

## Nová metóda merania tepelného toku

Félix Sekula<sup>1</sup> a Slávka Grexová<sup>2</sup>

### *A new method of measuring the thermal flow*

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

*According to the Atlas of Geothermal Energy the thermal flow ranges from 40 to 120 mW/m<sup>2</sup>; it is not possible to measure directly on the surface of the rock. The conventional method of measurement is the use of "separation bar" thermic conduction measurement system or to measure the temperature of the rock in two different places at selected underground depth intervals.*

*The method of measurement suggested by us combines these two techniques. The measurement is based on a sample of processed store from the Slovak Academy of Science. This sample represents the rock massiv:*

*The complex model includes:*

- a heating system to imitate the thermal flow,
- an isolation box to maintain stable conditions,
- temperature stabilizing components (thermostat, bulbs, electric conductors),
- a heat accumulator including a temperature sensor.

*A special computer program to measure the thermal flow was created using the Borland Delphi 3.0 programming language. The role of the program is to process extensive data quickly. The results of the measured temperatures and modelled thermal flow are displayed graphically in this article. As seen from the graph, the course of measurement thermal flow is linear. In our geographical location this value is cca 120 m W.m<sup>-2</sup>. This value proves, that at the projection physical model we are approximating to the reality in areas of sensitive elements. Another fact is that Joule heat which rose into a heater system of transformer straps under muster would thermal flow 2,25 W.m<sup>-2</sup>. From the present results that by follow the sensitivity measurement scanners it is needed to measure a minimum threefold during a longer time or to improve the sensitivity measurement chains.*

*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

Meranie tepelného toku Zeme nie je možné uskutočniť priamo na zemskom povrchu. 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, resp. 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 skutočností 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 jasné, že tieto tepelné toky nemôžu byť exaktne merané na povrchu Zeme.

Samozrejme, rozdiely sa budú meniť aj v jednotlivých ročných obdobiach. V našich zemepisných šírkach tieto rozdiely v extrémnych prípadoch môžu mať hodnoty 40–60 °K. Problém je aj v tom, že pre nehomogenitu schladzovania zemského povrchu, resp. jeho tesných podpovrchových oblastí (zamŕzanie zemskej kôry až do extrémnej hĺbky 1m) je potrebné vedieť stanoviť takú relatívnu hĺbku, kde atmosférický vplyv už nebude znižovať hodnotu tepelného toku.

Doterajšie merania tepelného toku spočívali v meraní tepelnej vodivosti horniny v meraní teploty na dvoch miestach zvoleného hĺbkového intervalu.

Nami navrhnutý spôsob merania tepelného toku spočíva vo vylúčení potreby merania pomocou doterajších spôsobov merania.

### Teoretické základy navrhovaného merania tepelného toku

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

<sup>1</sup> prof. Ing. Félix Sekula, DrSc. Katedra dobývania ložísk a geotechniky TU v Košiciach, 043 84 Košice, Park Komenského 15

<sup>2</sup> Ing. Slávka Grexová. Katedra dobývania ložísk a geotechniky Technickej univerzity v Košiciach, 043 84 Košice, Park Komenského 15 (Recenzované, revidovaná verzia dodaná 14.2.2001)

tepla cez vazelinovú 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 vazelinovým súvrstvom 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

$$Q_c = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1), \quad [J] \quad (1)$$

kde

$Q_c$  – celkové množstvo, ktoré by sa malo naakumulovať v tepelnom akumulátore v závislosti na čase pri teoretickom lineárnom narastaní teploty  $T_2$  [J],

$m$  – hmotnosť medeného akumulátora [kg],

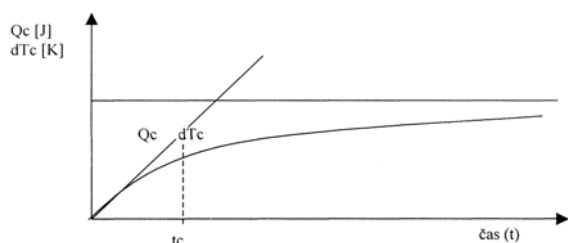
$c_p$  – merné špecifické teplo [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ],

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

$T_2$  – narastajúca teplota akumulátora v závislosti na čase [K],

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

Pretože rozdiel teplôt nebude lineárne narastať kvôli uvedeným stratám, môžeme 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 ( $0 - t_c$ ).



Pozri schematický obr.1. 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 obr.1, môžeme dosiahnuť upravou mierok.

Obr.1. Grafické znázornenie akumulácie tepla.  
Fig.1. Graphical image accumulation 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 (2) sa môže ďalej rozpísať tak že:

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

kde

$\lambda$  – 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].

Teplota  $T_2$  bude mať opäť hypoteticky vyššiu hodnotu ako skutočnú, pretože táto hodnota bude takisto narastať po krivke, rovnako ako skutočná hodnota tepla znázornená na obr.1. V navrhovanom merači v skutočnosti hodnoty teplôt  $T_1$  a  $T_2$  nemeríme. Meriame 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

$$Q_c = q \cdot S \cdot t, \quad [J] \quad (3)$$

kde

$q$  – tepelný tok [ $W \cdot m^{-2}$ ],

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

$t$  – zvolený časový interval [s].

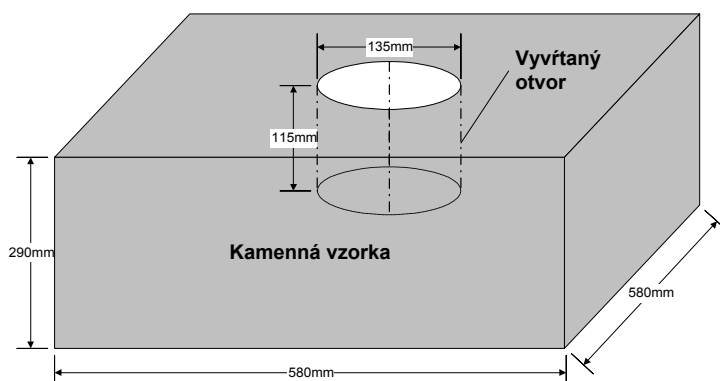
Pretože teploty  $T_1$  a  $T_2$  nemeráme, vzťahy (1) a (2) sú uvedené len kvôli hypotetickému dôkazu fyzikálnej opodstatnenosti predpokladaných úvah o akumulácii tepla v navrhovanom merači.

### Fyzikálny model

Pre pokus bola vybraná vzorka kameňa, ktorú posktoľ Ústav geotechniky Slovenskej akadémie vied (SAV) v Košiciach.

Komplexný model sa skladá z nasledujúcich častí:

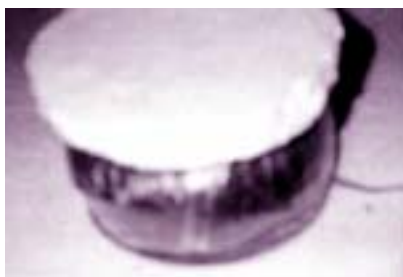
- kamenná vzorka, ktorá nahrádzala horninové prostredie okolia vrtu (obr.2),
- vykurovací systém, pomocou ktorého sa imitoval tepelný tok,
- izolačná skriňa, slúžiaca k udržaniu stabilných podmienok aj pri meniacich sa vonkajších vplyvoch prostredia,
- prvky slúžiace k teplotnej stabilizácii kamennej vzorky (termostat, zdroj napätia, žiarovky, elektrické vodiče) a jeho bezprostredného okolia,
- medený valček (akumulátor), v ktorom boli umiestnené tri teplotné snímače, slúžiace na zachytenie tepelného toku vo vzorke kameňa,
- elektronické zariadenia, ktoré boli potrebné pri snímaní, prevode a štandardizácii signálu, ktorého hodnota predstavovala teplotný gradient,
- obslužný program (Borland Delphi), slúžiaci pri komunikácii medzi meracím zariadením a obsluhou počítača.



Obr.2. Konštrukcia fyzikálneho modelu. Fig.2. Scapple stone muster.

### Zhotovenie merača tepelného toku (akumulátor)

Akumulátor tepla (obr.3) pozostáva z medeného valčeka priemeru  $\Phi = 120$  mm a hrúbke 6,5 mm. Medený materiál je vybraný na základe jeho veľmi dobrej tepelnej vodivosti. Pokiaľ horniny dosahujú tepelnú vodivosť  $1 - 3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , med' má hodnotu tepelnej vodivosti  $386 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Medený valček (akumulátor) je po obvode obalený izolačnou páskou, aby sa zamedzilo nežiaducemu šíreniu tepelného toku do okolia. Potom sú v rovnakej vzdialenosti od obvodu a jeho osi zavrtané vrtákom priemeru  $\Phi = 4,5$  mm do hĺbky 5 mm tri prehĺbenia, ktoré sú od seba rovnako vzdialené. Tieto zavrtania boli dané rozmermi použitých tepelných snímačov. Ďalšou dôležitou časťou merača tepelného toku je pórovité igelitové vrecúško, ktoré bolo naplnené plastickým mazivom (vazelína). Jeho funkciou je, ako už bolo uvedené zabránenie vniknutiu vôd k povrchu akumulátora. Tento faktor neplní v našom modeli významnú rolu, ale imituje podmienky, ktoré treba dodržiavať pri meraní v prírode v reálnom vrte, aby sme zabránili prienikom vôd zo steny celého vrtu k meraču tepelného toku.



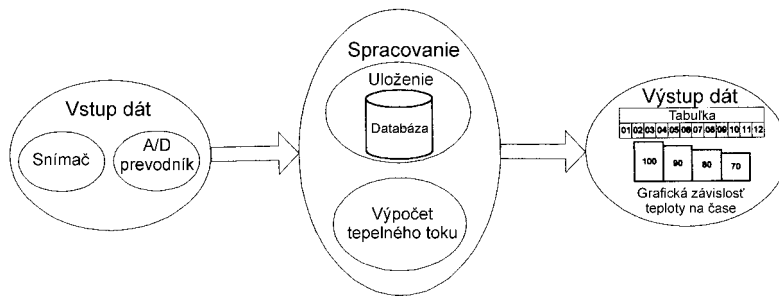
Obr.3. Akumulátor tepla. Fig.3. Accumulator of heat.

Pre samotné meranie tepelného toku bol vyhotovený obslužný program merania v programovacom jazyku Borland Delphi 3.0. Základom spracovateľského programu je databáza. Databázu tvorí prepojenie množstva tabuliek a ich vlastností, pričom jej obsahom je celý rad nameraných dát. Úlohou databázového systému je rýchla možnosť práce s nameranými dátami. Obsah a význam dát v jednotlivých tabuľkách databázy je podrobne uvedený v tabuľke č.1.

Tab.1. Tabuľkový list databázy. Tab.1. Tables list of database.

Názov tabuľky	Popis
Meranie.DB	obsahuje základné údaje popisujúce jednotlivé merania
Data.DB	obsahuje všetky namerané dáta
FilterData.DB	obsahuje dáta, ktoré prešli filtráciou
Kalibracia.DB	obsahuje dáta poslednej kalibrácie teplotného čidla pre meranie teploty akumulátora
Kalibracia2.DB	obsahuje dáta poslednej kalibrácie teplotného čidla pre meranie teploty prostredia

Všetky tabuľky sa nachádzajú v adresári Data. Priebeh merania je zobrazený v diagrame (obr. 4).



Obr.4. Diagram dátového toku.  
Fig.4. Data –Flow diagram.

Obslužný program bol zhotovený výlučne pre prácu s vyššie navrhovanými čidlami. Program komunikuje cez sériový port COM 2 s navrhovanými obvody meračov teploty a spúšťa sa spustením súboru Meranie.exe. Program v inter-

valoch, ktoré určuje užívateľ kontroluje hodnoty na porte COM 2, kde sú pripojené meracie čidlá a pomocou A/D prevodníka tieto hodnoty transformuje na teplotu, ktorú ukladá do databázy v súbore dat.

### Kalibrácia navrhovaných snímačov pre meranie teploty

Keďže výstupom navrhovaného zariadenia pre meranie teploty je impulz, ktorého dĺžka závisí od ohriatia teplotného snímača, bolo potrebné zistiť závislosti medzi meranou teplotou a dĺžkou impulzu. Obslužný program, ktorý spolupracuje s teplotnými snímačmi je závislý na rýchlosti počítača. Preto bolo nutné pristúpiť ku kalibrácii. K dispozícii bol presný digitálny teplomer a vybavenie laboratória. Kalibráciu bolo nutné vykonať pri teplotách 0, 10, 20, 30, 40 a 50°C (obr.5). Prostredníctvom programu pre kalibráciu bola zapísaná hodnota dĺžky výstupného impulzu do databázy programu. Týmto postupom sú kalibrované oba teplotné snímače pri teplote 0°C. Postup sa opakoval pri zvolených teplotách média a vyplnili sa všetky potrebné položky kalibračných tabuliek databázy.

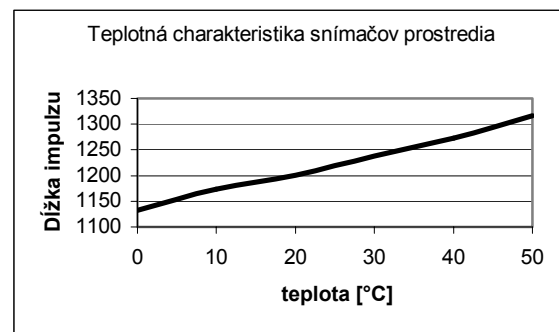
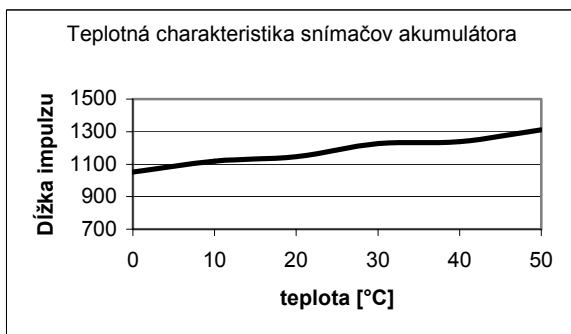
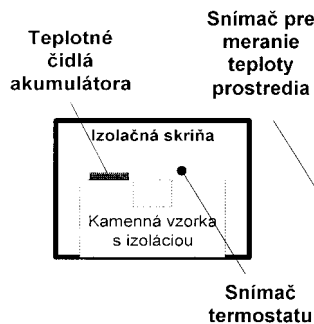


Fig.5. Výsledky kalibrácií teplotných snímačov. Fig.5. Results calibration of heat sensors.

Meranie bolo realizované v troch fázach. Experimentálnej, prípravnej a vo fáze vlastného merania. Ako je zrejmé z obr.6, v experimentálnej fáze sa snímač pre meranie teploty prostredia nachádzalo v prostredí šachtovej jamy lisu a snímače akumulátora spolu so snímačom termostatu sa nachádzali v izolačnej skrini fyzikálneho modelu. Samotné meranie bolo spustené o 12:32 a trvalo 93 hodín. Výsledok merania je zobrazený na obr.7.

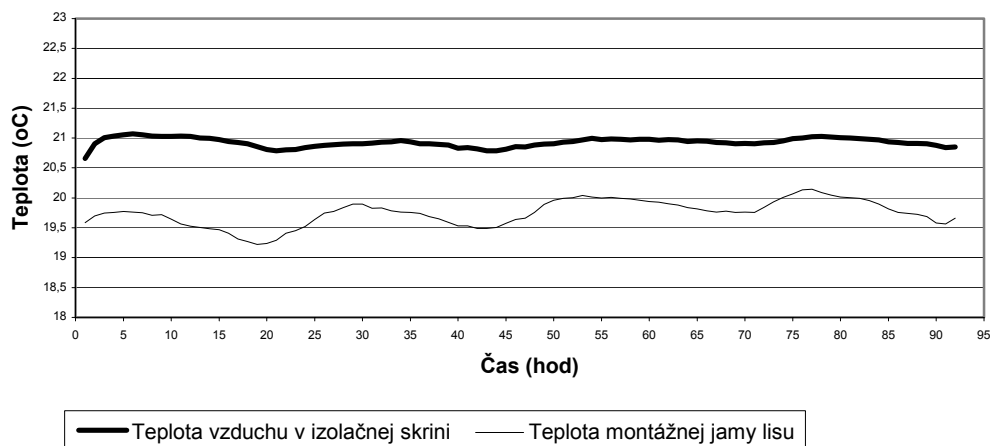


Obr.6. Umiestnenie teplotných čidiel.  
Fig.6. Location heat sensitive element.

Z grafu je možné odčítať teplotné priebehy v izolačnej skrini a v montážnej jame lisu. Týmto meraním sú sledované priebehy teploty vo všetkých priestoroch meracej sústavy, t.j. v montážnej šachtovej jame, v priestore izolačnej skrini a v samotnej vzorke horniny za izolačnými vrstvami. Je potrebné vedieť presne nastaviť hodnotu teploty pre spínanie termostatu.

V ďalšej časti merania bolo potrebné dosiahnuť nastavenie teploty vo vnútri modelu zhruba o 0,7°C vyššie ako je teplota bezprostredného okolia modelu. Tento teplotný gradient je potrebný pre funkčnosť termostatu, pretože jeho snahou je udržať teplotu v izolačnej skrini na konštantnej hodnote, a to je možné len pri vyššej teplote ako je teplota okolia. Z grafu je možné odčítať teplotný rozdiel medzi modelom a okolím, ktorého hodnota predstavuje cca 1,2°C. Keďže teplotný rozdiel bol vyšší ako sme predpokladali, pristúpilo sa k jeho zníženiu a to znížením nastavenia teploty potenciometrom termostatu.

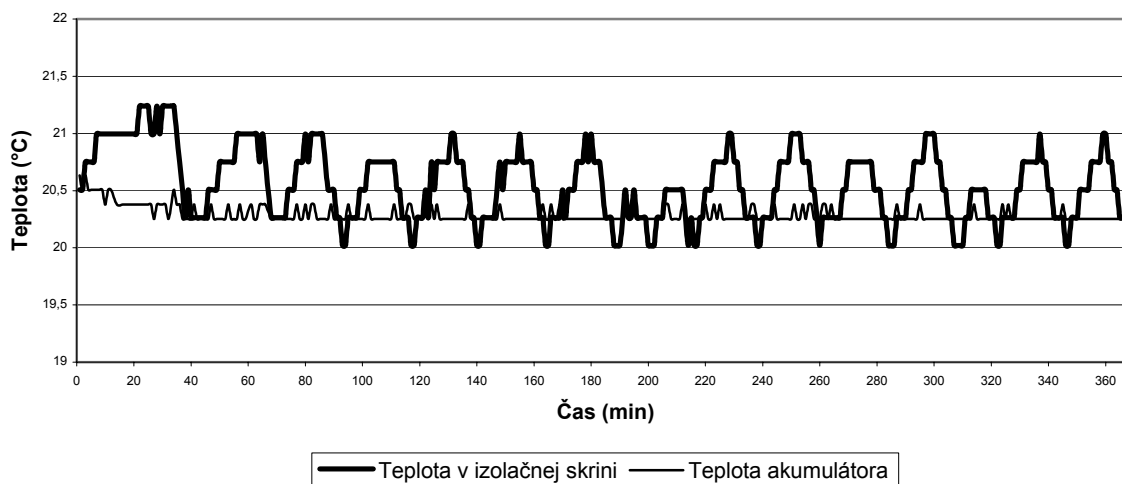
## Priebeh priemerných teplôt v izolačnej skrini a montážnej jame lisu.



Obr.7. Teplotný priebeh v experimentálnej fáze. Fig.7. Heat course into experimental phase.

Po ukončení experimentálnej fázy nasledovala prípravná fáza. V jej rámci bolo premiestnené teplotný snímač prostredia do vnútra izolačnej skrini a akumulátor bol vložený do vrtu, aby bolo možné odmerať teplotu kamennej vzorky. Teplotný snímač termostatu ostal v nezmenenej polohe. Meranie trvalo 6 hodín, počas ktorého sa merala teplota kamennej vzorky a prostredia izolačnej skrini pri už popísanom znížení nastavenia teploty potenciometrom termostatu. Priebeh teplôt je zobrazený na obr.8. Z hľadiska množstva nameraných údajov nie je možné dokladovať grafické vyhodnotenia samotnými dátami.

## Priebeh teplôt v akumulátore a izolačnej skrini.



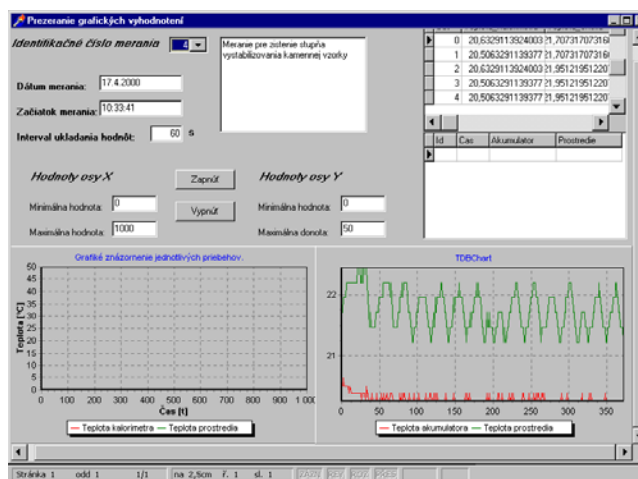
Obr.8. Výsledky meranie teplôt. Fig.8. The result course measuring of heats.

Graf znázorňuje teplotné priebehy v izolačnej skrini a v kamennej vzorke. Z teplotného priebehu je odčítaná minimálna a maximálna hodnota teploty, pri ktorej takto nastavený termostat zapína a vypína vykurovacie žiarovky, čím udržiava teplotu modelu v danom teplotnom rozmedzí. Vplyvom zníženia vykurovacieho výkonu stabilizačných žiaroviek teplota v modeli klesla na priemernú hodnotu 20,5°C, čím je dosiahnutý požadovaný teplotný gradient medzi okolím, teda montážnou jamou lisu a prostredia vo vnútri izolačnej skrini.

Po prípravnej fáze nasledovalo samotné meranie tepelného toku, kedy boli teplotné snímače termostatu, prostredia a akumulátora umiestnené do vnútra izolačnej skrini a samotný akumulátor zaťažený izolačnou vrstvou z vazelíny.

### Meranie tepelného toku.

Ďalšou fázou merania bolo určenie miery vystabilizovania teploty v kamennej vzorke. Cieľom merania bolo určiť prúdenie tepelných tokov v kamennej vzorke. Hlavnou požiadavkou merania tepelného toku je, aby kamenná vzorka nevyžarovala a neprijímala teplo z okolia. To znamená, že tepelné toky vzorky voči bezprostrednému okoliu sú minimálne. Meranie bolo spustené dňa 17.4.2000 v čase 17:18 a trvalo 40 hodín. Výsledok merania je zobrazený v ľavej časti grafu na obr.9.



Stabilizácia teploty vo valčeku začala po 20 hodinách a teplota sa tiež nemenila v rozsahu 20 hodín. Až po týchto procesoch (stabilizovaní teploty v kamennej vzorke) sme mohli pristúpiť k vyvolaniu tepelného toku vykurovaním vo vykurovacej sústave z transformátorových plechov, s vykurovacím výkonom 7,776 W. Keďže sústava bola dimenzovaná na vyšší výkon, znížil sa vykurovací výkon prostredníctvom predradeného sériového rezistora s hodnotou 33 Ω, čím sa mal vo vzorke vyvolať tepelný tok 2,25 W.m<sup>-2</sup>.

Obr.9. Priebeh merania pri teplotnej stabilizácii.  
Fig.9. The course measurement heats by stabilization.

Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľkách 2 a 3. Samotné meranie tepelného toku bolo spustené 19.4.2000 o 9:14 a trvalo 86 hodín. Jednotlivé priebehy merania teplôt po stabilizovaní kamennej vzorky a priebeh merania je zobrazený na obr.9.

Tab.2. Namerané dáta. Tab.2. Measurements dates.

Veličina	Napätie	Výkon	Prúd	Odpor	Špec. merný odpor	Dĺžka	Plocha	Šírka	Počet pásov
Jednotka	V	W	A	Ω	Ω.m	m	m <sup>2</sup>	m	ks
Hodnota	10,8	7,776	0,72	15	5E-07	43,214	1,44E-06	0,005	79

Tab.3. Namerané a vypočítané dáta. Tab.3. Measurements and calculate dates.

Odpor plechov	15	Ω
Rezistor	33	Ω
Napätie	10,8	V
Prúd	0,225	A
Výkon	0,759375	W
Plocha vzorky	0,3364	m <sup>2</sup>
Tepelný tok	2,257357	W.m <sup>-2</sup>

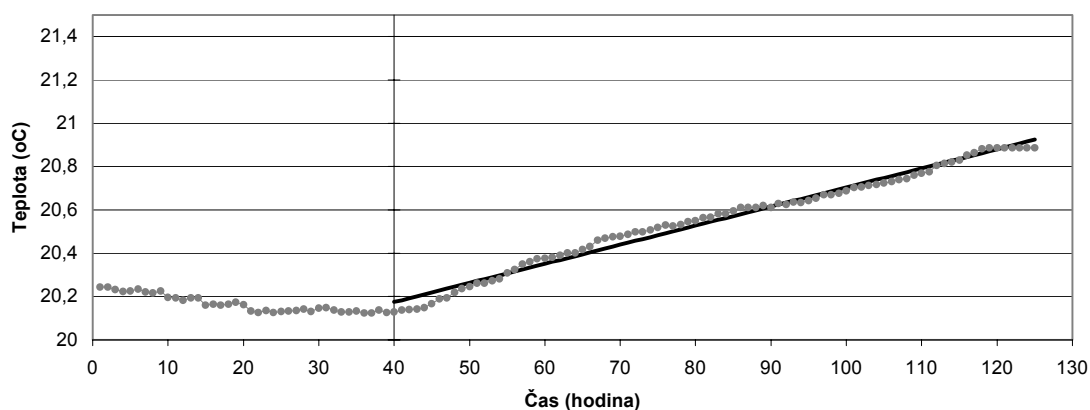
### Výsledky merania

Výsledný priebeh teploty akumulátora je znázornený na obr.9. Prvá časť grafu znázorňuje etapu stabilizovania teploty vzorky kameňa na hodnotu 20,13°C. V druhej časti je znázornený nárast teploty v dôsledku vykurovania vykurovacom sústavou. Tento nárast teploty sa javí ako lineárny, preto je týmito bodmi preložená regresná priamka, ktorej premenné sú vypočítané metódou najmenších štvorcov. Pre nemožnosť dlhšieho merania je zachytený iba tento lineárny nárast, ale v skutočnosti by sa táto funkcia mala postupne zakrivovať a blížiť sa k asymptote, ktorá by predstavovala najvyššiu možne prijatú zmenu teploty. V tomto prípade sa mohol použiť tento lineárny priebeh, pri zakrivovaní krivky by sa musela použiť niektorá z nelineárnych závislostí. Pri zostrojovaní grafov sa z celkového množstva vzorkovaných 7506 dát vypočítali pomocou aritmetického priemeru hodnoty, ktoré zodpovedali časovému intervalu jednej hodiny. V rámci jednej hodiny boli teda spriemerované hodnoty 60 vzoriek, ktoré predstavujú vynesené body počas tepelnej stabilizácie a meraní tepelného toku. Hodnoty regresnej priamky vypočítané tabuľkového procesora Excel pomocou nástroja analýzy časových radov sú zobrazené v tabuľke č.2. a tabuľke č.4.

Tab.4. Štatistické dáta. Tab.4. Statistical dates.

REGRESNÁ ŠTATISTIKA	
Koeficient korelácie R	0,992365627
Hodnota spoľahlivosti R	0,984789537
Nastavená hodnota spoľahlivosti R	0,98460846
Chyba strednej hodnoty	0,027499754

## Celkové zobrazenie priebehu stabilizovania a merania.



Obr.9. Výsledky merania tepelného toku. Fig.9. The results course measuring of thermal flow.

Meranie tepelného toku začalo po 40 hodinách, ktoré možno stotožniť s počiatkom merania, a teda aj s časom 0 hodín. Keď si zoberieme čas 60 hodín, resp. 20 hodín času merania a odčítame z lineárnej závislosti hodnoty tepelného nárastu dostaneme  $\Delta T = dT = (T_2 - T_1) = 0,167 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Hodnoty sú uvedené z tabuľkových hodnôt regresnej priamky. Pri čase 120 hodín, resp. 80 hodín času merania dostaneme  $dT = 0,695 \text{ }^\circ\text{C}$ . Keď vypočítame hodnoty naakumulovaného množstva energie  $Q_c$  z uvedených údajov pomocou vzťahu (1), dostaneme hodnoty:

$$Q_c(20) = 0,042 \text{ kJ},$$

$$Q_c(80) = 0,178 \text{ kJ}.$$

Vyjadrenie tepelného toku môžeme dostať, keď celkové množstvo energie vydělíme plochou akumulátorového valčeka a zvolenými časmi odčítaných teplôt, teda

$$q = Q_c / S \cdot t, \quad (4)$$

kde

$S$  – plocha akumulátorového valčeka,

$t$  – zvolený čas odčítania teploty,

potom

$$q(20) = 0,06 \text{ W m}^{-2},$$

$$q(80) = 0,06 \text{ W m}^{-2}.$$

Rovnakú konštantnú hodnotu dostaneme pri ľubovoľnom časovom intervale.

## Analýza výsledkov merania a záver

Výsledky modelovaného a nameraného toku ukazujú, že je možné namerať o polovicu nižšiu hodnotu tepelného toku, aký sa udáva v Atlase geotermálnej energie. V našich zemepisných polohách táto hodnota predstavuje cca  $130 \text{ W m}^{-2}$ . Tento údaj dokazuje, že pri navrhovaní fyzikálneho modelu sa nám podarilo priblížiť k realite v oblasti citlivosti meracích a regulačných snímačov. Avšak veľmi nízka hodnota nameraného

tepelného toku vo vzťahu k citlivosti indikátorov teploty v akumulátorovom valčeku zapríčinili, že sme boli v úplnom počiatku krivky znázornenej na obr.9, napriek 86 hodinám čistého merania. To znamená, že lineárnu regresnú priamku by sme mohli v ideálnom prípade stotožniť s dotyčnicou v nulovom bode spomínanej krivky na obrázku č.1. Týmto stotožnením sa nedopustíme tak veľkej chyby, akej sa musíme dopustiť pri meraní teplôt v dvoch rôznych hĺbkach prostredníctvom tepelného média, ktoré predstavuje voda.

Ďalšia skutočnosť, ktorú treba komentovať je fakt, že Joulovo teplo ktoré vznikalo vo vykurovacom systéme transformátorových pásikov pod vzorkou by, malo vyvolať tepelný tok  $2,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  Tento tok však bol v modeli dvojsmerný. Neprebíhal len smerom cez vzorku, ale aj do silonovej vrstvy a do izolácie pod ňou. Hrúbka silonovej a izolačnej vrstvy predstavovala len 50 mm. Tepelný akumulátorový valček vo vzorke bol však vzdialený 175 mm od vykurovacieho systému. Aj keď sa nemerala tepelná vodivosť vzorky a silonovej vrstvy, ako aj polystyrénového izolátora je vysoko pravdepodobné že niekoľko násobne viac tepelnej energie prúdilo smerom nadol do šachtovej jamy, pretože hrúbky stien pre prestup tepla boli viac ako 3 násobne ako to vyplýva zo vzťahu (4). Na základe toho musel byť aj tepelný tok 3 až 4 násobne vyšší smerom dole mimo vzorky horniny. Časť tejto vykurovacej tepelnej energie sa strácala aj cez izolačné polystyrénové vrstvy do bezprostredného okolia v izolačnej skrini.

Z uvedených výsledkov vyplýva, že pri danej citlivosti meracích snímačov by bolo potrebné merať minimálne trojnásobne dlhší čas.

Ďalšou možnosťou by bolo zvýšenie citlivosti meracích reťazcov, ale v tomto prípade by boli tak isto prekážkou hore uvedené problémy. Pre budúce pokračovanie v oblasti fyzikálneho modelovania tohto problému navrhujeme, aby meracie reťazce boli viac citlivé t.j. aspoň o jeden rád vyššie a čas merania toku by sa mal priblížiť k takej hodnote, aby sa dalo zachytiť zakrivenie nárastu teploty v meracom akumulátorovom valčeku. Izolačné polystyrénové vrstvy izolačnej skrine na vzorkách horniny musia byť aspoň päťnásobne hrubšie, ako boli použité. Silonová vrstva spolu s polystyrénovou vrstvou musí dosahovať aspoň takú hrúbku ako je vzdialenosť valčeka od vykurovacieho telesa. Po zdokonalení modelu a ďalšom kratšom výskume na ňom, by už bolo možné merať priamo v reálnych vrtoch v prírodných podmienkach.

#### Literatúra

- GREXOVÁ, S.: Písomná časť rigorózneho skúšky. *F BERG TU* v Košiciach, 1999.  
KRAUS, I., ČÍČEL, B.: Mineralógia a geológia. *Alfa*. Bratislava, 1988.  
RYBÁR, P., SASVÁRI, T.: Zem a zemské zdroje. *FBERG TU*, Košice, 1998.  
SÚKENÍK, R.: Diplomová práca. *FBERG TU*, Košice, 2000.