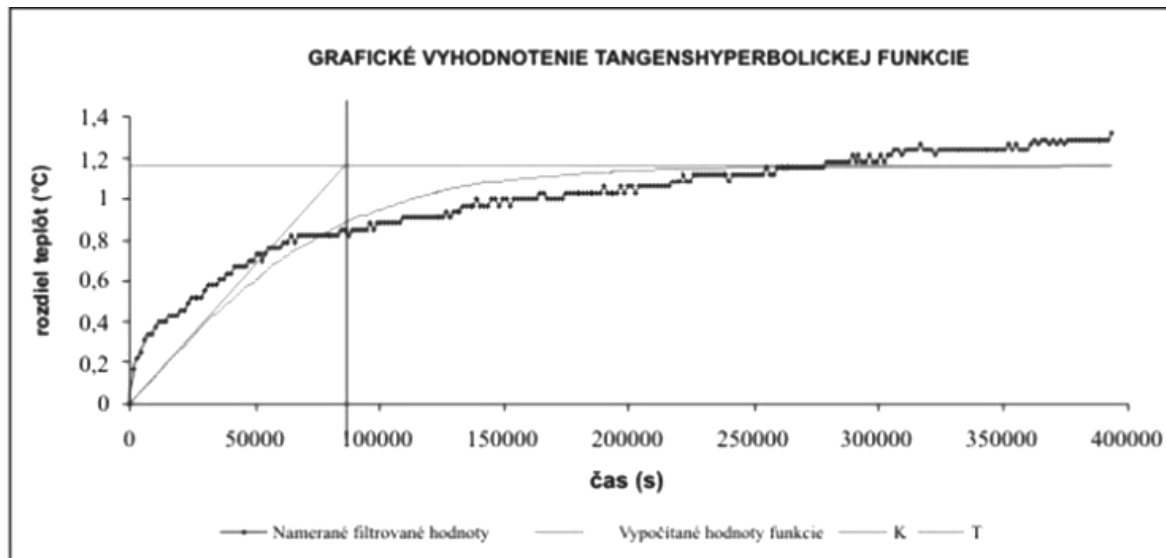
$$y = k \cdot \operatorname{tgh} \left(\frac{x}{T} \right) \quad (11)$$

a exponenciálnu funkciu v tvare:

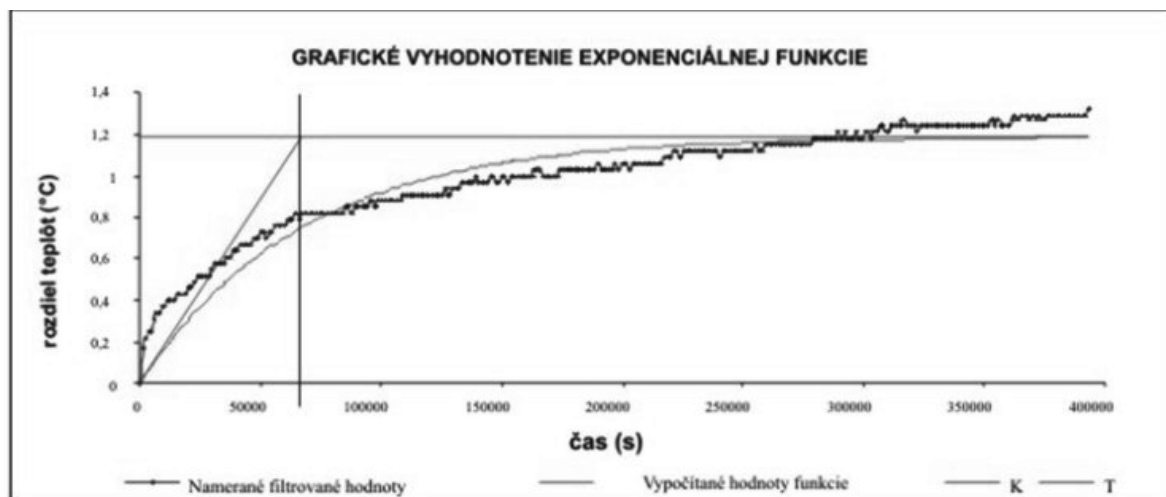
$$y = k \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-x}{T} \right)} \right) \quad (12)$$

- kde x a y sú závislé premenné, v tomto prípade čas a teplota snímača,
- k , T sú vypočítané konštanty,
- hodnoty k a T sú optimalizované metódou Nedler - Meadovho algoritmu pre minimalizovanie súčtu štvorcov chýb danej funkcie a nameraných dát. Filtrovalo sa z 33 994 nameraných dát. Filtrovaná bola každá 120 hodnota od času 2580 sekúnd. Už zo samotného priebehu a na základe výpočtov je zrejmé, že exponenciálna funkcia je pre tento priebeh viac vyhovujúca a to najmä na základe výpočtu strednej chyby, ktorá je pri tejto funkcii takmer o polovicu menšia ako pri tangenshyperbolickej závislosti.

Po odčítaní času z grafov 3 a 4 boli hodno tepelného toku q (24 hod) $118,7 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ a pre exponenciálnu funkciu q (19 h) $114 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$.



Graf 4. Schematické znázornenie konštánt tangensyperbolickej funkcie.
Graph 4. The diagram of the tangenshyperbolic function.



Graf 5. Schematické znázornenie konštánt exponenciálnej funkcie.
Graph 5. The diagram of the exponential function.

Záver

Meraním sme dosiahli požadovaný nelineárny nárast teploty, bola vyvolaná hodnota tepelného toku vo vzorke kameňa $5,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ - tým bola dosiahnutá teplota tepelného toku $114 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (v prípade tangenshyperbolickej funkcie) a $118 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (v prípade exponenciálnej funkcie). Z výsledkov tejto práce je zrejmé, že túto metódu merania tepelného toku je možné použiť v reálnych podmienkach za použitia

kvalitného technického vybavenia (digitálnych teplomerov, tepelných snímačov), kde čas merania bude podstatne dlhší oproti simulovanému meraniu v laboratórnych podmienkach.

Literatúra - References

- [1] Čarnogurská, M., Piatnička, I.: Termomechanika, *Alfa, Bratislava, 1987.*
- [2] Franko, O., Remšík, A., Fendek, M.: Atlas geotermálnej energie Slovenska. *GÚDŠ, Bratislava, 1995.*
- [3] Greksová, S: Fyzikálny model merača tepelného toku, *Ddid*
- [4] Hašek, P.: Tabulky pro tepelnou techniku, *Vysoká škola báňská, Ostrava 1980.*
- [5] Mareš, S.: Úvod do užité geofyziky. *SNTL, Praha, 1970.*
- [6] Račický, M.: Geotermálna energie vo väzbe na energetickú koncepciu SR, *Stará Lesná, 1997.*
- [7] Rédr, M., Příhoda, M.: Základy tepelné techniky. *SNTL, Praha, 1991.*
- [8] Rybár, P., Sasvári, T.: Zem a zemské zdroje, *vydavateľstvo Štrofek, 1998.*
- [9] Sazima, M.: Sdílení tepla, *ČVUT, Praha, 1971.*
- [10] Sekula, F.: Teoretické a technologické aspekty rozpojovania hornín, *DDP, Košice, 1979.*