

Vilniaus Universitetas  
Gamtos mokslų fakultetas  
Geologijos ir mineralogijos katedra

Kristina Čiūraitė

***VAKARŲ LIETUVOS GEOTERMINĖS  
ANOMALIJOS PRIGIMTIS***

**Magistrinis darbas**

Darbo vadovas  
Prof. Saulius Šliaupa

VILNIUS, 2008

## TURINYS

ĮVADAS	
1. KRATONŲ GEOTERMINĖS ANOMALIJOS	5
2. TERMOFIZINIŲ PARAMETRŲ NUSTATYMO METODAI	9
3. MATEMATINIS INVERSINIS METODAS, JO TAIKYMAS DETALIZUOJANT GEOTERMINES ANOMALIJAS	14
4. LIETUVOS GEOTERMINIAI RAJONAI (VAKARŲ, CENTRINĖ IR RYTŲ LIETUVA)	17
5. VAKARŲ LIETUVOS GEOTERMINIO LAUKO MODELIS, JO PRIGIMTIS	19
5.1 MODELIO PARAMETRAI	19
5.2 REZULTATAI	23
5.4 VAKARŲ LIETUVOS GEOTERMINĖS ANOMALIJOS PRAKTINIAI ASPEKTAI	36
IŠVADOS	
LITERATŪRA	
SUMMARY	

## IVADAS

Vakarų Lietuvos geoterminė anomalija yra pati intensyviausia Rytų Europos kratone (REP) ir tai rodo išskirtines gilumines sąlygas šiame regione. Įvairūs tyrėjai šias išskirtinas sąlygas sieja dažnai su skirtingais procesais, todėl šis klausimas lieka vis dar atviras. Tai ne tik svarbus mokslinis klausimas, tačiau svarbūs ir praktiniai aspektai – geoterminės energijos panaudojimas, litosferos geodinaminis aktyvumas bei su juo susiję ekogeodinaminės rizikos veiksniai (žemės drebėjimai).

Vakarų Lietuvos geoterminės anomalijos prigimtį, gelmių terminę struktūrą bei jos praktinio pritaikymo galimybes įvairiais aspektais nagrinėjo P.Suveizdis, V.Rastenienė, S. Šliaupa ir kiti mokslininkai, kurių pastangomis sudaryti paviršiaus šilumos srauto, kristalinių uolienu šilumos generacijos ir kiti svarbūs žemėlapiai. Kai kuriuos geoterminės anomalijos aspektus nagrinėjo ir šio darbo autorė bakalauro diplominio darbo rėmuose (Žemaičių Naumiesčio Vakarų Lietuvoje geoterminis modelis).

Su geoterminėmis anomalijomis siejamos geoterminės energijos praktinio panaudojimo perspektyvos. Įvairiuose kontinentuose vykdomi geoterminiai tokių anomalijų tyrimai, rengiamos geoterminės jėgainės. Vakarų Lietuvos geoterminė anomalija taip pat yra labai perspektyvi Žemės šilumos praktiniam panaudojimui. Tokio veiklos pavyzdys – veikianti Klaipėdos geoterminė jėgainė, kuri tiekia karštą vandenį iš apatinio devono sluoksnių Klaipėdos miesto gyventojams.

### **Magistrinio darbo tikslai:**

1. Vakarų Lietuvos geoterminės anomalijos (VLGA) prigimties nustatymas.
2. Įvertinti plutos ir mantijos įtaką bendram paviršiaus šilumos srautui.
3. Perspektyvių plotų išskyrimas geoterminės energijos eksploatacijai pagal geoterminius parametrus.

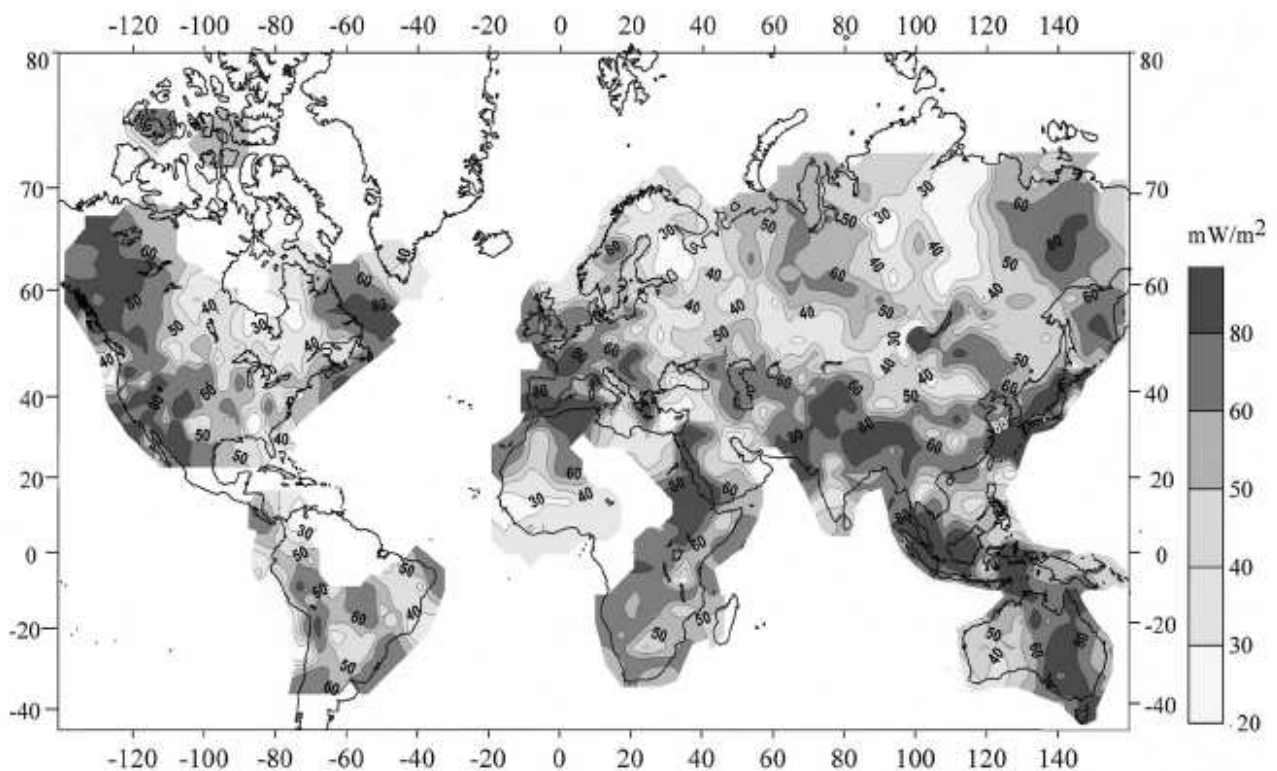
**Tikslams pasiekti nustatyti tokie uždaviniai:**

1. Susipažinti su darbais apie geotermines anomalijas įvairiuose kratonuose.
2. Surinkti termofizinius duomenis (temperatūros matavimų gręžiniuose, giluminio seisminio zondavimo ir pan.) geoterminiam modeliavimui.
3. Įsisavinti geoterminio modeliavimo metodiką.
4. Įvertinti nuosėdinių uolienu šilumos laidumo reikšmes naudojant diafragijos gręžiniuose duomenis.
5. Atlikti matematinį geoterminį modeliavimą skirtingiems Lietuvos geoterminiams rajonams

## 1. KRATONŲ GEOTERMINĖS ANOMALIJOS

Kratonas – tai kontinentinės plutos sritis, kuri pasižymi ilgalaikiu stabilumu. Dažniausiai jis siejamas su prekambro konsolidacijos Žemės plutos sritimis. Pagal Bates'o ir Jackson'o (Bates, Jackson, 1980) apibrėžimą, kontinentinis kratonas yra “plutos dalis, kuri pasiekė stabilumą ir nebuvo deformuojama ilgą laiką”. Tai gana sąlyginis apibūdinimas, kadangi net ir senuose prekambro konsolidacijos kontinentuose vyko žemės plutos epeirogeniniai ir riftogeniniai grimzdimai ir kilimai, lūžinė tektonika ir pan.

Šiluminis srautas, matuojamas žemės paviršiuje parodo šilumos praradimo intensyvumą ir jo skirtumus įvairiose regionuose - tai jautrus geodinaminių procesų indikatorius. Padidintas šiluminis srautas būdingas tektoniškai aktyvioms sritims, tuo tarpu stabilūs regionai pasižymi mažesnėmis šilumos srauto tankio reikšmėmis. Pasaulyje vykdytų tyrimų duomenys rodo, kad paviršiaus šilumos srautas turi stiprią koreliaciją su litosferos amžiumi ir didėja nuo archėjaus ( $41 - 46 \text{ mW/m}^2$ ) iki proterozojaus ( $49 - 54 \text{ mW/m}^2$ ) ir intensyviausias yra fanerozojinėje litosferoje ( $50 - 70 \text{ mW/m}^2$ ) (McLaren S. et al, 2003) (1.1 pav). Skirtingo amžiaus litosferoje skiriasi ne tik šilumos srautas bet radiogeninių šilumą generuojančių elementų (U, Th, K) koncentracijos plutoje - tai susiję su erozija (daugiausiai radioaktyviųjų cheminių elementų turinti litosferos dalis yra nuerodujinama) (Turcotte D.L., 2002).



**1.1 pav.** Paviršiaus šilumos srauto žemėlapis (Artemieva I.M. et al., 2001)

Kontinentinį šilumos srautą suprasti yra žymiai sunkiau nei šilumos srautą virš okeanų – jo dydis susijęs su daugybe faktorių pvz.: erozijos, sedimentacijos, laiko nuo paskutinio tektoninio įvykio, lokalių šilumą generuojančių elementų koncentracijos. Kontinentinė litosfera taip pat kaip ir okeaninė vėsta ir su laiku storėja. Aukšto šilumos srauto sritys paprastai yra susiję su tektoninėmis sritimis, tačiau pasitaiko ir stabiliose kontinentuose, kur paprastai turi stiprią koreliaciją su šilumą generuojančiais elementais. (Fowler C.M.R., 2002 )

Stabilios kontinentinės litosferos terminį režimą apsprendžia ne tik radioaktyviųjų cheminių elementų koncentracija ir pasiskirstymas litosferoje, bet taip pat šilumos ateinančios iš mantijos kiekis. Daugelio mokslininkų nuomone šilumos srautas iš mantijos stabiliose kontinentinėse litosferose (jei terminis režimas nėra sutrikdytas stiprių klimato pokyčių, tektoninių įvykių ar požeminių vandenų aktyvumo), tikėtina, neviršija 10-20 mW/m<sup>2</sup> ir išlieka sąlyginai žemas, kai tuo tarpu plutos radiogeniniai elementai generuoja apie 30mW/m<sup>2</sup>. Šilumą generuojančių elementų pasiskirstymas kontinentinėje plutoje čia vaidina lemiamą rolę norint įvertinti litosferos terminę struktūrą lokaliu mastu (Cooper C.M. et al., 2004).

Tipinės mantijos šilumos srauto reikšmės archėjinėje litosferoje yra 15-25mW/m<sup>2</sup> (pvz.: Yilgarn, Kaapvaal ir Zimbabvės kratonuose, Superior provincija, didžioji dalis REP įskaitant ir didžiąją dalį Baltijos ir Ukrainos skydų). Mantijos šilumos srautas vidurinio ir vėlyvojo proterozojaus sublitosferoje paprastai yra 25-35mW/m<sup>2</sup> (Artemieva I.M. et al, 2001).

Kai kuriuose kratonų dalyse, visgi, fiksuojamos padidinto intensyvumo geoterminės anomalijos. Geoterminių anomalijų kratonuose prigimties klausimus nagrinėjo daug mokslininkų visame pasaulyje ir jų tyrimai rodo, kad tokių anomalijų kilmė gali būti labai įvairi ir susijusi su: mantijiniais procesais, plutos uolienų šilumos generacija ir šilumos laidumu ir hidrodinaminiais procesais.

#### 1) *Plutos uolienų šilumos generacija*

Pagrindinę paviršiuje matuojamo šilumos srauto dalį sudaro šiluma, kurią generuoja Žemės plutos uolienos. Priklausomai nuo radioaktyvių elementų kiekio, skirtingos uolienos generuoja skirtingą šilumos kiekį. Žemės plutą sudaro labai įvairios sudėties uolienos, vienoms sritims būdingas padidintas bazinių uolienų kiekis, kitose srityse intensyviai formavosi granitinės sudėties uolienos. Atitinkamai, pirmo tipo srityse šilumos srautas bus mažesnis, nei antrojo tipo srityse. Kaip rodo geoterminiai tyrimai, skirtinga uolienų šilumos generacija yra viena pagrindinių priežasčių lemiančių šilumos srauto variacijas. Su jomis siejamos ir kai kurios gana intensyvios geoterminės anomalijos pvz.: Australijoje (Cooper baseinas), Kanadoje, Afrikoje (Kaapval kratone, Namaqua mobilioje juostoje), Indijoje (Dharwar kratonas, Bastar kratonas) (McLaren S. et al, 2003; Lewis T.J. et al, 2003; Jones M.Q.W., 1992; Jones M.Q.M. et al, 1987; Gupta M.L., 1993).

#### 2) *Mantijiniais procesais*

Šalia Žemės plutos uolienų įtakos šilumos srautui, atskiruose regionuose didelę įtaką geoterminių anomalijų formavimuisi turi mantijiniai procesai. Su jais susijęs efektyvesnis šilumos perdavimas iš gelmių mantijos lygyje, taip pat tokiose srityse yra aktyvūs lūžiai, išilgai kurių kyla karšta magma arba karšti fluidai, lemiantys padidintas šilumos srauto reikšmes. Kaip rodo geofiziniai ir geoterminiai tyrimai, mantijinių procesų mastas gali būti skirtingas, jie siejamas su skirtingais mantijinio nestabilumo mechanizmais. Galima sąlyginai skirstyti stambaus masto mantijinius procesus (Rytų Afrikos Plato) (Weeraratne et al, 2003) ir lokalias anomalijas (Baltarusija, Pietų Afrika, Kanada (šiaurės Prairies regiono) (Ballard S. et al, 1987; Majorowicz J.A., 1999).

3) ***Hydrodinaminias procesais***

Fluidų srautai turi skirtingą įtaką geoterminėms sistemoms. Sritys, kur vyksta intensyvi atmosferinio vandens infiltracija yra šaldomos, o sritys, kuriose išsikrauna požeminis vanduo yra šildomos. Pastarieji srautai gali būti regioninio pobūdžio (pertekėjimas vandeningais horizontais) ir lokalaus masto (išilgai lūžių). Būtent su lūžių aktyvumu siejamos kai kurios geoterminės anomalijos kratonuose: Kanadoje (Alberta regionas) (Bachu. S., 1988), Baltarusijoje (Orsha depresijoje) (Zui et al., 1998).

4) ***Nuosėdinių uolienu terminė izoliacija***

Nustatant regiono terminį režimą ir numatant temperatūrų pasiskirstymą žemės gelmėse būtina atsižvelgti į nuosėdinės dangos šilumos laidumą. Nuosėdinės dangos uolienu šilumos laidumas yra labai įvairus ir priklauso tiek nuo pačių uolienu mineraloginės sudėties, porų kiekio bei porų fluideo sudėties



## 2. TERMOFIZINIŲ PARAMETRŲ NUSTATYMO METODAI

Žemės plutos geoterminio lauko vertinimui labai svarbus korektiškas uolienu šilumos fizikinių parametrų nustatymas. Darbe buvo naudojami trys skirtingi metodai, siekiant sudaryti kuo tikslesnį Žemės plutos geoterminį modelį: laboratoriniai, giluminės seisminės žvalgybos duomenų interpretavimas, geofizinių tyrimų gręžiniuose interpretavimas. Plutos ir nuosėdinių uolienu termofiziniai parametrai t.y. uolienu šilumos generacija ( $A$ ) ir šilumos laidumas ( $k$ ) gali būti nustatytas tiesioginiais (nustatyta laboratorijoje) ir netiesioginiais metodais (išskaičiuota per termofizinių parametrų ir geofizinių duomenų priklausomybes).

Nustatant uolienos mėginio šilumos generaciją remiamasi cheminės uolienu analizės duomenimis, t.y.  $U$ ,  $Th$ ,  $K$  koncentracija bei papildomai nustatomas mėginio tankis. Turint tokius duomenis šilumos generacija gali būti paskaičiuojama pagal šią formulę (Rybach, 1979):

$$A = \rho(9.52C_U - 2.56C_{Th} + 3.48C_K)10^{-5}; \quad 2.1$$

čia  $A$  – šilumos generacija ( $\mu W/m^3$ ),  $C_U$  ir  $C_{Th}$  –  $U$  ir  $Th$  koncentracijos (ppm) ir  $C_K$  yra  $K$  koncentracija (%),  $\rho$  yra tankis ( $kg/m^3$ ).

Tuo tarpu šilumos generacijos reikšmės sluoksniams, kurie nepasiekiami gręžiniais, gali būti apytiksliai nustatytos pagal empirines formules, siejančias seisminių bangų greičius su šilumos generacija. Šilumos generacija gali būti išskaičiuota per seisminių bangų ( $V_p$ ) priklausomybę pagal šią dažniausiai naudojamą tokio tipo tyrimuose formulę (Rybach and Buntebarth, 1982, 1984):

$$\ln A = 12.6 - 2.17V_p(20,100) \quad 2.2$$

čia  $A$  – šilumos generacija ( $\mu W/m^3$ ),  $V_p(20,100)$  – išilginių seisminių bangų greitis  $20^\circ C$  temperatūros ir 100 MPa slėgio sąlygomis.

Kad paskaičiuoti plutos uolienu šilumos generaciją tam tikrame gylyje iš 2.2 priklausomybės, pirmiausia daroma pataisa išilginių seisminių bangų greičiams (lygtis 2.3) – jie perskaičiuojami į  $20^\circ C$  ir 100MPa sąlygas, naudojant faktorių  $B(Z)$ :

$$V_p(20,100) = V_p(T,P) [1+B(Z)/V_p(T,P)] \quad 2.3$$

kuris pagal Pasquale et al. (1990) ir Cermak et al. (1991) yra išreiškiamas sekančiai:

$$B(Z) = \int_T^{20} \frac{dV_p}{dT}(T)dT + \int_P^{100} \frac{dV_p}{dP}(P)dP \quad 2.4$$

čia B(Z) yra korekcijos faktorius, T yra temperatūra ir P yra slėgis. P tam tikrame gylyje yra paskaičiuojamas iš seisminių bangų greičių ir tankio priklausomybės.

Seisminių bangų greičių pokyčiai rodo uolienu sudėties kaitą su gyliu, o skirtingos uolienos sudarančios Žemės pluta turi ne vienodą šilumą generuojančių elementų koncentraciją (1.1 lentelė). Įvairių laboratorinių tyrimų metu pasaulyje buvo nustatyta, kad bazinės uolienos (pvz. peridotitai, bazaltai) turi mažesnę šių elementų koncentraciją, o rūgščios uolienos, tokios kaip granitai – didesnę.

**1.1 lentelė.** Vidutinės šilumą generuojančių elementų koncentracijos (milijoninėmis dalimis (ppm) arba procentais (%)) įvairiose uolienose (pagal Fowler, 2002).

Uoliena	Radioaktyviųjų izotopų koncentracija		
	U (ppm)	Th(ppm)	K(%)
“Neišsekinta” mantija	0.031	0.124	0.031
“Išsekinti” peridotitai	0.001	0.004	0.003
Toleitiniai bazaltai	0.07	0.19	0.088
Granitas	4.7	20	4.2
Mergelis	3.7	12	2.7
Kontinentinė pluta	1.42	5.6	1.43

Sudarant geoterminį modelį plutos uolienu generacija buvo perskaičiuota pagal 2.2 lygtį iš Eurobridge gilaus seisminio zondavimo duomenų (1.2 lentelė) bei buvo panaudoti plutos uolienu šilumos generacijos laboratorinių matavimų duomenys.

**1.2 lentelė.** Šilumos generacijos plutos uolienoms perskaičiuotos iš Eurobridge seisminių duomenų.

<b>Vakarų Lietuva</b>			
	Intervalas, km	V <sub>p</sub> (20,100)	A, μW/m <sup>3</sup>
Žemų greičių zona	10 - 14	6,14	0,48
Viršutinė pluta	14 - 19	6,30	0,34
Vidurinė pluta	19 - 31	6,55	0,20
Apatinė pluta	31 - 43	6,90	0,09
<b>Centrinė Lietuva</b>			
	Intervalas, km	V <sub>p</sub> (20,100)	A, μW/m <sup>3</sup>
Žemų greičių zona	10 - 13	6,12	0,51
Viršutinė pluta	13 - 22	6,34	0,31
Vidurinė pluta	22 - 33	6,47	0,24
Apatinė pluta	33 - 46	6,78	0,12
<b>Rytų Lietuva</b>			
	Intervalas, km	V <sub>p</sub> (20,100)	A, μW/m <sup>3</sup>
Žemų greičių zona	10 - 13	6,33	0,32
Viršutinė pluta	13 - 16	6,33	0,32
Vidurinė pluta	16 - 28	6,47	0,24
Apatinė pluta	28 - 52	6,90	0,09

Kitas svarbus termofizinis parametras yra uolienų šilumos laidumas (k), kuris priklauso nuo kelių faktorių:

- 1 - mineralinės sudėties (2.2 lentelė) – skirtingi mineralai šilumą praleidžia ne vienodai.
- 2- poringumo – vanduo esantis porose mažina uolienų šilumos laidumą.

**2.2 lentelė** Vidutinės šiluminio laidumo reikšmės ( $k$ ) skirtingoms uolienoms ir mineralams.  
 Pastaba: \*Šiluminis laidumas yra nustatytas prie Žemės paviršiaus temperatūrų. (iš dalies pagal Brigaud and Vasseur (1989), iš dalies pagal Allen & Allen (2004).

<b>Uoliena</b>	<b>Šilumos laidumas <math>k^*</math>, (W/m °C)</b>
<b><i>Mineralai būdingi nuosėdinėm uolienom</i></b>	
Vanduo (pore fluid)	0.6
Kvarcas	7.7
Kalcitas	3.3
Dolomitas	5.3
Anhidritas	6.3
Kaolinitas	2.6
Chloritas	3.3
Ilmenitas/Smektitas	1.9
<b><i>Nuosėdinės uolienos</i></b>	
Mergelis	1.2-3.0
Smiltainis	1.5-4.2
Klintis	2.0-3.4
Dolomitas	3.2-3.5
<b><i>Metamorfinė uolienos</i></b>	
Gneisas	2.1-4.2
Amfibolitas	2.1-3.8
<b><i>Magminės uolienos</i></b>	
Bazaltas	1.3-2.9
Granitas	2.4-3.8
Gabras	1.9-4.0
Peridotitas	3.0-4.5

Šis parametras gali būti nustatytas tiesiogiai laboratorijoje. Tokių tyrimų Lietuvoje yra labai nedaug. Buvo tirti kai kurie kambro uolienų pavyzdžiai (Joeleht et al., 2002), taip pat devono uolienų šilumos laidumas (Kepežinskas ir kt., 1996). 2005 m Arhus universitete Danijoje šio darbo autorė ištyrė nemažai mėginių iš kristalinio pamato (2.3 lentelė). Remiantis pastaraisiais tyrimais viršutinės plutos uolienų šilumos laidumas yra 2.9 W/m°C – šis dydis buvo integruotas į geoterminį modelį.

2.3 lentelė. Šiluminis laidumas Lietuvos nuosėdinėse ir kristalinėse uolienose.

Grėžinys	Uoliena	Gylis, m	Šiluminis laidumas, W/m°C	Tankis, kg/m <sup>3</sup>
<b>Kristalinio pamato uolienos</b>				
Sutkai 87	Felziniai metavulkanitai	1138.4	2.63	2850
Sutkai 86	Granito gneisas, migmatizuotas	1236.7	3.47	3200
Vrb 434	Felziniai metavulkanitai	1004.3	2.80	2750
E 420	Granitas	421.6	3.65	2680
V 404	Amfibolitas	461.0	2.31	3150
D 407	Milonitas, migmatizuotas	460.3	3.28	2730
Vr 975	Migmatitas	432.5	2.69	2750
Vr 1060	Migmatitas	620.0	2.53	2910
Nsd 2	Milonitas ir čarnokitas	2031.5	3.57	2630
Bbr 109 (Bebirva)	Kordieritinis gneisas, metapsamitas	1588.3	2.87	2970
Pociai 2	Metapelitinas, migmatizuotas	2054.2	4.67?	2690?
Vrl 268	Gabras	482.7	3.14	2770
L 28	Amfibolitas	570.0	3.03	2900
Prm 1	Px γδ, milonitizuotas	2362.8	3.20	2600
Stumbrės	Čarnokitas	2145.0	2.56	2790
Mkl 1 (Mikoliskes)	Čarnokitas		3.03	2810
Tubausiai 1	Čarnokitas		2.56	2820
Vd 1 (Vydmantai)	Čarnokitas		2.23	2810
Vabalai 1	Granitas	2296.0	3.36	2720
Vnt 1	Granitas	2109.0	3.41	2750
ZN 4	Granitas	2210.0	3.39	2720
Brz 3 (Barzdenai)	Granitas	2233.0	2.91	2640
Brz 1	Granitas	2219.0	3.04	2820
<b>Nuosėdinės uolienos</b>				
A 70	Mergelis	1193.5	2.05 (šlapias)	2420(sausas)
A 70	Mergelis	860.5	2.97 (šlapias)	2710(sausas)

Kita vertus jei nėra galimybės atlikti laboratorinių tyrimų šilumos laidumą galima nustatyti netiesioginiu būdu t.y. išskaičiuoti naudojant geofizinių tyrimų grėžiniuose duomenis (šis metodas plačiau aptartas 7 skyriuje).

### 3. MATEMATINIS INVERSINIS METODAS, JO TAIKYMAS DETALIZUOJANT GEOTERMINES ANOMALIJAS

Petrofizinių savybių variacijos žemės plutoje atspindi skirtingo intensyvumo geofiziniuose laukuose. Paprastai, kalbant apie giliuosius žemės sluoksnius nepasiekiamus šiuolaikinei gręžimo technikai, mes tiksliai nežinome kokiomis petrofizinėmis, termofizinėmis, cheminėmis ir t.t. charakteristikomis pasižymi minėtos uolienos žemės gelmėse. Apie šių uolienų savybes sprendžiame interpretuodami atitinkamo geofizinio lauko intensyvumą žemės paviršiuje bei nustatinėjame galimas uolienų variacijas galėjusias sąlygoti analizuojamą geofizinį lauką. Tai yra vadinama inversine problema. Geologijoje, taip pat ir geofizikoje inversinių uždavinių (problemų) sprendinių yra labai daug. Iš seisminių bangų greičių interpretuojamos uolienų tankis, litologija, gravitacinio lauko – uolienų tankis, iš paviršiaus šilumos srauto, gradiento ir išmatuotų temperatūrų – termofizinės uolienų savybės ir net mantijos šilumos srautas. Pastaroji inversinė problema ir nagrinėjama šiame darbe. Kad nustatyti šilumos srautą iš mantijos reikia gerai žinoti plutos ir nuosėdinės dangos uolienų termofizines savybes, kad būtų galima apskaičiuoti kiek šilumos generuoja pati pluta. Tai nėra taip paprasta. Didžioji dalis duomenų (taip pat ir parametrai matuoti laboratorijose) turi didesnes ar mažesnes paklaidas, todėl tikriausiai nei viena geofizinė inversinė problema negali būti išspręsta pateikiant vieną teisingą atsakymą. Išmatuotą geofizinį lauką žemės paviršiuje gali paaiškinti daugybė skirtingų žemės plutos modelių. Mūsų užduotis rasti labiausiai plutos uolienų parametrų rinkinį geriausiai paaiškinantį geofizinio lauko variacijas ir intensyvumą. Inversinėms problemoms spręsti buvo sukurta daug matematinių modeliavimo (skaičiavimo) metodų – vienas jų MCMC (Markovo Grandinės Monte Karlo) metodas.

Tiesioginis uždavinys gali būti išreikštas taip:

$$\vec{d} = g(\vec{p}); \quad 3.1$$

čia  $\vec{d}$  yra išmatuotų duomenų vektorius,  $\vec{p}$  yra modelio parametrų vektorius ir  $g$  yra konstanta.

Sprendžiant atvirkštinį uždavinį reikia surasti kuo daugiau ( $\vec{p}$ ) parametrų rinkinių patenkinančių 3.1 lygtį.

Žemės plutos terminę struktūrą kai šiluma yra perduodama kondukcijos būdu nusako Fourier taisyklė:

$$Q_0 = k \cdot \nabla T / \nabla z; \quad 3.2$$

čia  $Q_0$  yra šilumos srautas žemės paviršiuje,  $k$  yra uolienu šilumos laidumas ir  $\nabla T / \nabla z$  yra geoterminis gradientas.

Analizuojant žemės gelmių terminę struktūrą Lietuvoje buvo sudarytas 1D geoterminis modelis, siekiant surasti/nustatyti žemės plutos modelį (t.y. sluoksnių parametrų rinkinį), kuris geriausiai papaiškintų paviršiaus šilumos srautą, o pagrindinis tikslas - nustatyti šilumos srautą iš mantijos.

Priklausomai nuo to, kaip gerai vienas ar kitas parametras yra žinomas, kiekvienam jų buvo priskirtas tam tikras paklaidos dydis. Parametrms išmatuotiems laboratorijoje ar gręžiniuose – mažesnis, kitiems, kurių dydis yra numanomas, bet tiksliai nežinomas – didesnis. Kadangi apie mantijos šilumos srautą Lietuvos teritorijoje mes žinome mažai tai šiam parametrui priskirta didžiausia paklaida - 20mW/m<sup>2</sup> (lentelė 3.1)

1D geoterminio modelio ribinės sąlygos: paskaičiuotas paviršiaus šilumos srautas gręžinyje, temperatūra žemės paviršiuje bei temperatūros išmatuotos gręžiniuose.

Mantijos šilumos srautas išreiškiamas sekančiai:

$$Q_0 = Q_m + d_n \cdot A_n; \quad 3.1$$

čia  $Q_m$  yra mantijos šilumos srautas,  $Q_0$  yra šilumos srautas žemės paviršiuje,  $d_n$  yra sluoksnio generuojančio šilumą storis ir  $A_n$  yra sluoksnio šilumos generacija.

O sprendžiant praktinius Vakarų Lietuvos anomalijos klausimus buvo skaičiuojama temperatūros – gylio profiliai gręžiniuose ir sprendžiama sekanti lygtis:

$$T(z) = - \frac{A}{2k} z^2 + \frac{Q_0}{k} z + T_0, \quad 3.2$$

čia  $T(z)$  yra temperatūra tam tikrame gylyje,  $A$  yra šilumos generacija,  $k$  yra uolienu šilumos laidumas,  $z$  yra gylis,  $T_0$  yra temperatūra žemės paviršiuje.

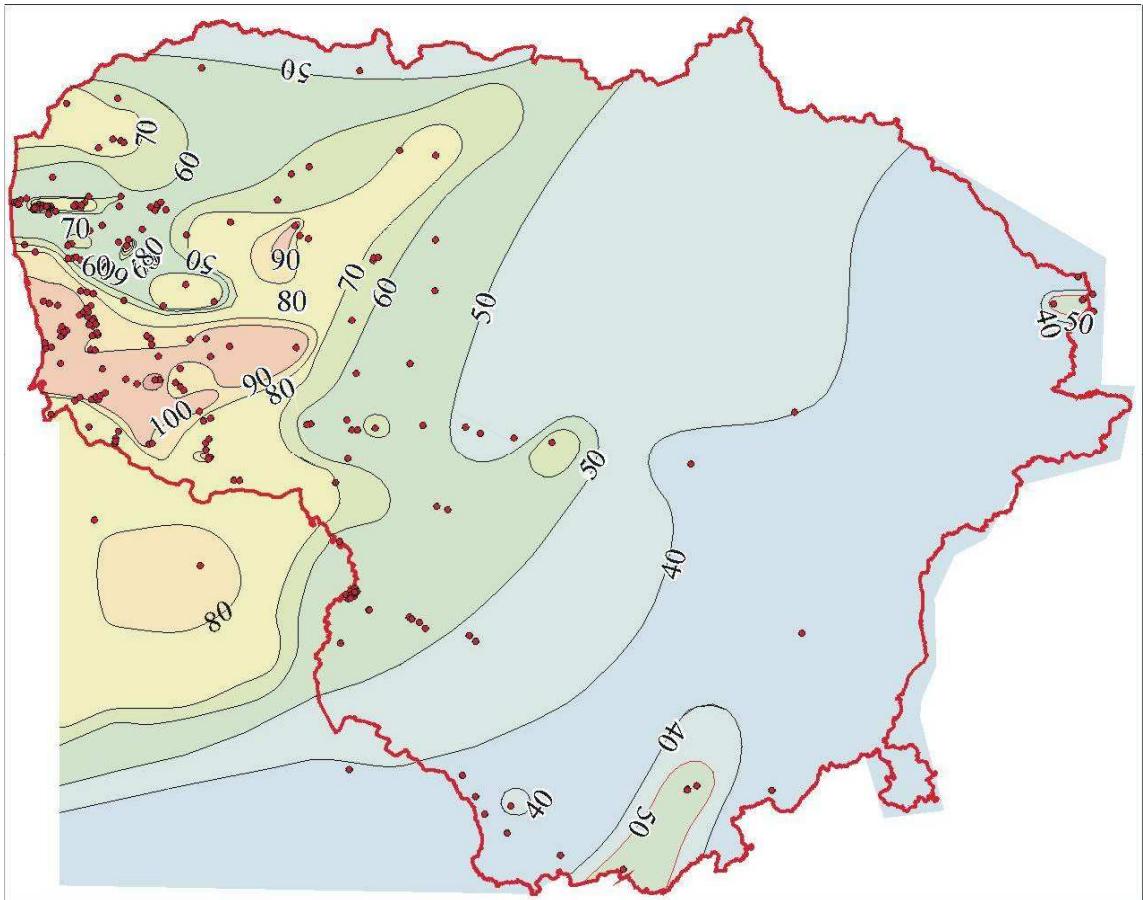
**3.1 lenetelė. Parametrų naudotų geoterminiame modelyje paklaidos dydžiai.**

<b>Parametras</b>	<b>Paklaidos dydis</b>
$T_0$ (temperatūra žemės paviršiuje)	3 °C
$Q_0$ (šilumos srautas žemės paviršiuje)	10mW/m <sup>2</sup>
k (uolienu šilumos laidumas)	0.5 W/m°C
T (temperatūros išmatuotos gręžinyje)	10°C
$Q_m$ (mantijos šilumos srautas)	25mW/m <sup>2</sup>



#### 4. LIETUVOS GEOTERMINIAI RAJONAI

Didesnėje Lietuvos teritorijos dalyje šilumos srautas yra lygus arba mažesnis nei  $50 \text{ mW/m}^2$ , bet vakarinėje Lietuvos dalyje jis padidėja. Šis perėjimas yra gan staigus ir anomalus - šilumos srautas pakinta nuo 50 iki 90, vietomis net iki  $100 \text{ mW/m}^2$  (4.1. pav.). Šilumos srauto reikšmės mažėja iš Vakarų į rytus. Deja, šilumos srauto skaičiavimai Lietuvą dengia netolygiai – Vakarų Lietuvoje šių matavimų yra žymiai daugiau nei rytinėje dalyje. Intensyviausias šilumos srautas sutampa su Žemaičių Naumiesčio (ŽN) granitoidų masyvu - tai siejama su padidintu šio masyvo uolienu radioaktyvumu. ŽN granitų, kurie sudaro, manoma, 4km storio intruziją, vidutinė radiogeninė generacija yra  $7.5 - 8.0 \mu\text{W/m}^3$  (Šliaupa S. et al., 2004). Tokio storio ir šiluminės generacijos granitų indėlis į paviršiaus šilumos srautą turėtų būti apie  $30 \text{ mW/m}^2$ , tačiau tai negali visiškai paaiškinti tokio intensyvaus šilumos srauto ir leidžia spėti, kad mantijos šilumos srautas taip pat gali būti šiek tiek intensyvesnis nei įprasta tokio amžiaus kratonuose. Be to anomalus šilumos srautas apima daug didesnę vakarų Lietuvos teritoriją nei šių granitų paplitimas plutoje.



4.1. pav. Lietuvos šilumos srauto žemėlapis ( $\text{mW/m}^2$ ) (pagal Šliaupa, 2004).

Remiantis šilumos srauto bei geoterminio gradiento reikšmėmis Lietuvos teritoriją galima suskirstyti į tris geoterminius rajonus:

- Rytų Lietuvos geoterminė provincija - šilumos srauto reikšmės yra 31 – 42mW/m<sup>2</sup>. Rytų Lietuvos geoterminė provincija apima Rytų Lietuvos raukšlinę zoną su sustorėjusia pluta. Geoterminis gradientas šioje geoterminėje provincijoje taip pat mažiausias - <2°C/100m

- Centrinė Lietuvos geoterminė provincija, kur šilumos srauto reikšmės 47 – 65mW/m<sup>2</sup> reikšmių ribose. Vienų autorių nuomone vakarinė šios provincijos riba žymi ribą tarp sineklizės ir anteklizės, kitų autorių nuomone sutampa su Vakarų Lietuvos Granulitų masyvo pakraščiu.

- Vakarų Lietuvos geoterminė provincija, kur šilumos srautas yra labai kaitus ir kinta nuo 65 iki 100 mW/m<sup>2</sup>. Didžiausios šilumos srauto ir geoterminio gradiento reikšmės fiksuojamos pietinėje vakarų Lietuvos dalyje ir sutampa su ŽN. Šilumos generacija šiose uolienose kinta nuo 2-19μW/m<sup>3</sup>, nors vidurkinė reikšmė yra 7.5 - 8μW/m<sup>3</sup>. Geoterminis gradientas vakarų Lietuvoje pakyla net iki 3°C/100m, o lokaliai net iki 4.5°C/100m (LGT Fondų Ataskaita Nr. 5769, II dalis, autorius S.Šliaupa, Geoterminių duomenų rinkimas ir sisteminimas; Ataskaita Nr. 4745, Baltijos sedimentacinio baseino vystymosi bazinis geofizinis-geologinis modelis, autoriai S.Šliaupa ir J.Lazauskienė).

## 5. VAKARŲ LIETUVOS GEOTERMINIO LAUKO MODELIS

Geoterminis modelis Lietuvos teritorijai sudarytas siekiant geriau suprasti šiluminę gelmių struktūrą, detalizuoti Vakarų Lietuvos geoterminę anomaliją bei išskirti perspektyvius plotus geoterminės energijos eksploatacijai. Modeliavimo tikslai visų pirma yra moksliniai, tačiau aptariami ir praktiniai aspektai.

### 5.1 MODELIO PARAMETRAI

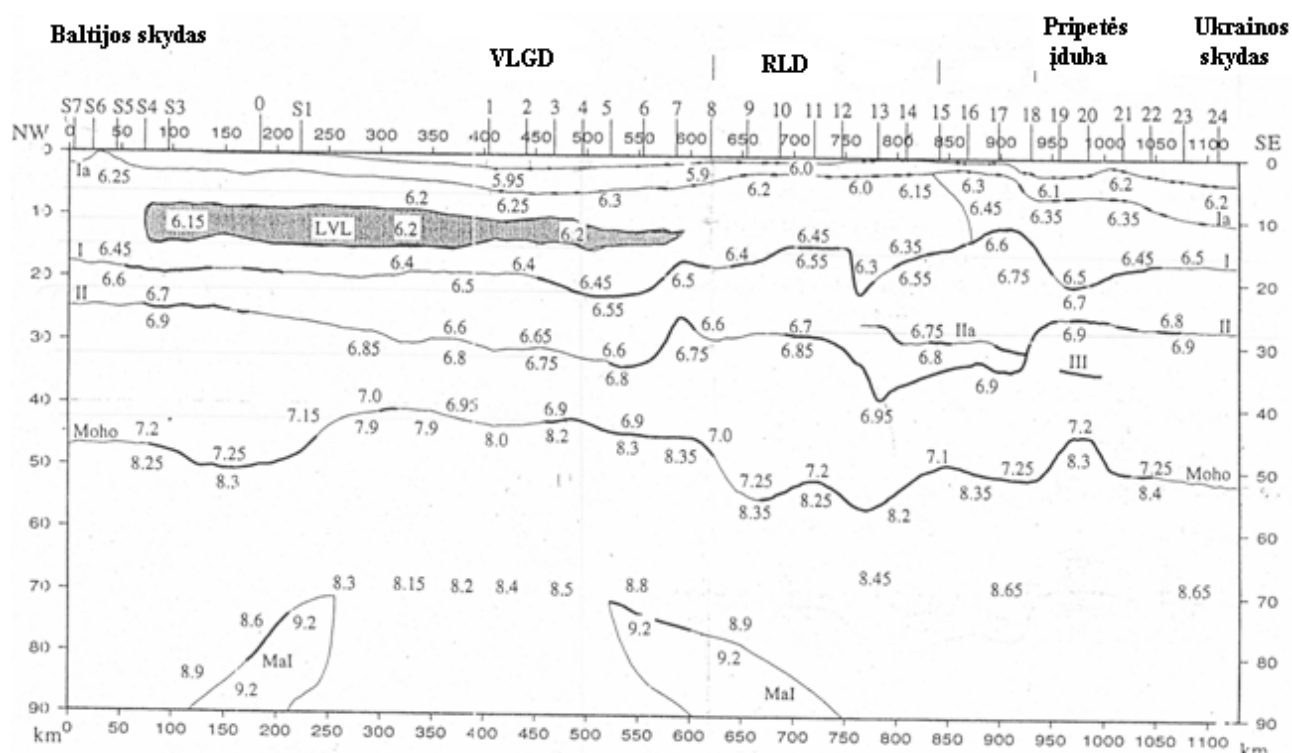
Geoterminiam modeliavimui buvo panaudoti 43 gręžinių, esančių Vakarų, centrinėje ir rytų Lietuvoje, duomenys (5.1.1 pav).

Meškinė-1, Naumiestis-2, Pajuris-1, Rukai-2, Šilutė-1, Usėnai-1, Vabalai-1, Žalgiriai-1, Ramučiai-1, Žemytė-1, Purmaliai-1, Akmenė-71, Šlapgiriai-1, Kuliai-1, Žutautai-1, Gribždėnai-3, Vydmantai-1, Sakučiai-1, Kretinga-3, Mamiai-1, Salantai-3, Kužiai-65, Šilalė-1, Vilkaviškiai-127, Lazdijai-2, Lazdijai-6, Lazdijai-29, Lazdijai-30, Genčiai-2, Baubliai-3, Ramoniškis-54, Šaukėnai-91, Žviliai-1, Tryškiai-73, Šakiai-42, Stankevičiai-4, Pabalvė-1, Girdžiai-37, Vilkyciai-10, Klaipėda-1, Marcinkonys-2, Varena-978, Varėna-981.

Gręžiniai, tinkami geoterminiam modeliavimui, atrinkti pagal kokybiškus temperatūros matavimų gręžiniuose duomenis. Pagrindinis reikalavimas, kad temperatūros gręžiniuose būtų pasiekę pusiausvyrą po jos sutrikdymo gręžimo metu. Remiantis geologijos fondo ataskaitomis, temperatūra šiuose gręžiniuose, buvo matuota 10-14 dienų po gręžimo darbų pabaigos. Tai rodo, kad temperatūrų duomenys yra pakankamai patikimi ir tikėtina matavimų metu jau buvo pasiekę pusiausvyrą.

Remiantis uolienu sudėtimi nuosėdinė danga gręžiniuose padalinta į 10 kompleksų: Q – T (smėlinga/molinga storymė), P<sub>2</sub> – evaporitai, D<sub>3ys</sub> (karbonatinė/molinga storymė), D<sub>3šv-up</sub> (smėlinga/molinga storymė), D<sub>2nr</sub> (karbonatinė/molinga storymė), D<sub>2pr-D1</sub> (smėlinga/molinga storymė), S<sub>2</sub> (molinga/karbonatinė storymė), S<sub>1-O</sub> (molinga/karbonatinė storymė), Cm<sub>2</sub> (kvarciniai smiltainiai), Cm<sub>1</sub> (molinga storymė). Kristalinis pamatas padalintas į 7 sluoksnius remiantis GSZ (giluminio seisminio zondavimo) duomenimis: karštieji granitai, terminis sluoksnis, mažų seisminių greičių sluoksnis, viršutinė pluta, vidurinė pluta, apatinė pluta, mantija.

Šilumos srauto reikšmės kiekvienam gręžiniui priskirtos pagal Lietuvos paviršiaus šilumos srauto žemėlapi (4.1 pav), šilumos laidumo reikšmės – pagal litologinę sudėtį bei remiantis literatūriniais duomenimis (2.2 pav), išskyrus silūro amžiaus uolienas – pastarajam uolienų kompleksui šilumos laidumas buvo pamatuotas 2005m Arhus (Danija) universiteto laboratorijoje. Plutos uolienų šilumos generacijos reikšmės priskirtos pagal laboratorinius matavimus (G.Motuzos ir S.Šliaupos duomenys) bei paskaičiuotos iš priklausomybės tarp išilginių seisminių bangų greičio ir šilumos generacijos (lygtis 2.2). Šiam tikslui panaudoti EUROBRIDGE seisminio profilio duomenys.



5.1.1 pav. Vp Seisminių bangų greičiai išilgai EUROBRIDGE gilaus seisminio zondavimo profilio (pagal R.Giese, 1998). VLGD – Vakerų Lietuvos granulitų domeinas, RLD – rytų Lietuvos domeinas

**Lentelė 5.1.1. Meškinė – 1 gręžinio duomenų masyvas naudotas modeliavime.  $k$  – šilumos laidumas ( $W/m^{\circ}C$ ),  $A$ - šilumos generacija ( $\mu W/m^3$ ).**

**Meškinė\_1:**

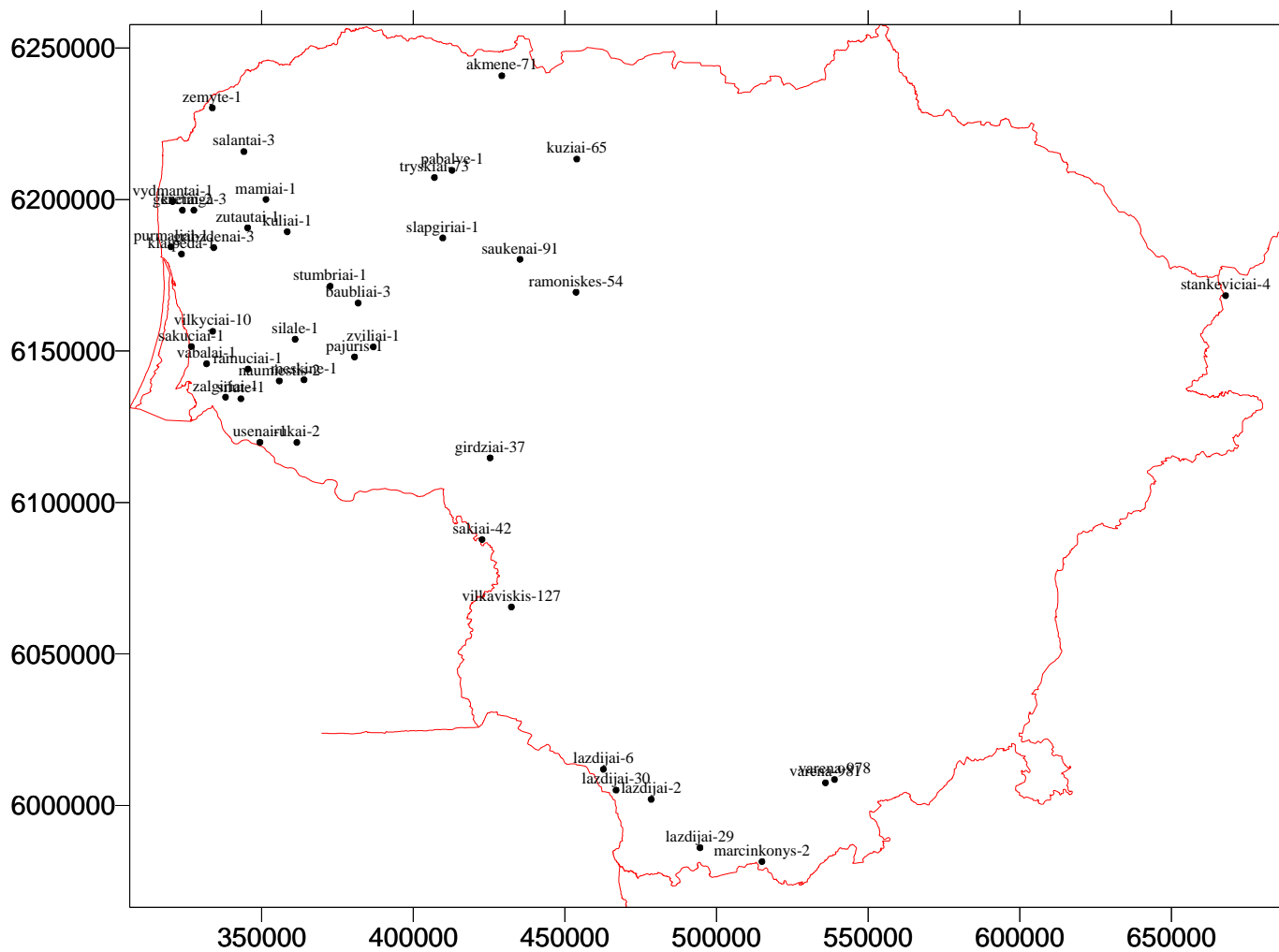
<i>Koordinatės LKS 94</i>	55.3217	21.4492
<i>Temperatūr (<math>^{\circ}C</math>), šilumos srautas(<math>mW/m^2</math>)</i>	10.0	0.088

*Sluoksniai*

	Storis (m)	$k$ ( $W/m^{\circ}C$ )	$A$ ( $\mu W/m^3$ )
Q-T (smėlinga/molinga st.)	438	3.0	0.5e-6
P <sub>2</sub>	102	5.0	0.5e-6
D <sub>3</sub> ys (karbonatinė/molinga st.)	28	2.85	0.5e-6
D <sub>3</sub> šv-up (smėlinga/molinga st.)	96	2.9	0.5e-6
D <sub>2</sub> nr (karbonatinė/molinga st.)	254	2.3	0.5e-6
D <sub>2</sub> pr-D1 (smėlinga/molinga st.)	354	2.8	0.5e-6
S <sub>2</sub> (molinga/karbonatinė st.)	609	2.15	0.5e-6
S <sub>1</sub> -O (molinga/karbonatinė st.)	183	1.9	0.5e-6
Cm <sub>2</sub> (kvarcniai smiltainiai)	60	5.0	0.5e-6
Cm <sub>1</sub> (molinga st.)	84	2.0	0.5e-6
KP (Karstieji granitai)	4500	2.9	7.74e-6
Terminis sluoksnis	3292	2.9	1.7e-6
Mažų seisminių greičių sluoksnis	4000	2.9	0.48e-6
Viršutinė pluta	5000	2.7	0.32e-6
Vidurinė pluta	12000	2.5	0.21e-6
Apatinė pluta	12000	2.1	0.11e-6
Mantija	20000	2.5	0.002e-6

*Temperatūrų matavimai gręžiniuose*

Gylis, m	T, $^{\circ}C$
240.0	20.38
537.01	28.14
700.07	31.88
830.04	35.81
1090.08	43.93
1860.09	77.28
2147.64	89.94



5.1 pav. Gręžiniai, naudoti geoterminiame modelyje.

## 5.2 REZULTATAI

Intensyviausias šilumos srautas žemės paviršiuje (5.2.1 ir 5.2.2 pav.) sutampa su Žemaičių Naumiesčio masyvu ir gali būti paaiškintas padidinta ši masyvą sudarančių granitoidų šilumos generacija. Tačiau tai nepaaiškina visos Vakarų Lietuvos šilumos srauto anomalijos. Buvo iškelta hipotezė, kad šią geoterminę anomaliją galėjo sąlygoti šiek tiek intensyvesnis mantijos šilumos srautas vakarų Lietuvoje.

Vakarų Lietuvos geoterminės anomalijos prigimčiai detalizuoti buvo sudarytas geoterminis modelis. Pastarųjų tyrimų rezultatai, rodo, kad šilumos srautas iš mantijos vakarų Lietuvoje vietomis siekia  $42 \text{ mW/m}^2$ , kai tuo tarpu rytų Lietuvoje šilumos srautas iš mantijos neviršija  $30 \text{ mW/m}^2$  (5.2.3 pav ir 5.2.4 pav). Skirtumas tarp rytų ir vakarų Lietuvos šilumos srauto iš mantijos atsižvelgiant į Lietuvos teritoriją yra šiek tiek per didelis –  $10\text{-}12 \text{ mW/m}^2$ .

Be to ankstesnių tyrimų duomenimis mažo šiluminio laidumo nuosėdinių uolienu danga taip pat įtakoja šilumos srautą. Tai išreiškia Fourier lygtis:

$$Q = k \times \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad 5.2.1$$

čia  $Q$  yra šilumos srautas,  $k$  yra šilumos laidumas ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ) ir  $\Delta T / \Delta z$  yra temperatūros gradientas ( $^\circ\text{C/m}$ ).

Ši empirinė Fourier lygtis (5.2.1 lygtis) nusako, kad šilumos perdavimo lygis uolienos ploto vienetu yra proporcingas šilumos gradientui ir šilumos laidumui. Šilumos laidumas pats savaime nesąlygoja geoterminių anomalijų, tačiau yra labai svarbus, nes sukuria regioninį šilumos srauto „foną“.

Kaip jau buvo minėta anksčiau kiekvienas grėžinys buvo padalintas į 17 sluoksnių ir kiekvienam jų priskirtos skirtingos termofizinių parametrų reikšmės. Procesai žemės plutoje yra labai sudėtingi ir šilumos srautas žemės paviršiuje priklauso nuo daug faktorių, tačiau naudojant paprastą lygtį galima paskaičiuoti kiekvieno šio sluoksnio indėlį į paviršiaus šilumos srautą, remiantis jų šilumos generacija.

$$Q = A \cdot d; \quad 5.2.2$$

čia  $Q$  yra šilumos srauto dalis iš tam tikro sluoksnio ( $\text{mW/m}^2$ ),  $A$  yra sluoksnio šilumos generacija ( $\mu\text{W/m}^3$ ) ir  $d$  yra sluoksnio storis (m).

Lentelėje 5.2.1 pateikti nuosėdinės dangos ir plutos uolienu indėlio į šilumos srautą skaičiavimai Meškinė – 1 gręžiniui. Šilumos srautas žemės paviršiuje Meškinė-1 gręžinyje yra  $88 \text{ mW/m}^2$ . Nuosėdinės dangos ir kristalinio pamato uolienu indėlis į paviršiaus šilumos srautą remiantis parametrais pateiktais lentelėje 5.1.1 yra  $48.9 \text{ mW/m}^2$ , likusi šilumos srauto dalis –  $39.1 \text{ mW/m}^2$  tikėtina ateina iš mantijos. Atsižvelgiant į pasaulinius tyrimus mantijos šilumos srautas tektoniškai stabiliose kontinentų dalyse neviršija  $25\text{-}30 \text{ mW/m}^2$ . Tai reiškia, kad šilumos srautas iš mantijos šiame gręžinyje viršija tipinę vertę tektoniškai stabiliems kartonams apie  $10\text{-}15 \text{ W/m}^2$ .

**5.2.1 lentelė.** Meškinė- 1 gręžinio kiekvieno komplekso indėlis ( $Q$ ) į paviršiaus šilumos srautą, remiantis šių sluoksnių storium ( $d$ ) ir jų šilumos generacija ( $A$ ) paskaičiuotas pagal 5.2.1 lygtį.

Sluoksnis	$d$ , m	$A$ , $\mu\text{W/m}^3$	$Q$ , $\text{mW/m}^2$
Q – T	438	0.5	0,2190
P <sub>2</sub>	102	0.5	0,0510
D <sub>3ys</sub>	28	0.5	0,0140
D <sub>3šv-up</sub>	96	0.5	0,0480
D <sub>2nr</sub>	254	0.5	0,1270
D <sub>2pr-D1</sub>	354	0.5	0,1770
S <sub>2</sub>	609	0.5	0,3045
S <sub>1 –O</sub>	183	0.5	0,0915
Cm <sub>2</sub>	60	0.5	0,0300
Cm <sub>1</sub>	84	0.5	0,0420
KP	4500	7.74	34,8300
Terminis sluoksnis	3292	1.7	5,5964
Mažų seisminių greičių sluoksnis	4000	0.48	1,9200
Viršutinė pluta	5000	0.32	1,6000
Vidurinė pluta	12000	0.21	2,5200
Apatinė pluta	12000	0.11	1,3200
Mantija	20000	0.002	0,0400
<b>Bendras plutos ir nuosėdinių uolienu indėlis į paviršiaus šilumos srautą</b>			<b>48,9304</b>



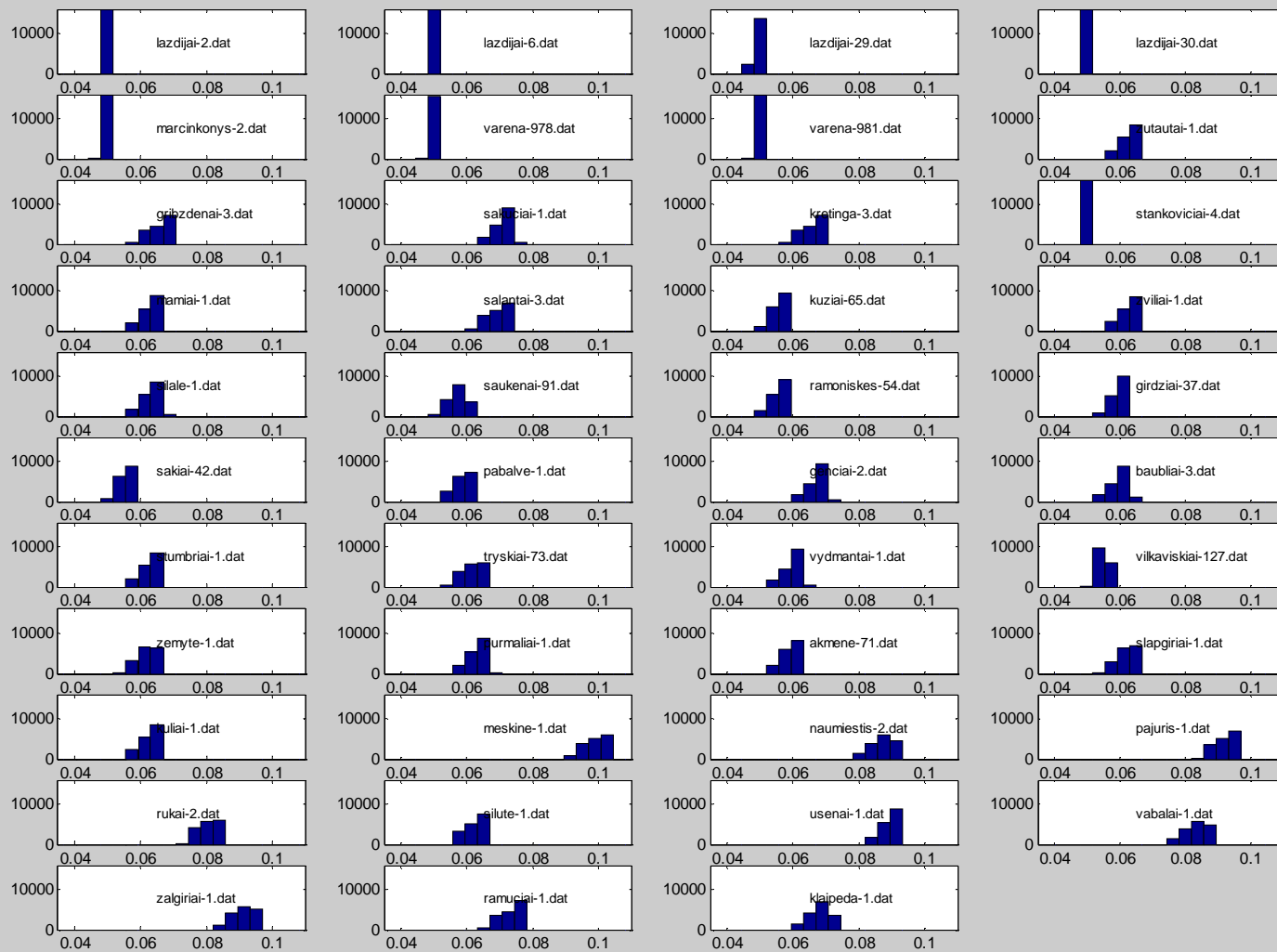
Šilumos srauto žemės paviršiuje histogramos (5.2.3 pav) ir remiantis jomis sudarytas šilumos srauto žemėlapis (5.2.4 pav), rodo, kad paviršiaus šilumos srautas Lietuvoje mažėja iš vakarų į rytus. Ta pačia kryptimi mažėja ir mantijos šilumos srautas.

Padidintą šilumos srautą vakarų Lietuvoje įtakoja keli veiksniai – mantijos aktyvumas, padidintas Žemės plutos radioaktyvumas, nuosėdinių uolienuų terminė izoliacija.

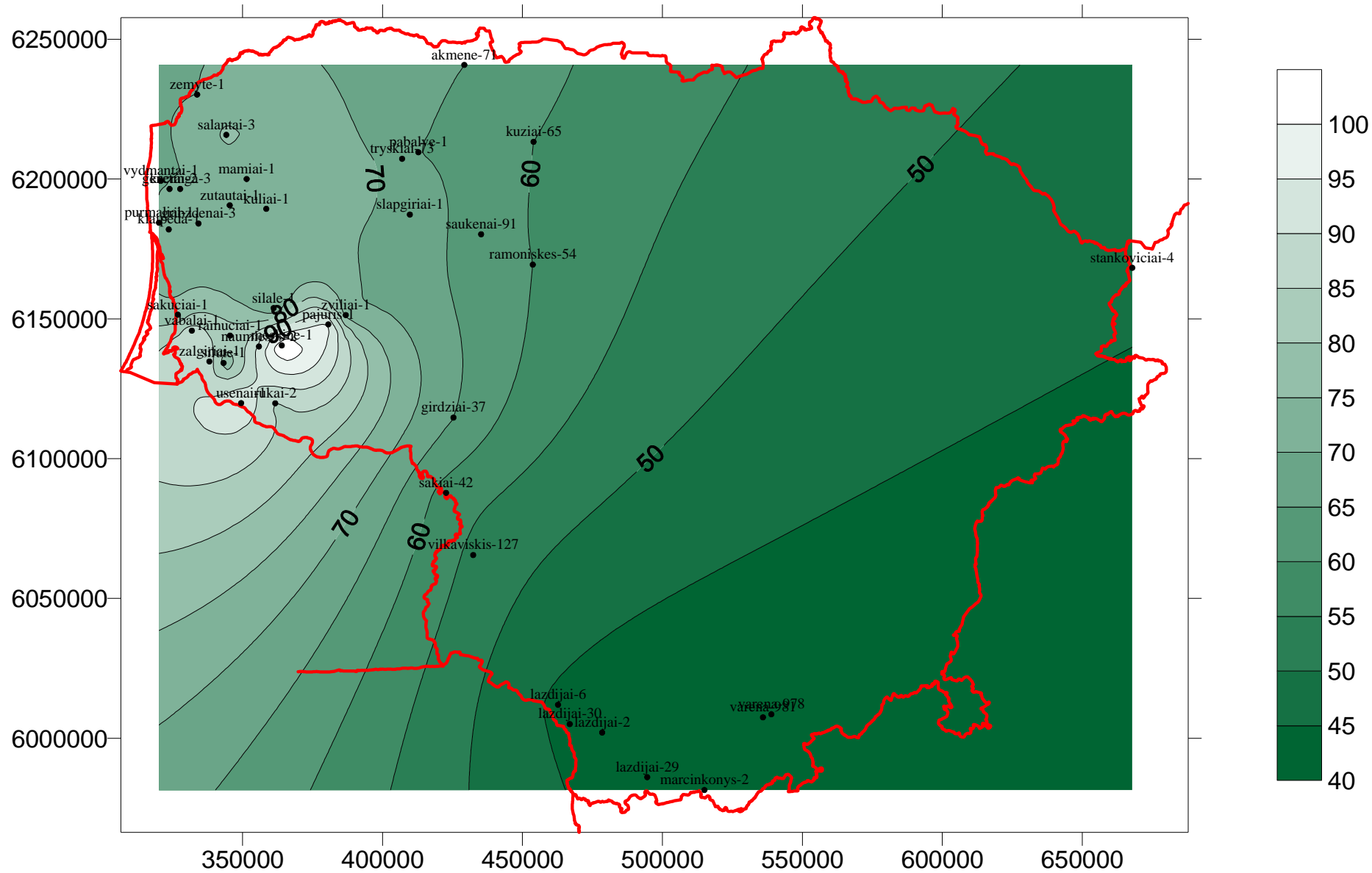
Padidintą šilumos srautą iš mantijos gali sąlygoti įvairūs procesai:

- lokalūs mantijos srautai. Tokie srautai prognozuojami Afrikoje, Kanadoje. Anomalus šilumos srautas Lietuvoje apima sąlyginai nedidelį paviršiaus plotą – 200km juostą. Tai reiškia kad anomaliją sąlygojančių mantijinių procesų mastas turėtų būti labai nedidelis.
- nedidelis kiekis šilumai gerai laidžių mineralų tokių kaip apatitas, žėručiai viršutinėje mantijoje. Šių mineralų išsikristalizavimas ir mantijos jais „praturtinimas“ galėjo ankstyvajame proterozojuje, subdukuojančios plokštės plutos uolienuų lydymosi metu. Tačiau vėlgi, neaišku, koks procentas šių mineralų turėtų būti viršutinėje mantijoje, kad sąlygotų  $10\text{mW/m}^2$  intensyvesnį mantijos šilumos srautą.

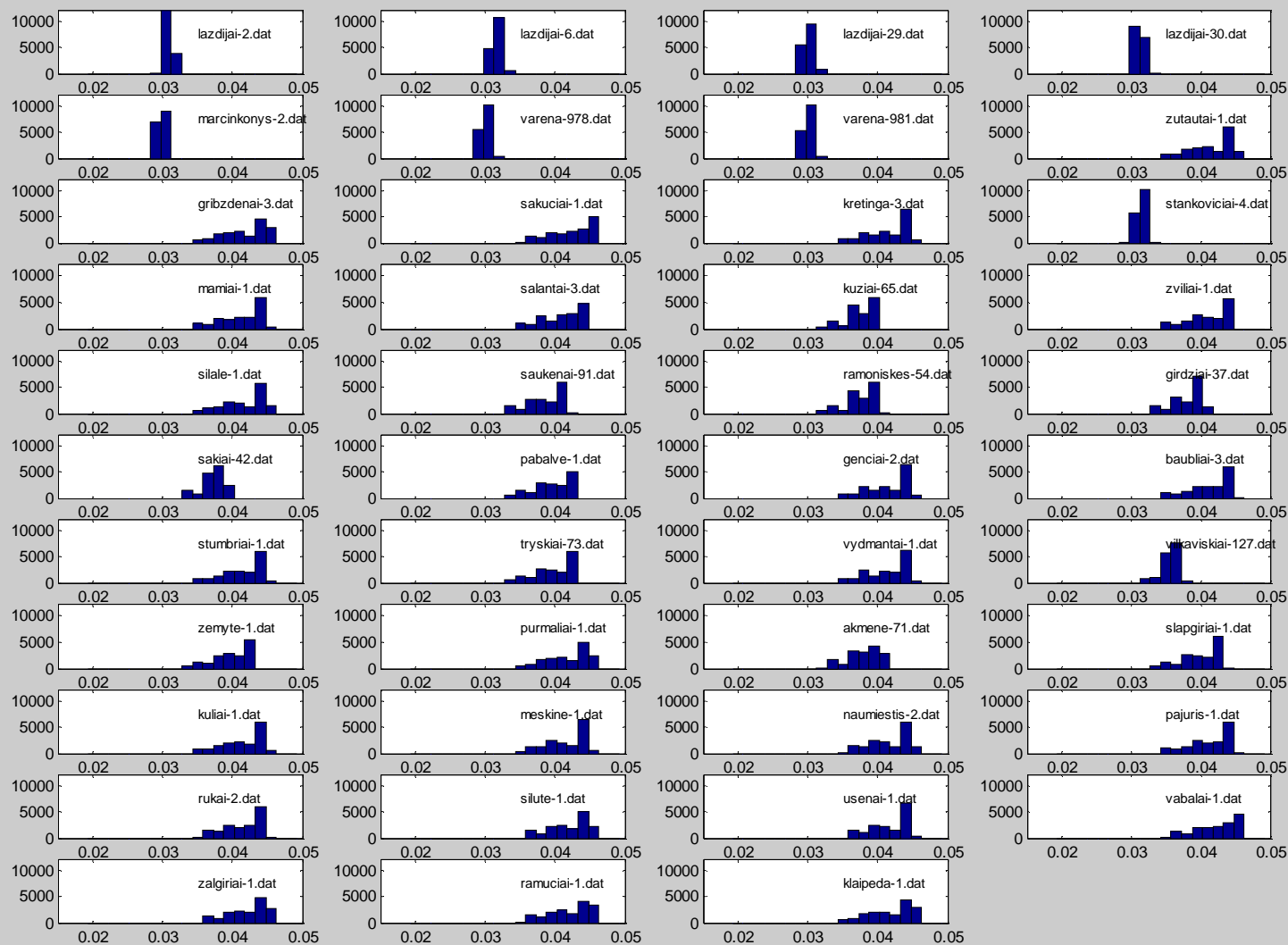
Modelio patikimumui labai svarbus yra žemų greičių sluoksnio, išskirto apie 10 km gylyje, geoterminės charakteristikos. Vienų autorių duomenimis, šis sluoksnis susijęs su reologinių savybių kitimu, taip vadinama Žemės plutos astenosfera (Šliaupa – asmeninis pranešimas). Tokiu būdu šiam sluoksniui nėra priskiriamos jokios ypatingos litologinės ar termofizinės charakteristikos. Kitų tyrėjų nuomone, šis sluoksnis sietinas su kratoninių granitoidų intruzija (G.Motuza, S.Bogdanova – asmeninis pranešimas). Tad, gali būti, jog šis sluoksnis turi gana aukštą šilumos generacijos potencialą. Atitinkamai, sudarytas alternatyvus modelis, priimant padidintą šilumos generaciją iš šios sluoksnio -  $3.0\mu\text{W/m}^3$ . Šiuo atveju anomaliam šilumos srautui žemės paviršiuje paaiškinti nereikia padidinto šilumos srauto iš mantijos. Remiantis šio alternatyvaus geoterminio modelio rezultatais (5.2.4 – 5.2.7 pav) – šilumos srautas iš mantijos vakarų Lietuvoje yra  $30.5\text{ mW/m}^2$ , o rytų Lietuvoje -  $28\text{ mW/m}^2$  (pav. 5.2.6). Padidintos plutos generacijos pakanka paaiškinti vakarų Lietuvos paviršiaus šilumos srauto anomaliją.



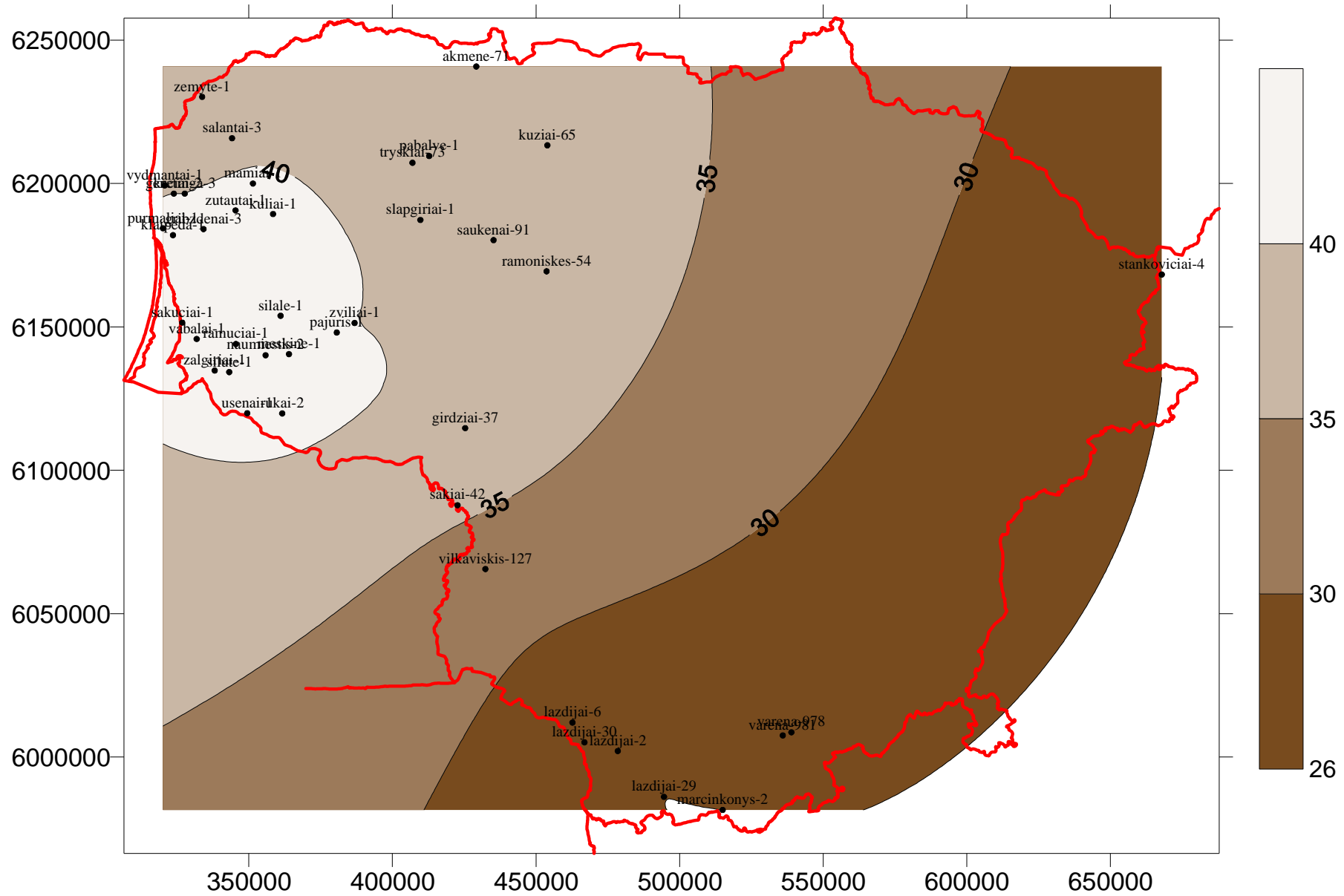
5.2.1 pav. Šilumos srauto žemės paviršiuje histogramos ( $\text{mW/m}^2$ ).



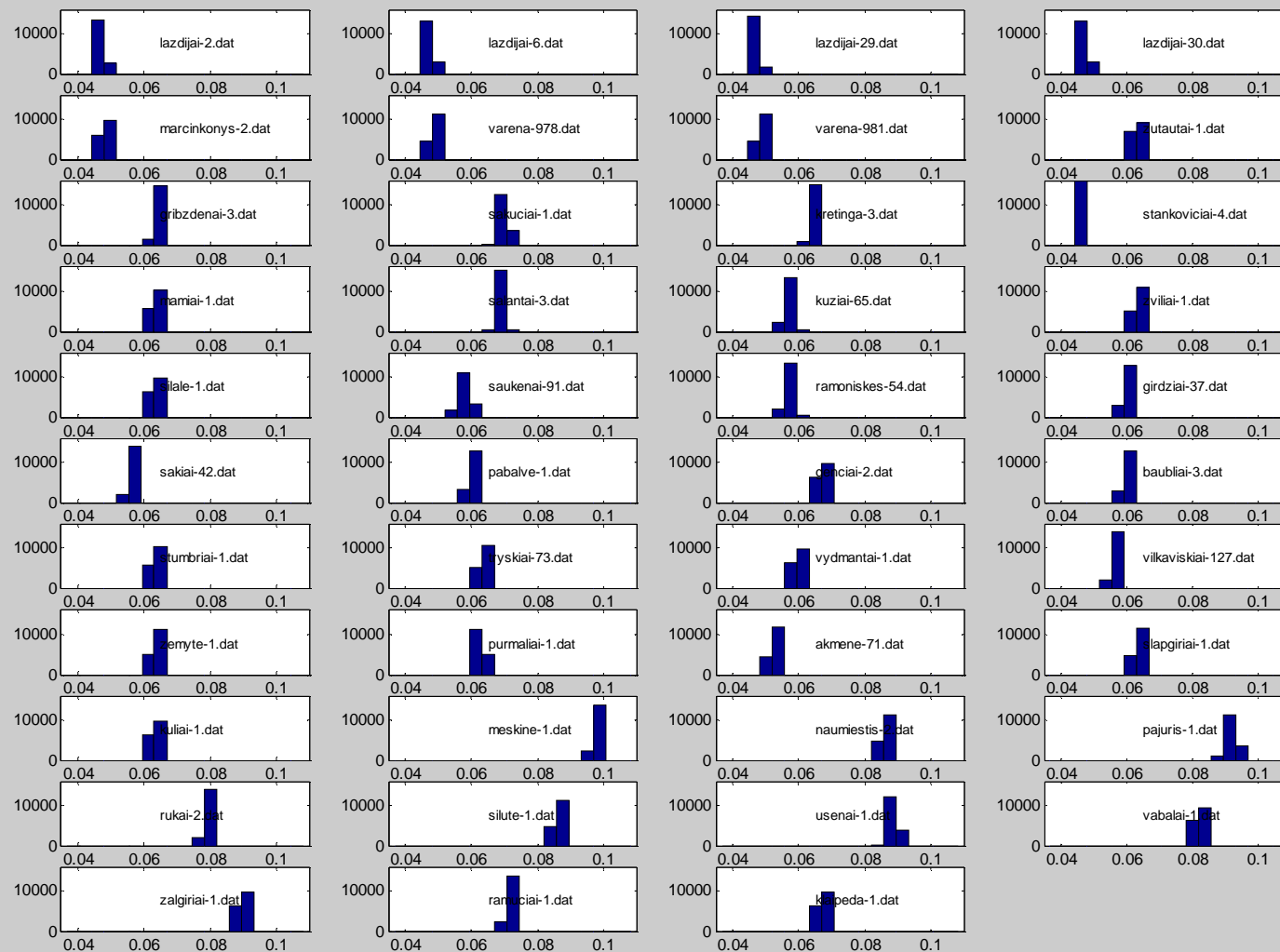
5.2.2 pav. Šilumos srauto žemės paviršiuje žemėlapis (mW/m<sup>2</sup>).



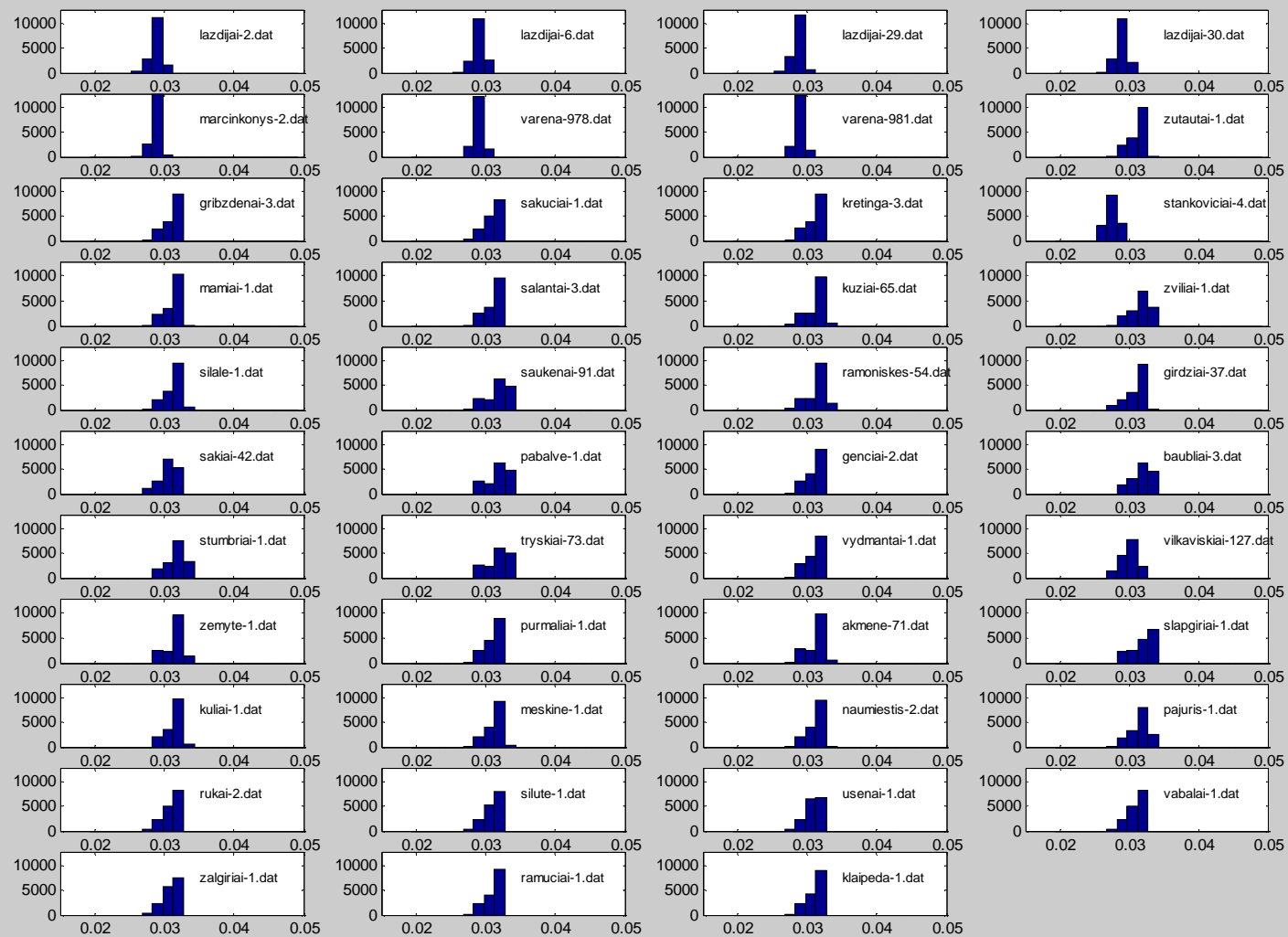
5.2.3 pav. Šilumos srauto iš mantijos histogramos ( $\text{mW/m}^2$ ).



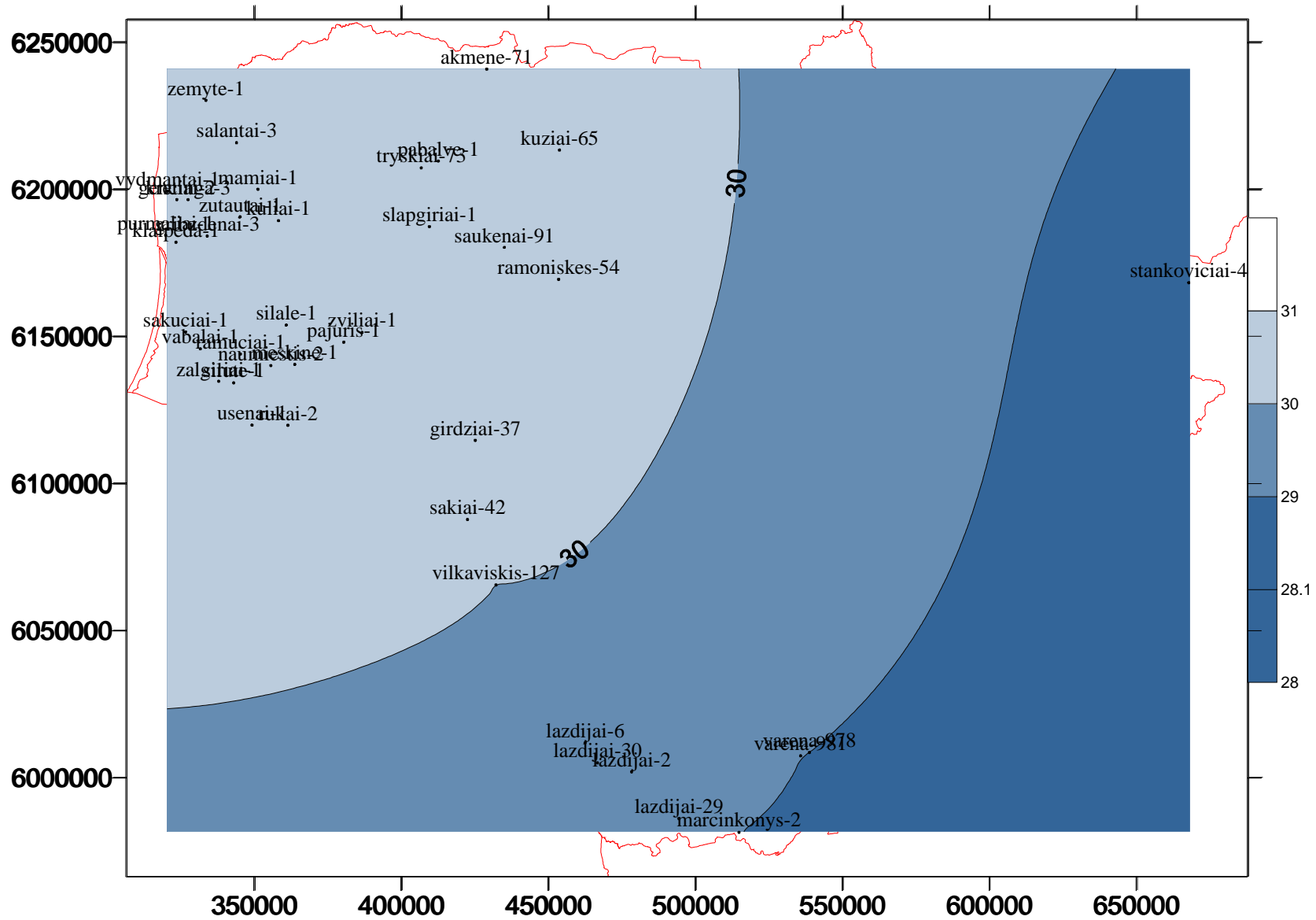
5.2.4 pav. Šilumos srauto iš mantijos žemėlapis ( $\text{mW/m}^2$ ).



5.2.5 pav. Šilumos srauto žemės paviršiuje histogramos ( $\text{mW/m}^2$ ), alternatyvus „žemų greičių sluoksnio“ modelis.



5.2.6 pav. Šilumos srauto iš mantijos histogramos ( $\text{mW/m}^2$ ), alternatyvus „žemų greičių sluoksnio“ modelis.



5.2.7 pav. Šilumos srauto iš mantijos žemėlapis ( $\text{mW/m}^2$ ), alternatyvus „žemų greičių sluoksnio“ modelis.

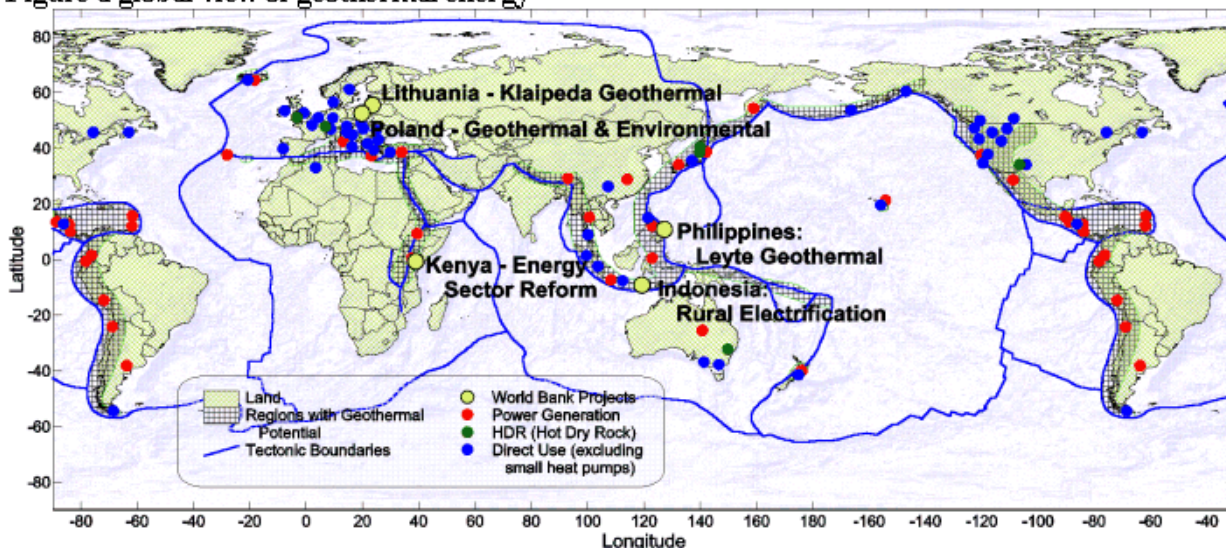


## 6. VAKARŲ LIETUVOS GEOTERMINĖS ANOMALIJOS PRAKTINIAI ASPEKTAI

Geoterminė energija esanti žemės gelmėse karštų požeminių vandenių, karštų garų ar karštų sausų uolienų pavidalu gali būti panaudota tiesiogiai arba elektros energijai gaminti. Tiesioginis šios energijos panaudojimas yra labai platus (pastatų ir individualių būstų apšildymui, oro kondicionavimui, gamyklose, džiovinimui, šiltnamiams, žuvininkystei, sanatorijose ir baseinams, sniego tirpymui ir pan.) ir kol kas pasaulyje taikomas plačiau nei geoterminės jėgainės. Pastarasis geoenergijos panaudojimo būdas pradėtas vystyti gan neseniai. Pirmoji geoterminės energijos jėgainė buvo įrengta 1904m Italijoje, Lardello sausų garų laukuose. Pirmoji moderni geoterminės energijos jėgainė taip pat įrengta Italijoje 1964m. Iki 1974m visa Pasaulyje generuojama elektros energija iš geoterminių jėgainių tesudarė 770MWe.

Didžioji geoterminės energijos panaudojimo dalis yra susijusi su aktyvios tektonikos sritimis (6.1. pav). Viena iš lyderiaujančių šalių kurios naudoja geoterminę energiją yra Islandija – 86% pastatų šildymui ir 16% elektros energijai pagaminti yra panaudojama geoterminė energija.

Figure a global view of geothermal energy



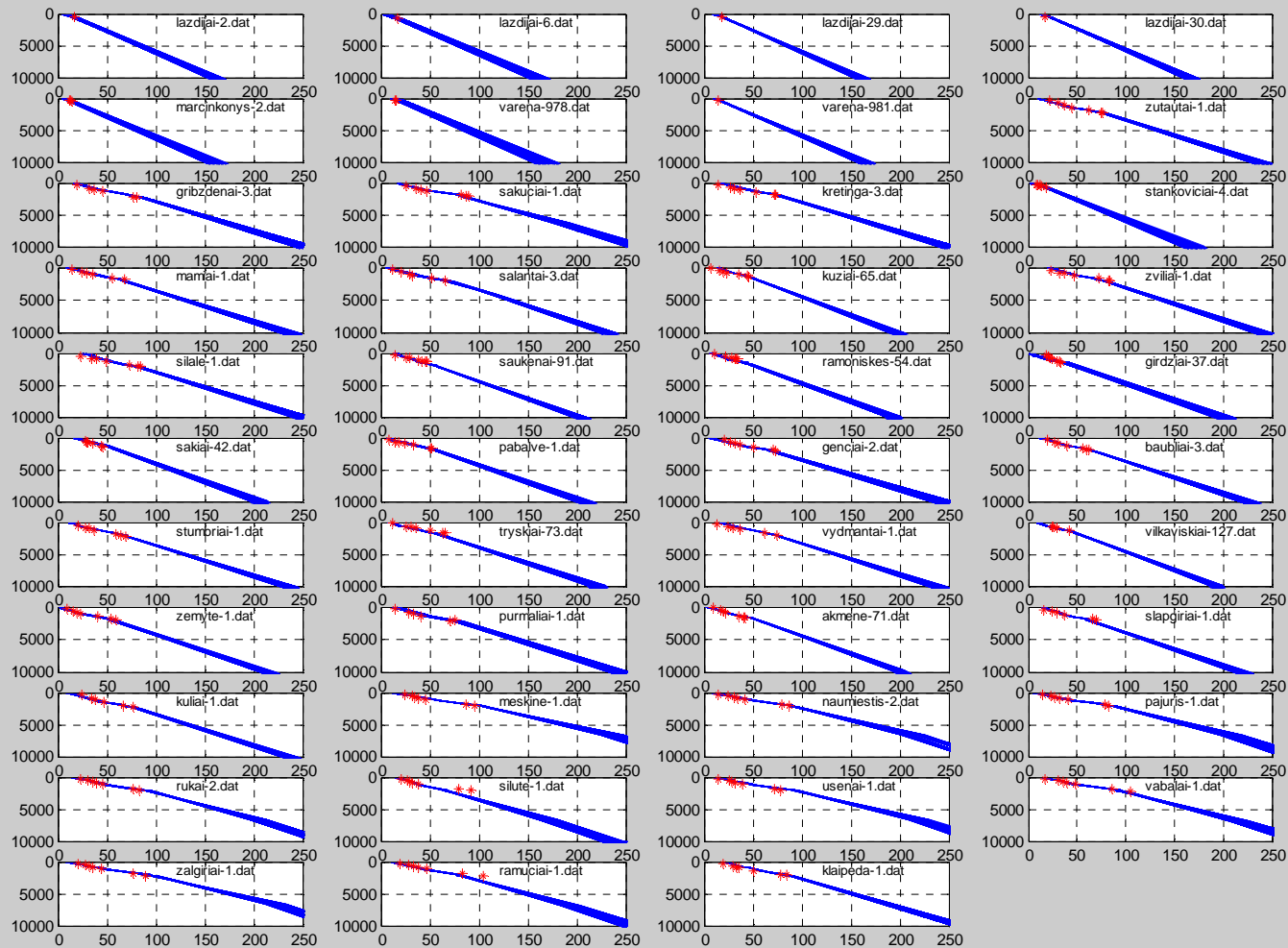
6.1 pav. Geoterminės energijos panaudojimas Pasaulyje ([www.physics.rutgers.edu/](http://www.physics.rutgers.edu/)).

Remiantis geoterminiu modeliavimu buvo sudarytas 150°C izotermos gylio žemėlapis Lietuvos teritorijoje (6.2 pav). Arčiausiai žemės paviršiaus ši izoterma yra Žemaičių Naumiesčio rajone – 4.500km gylyje. Sąlyginai arti žemės paviršiaus ši izoterma yra ties Klaipėda. 150°C izoterma gilėja iš vakarų į rytus ir pietryčių Lietuvoje, ties Varėna,

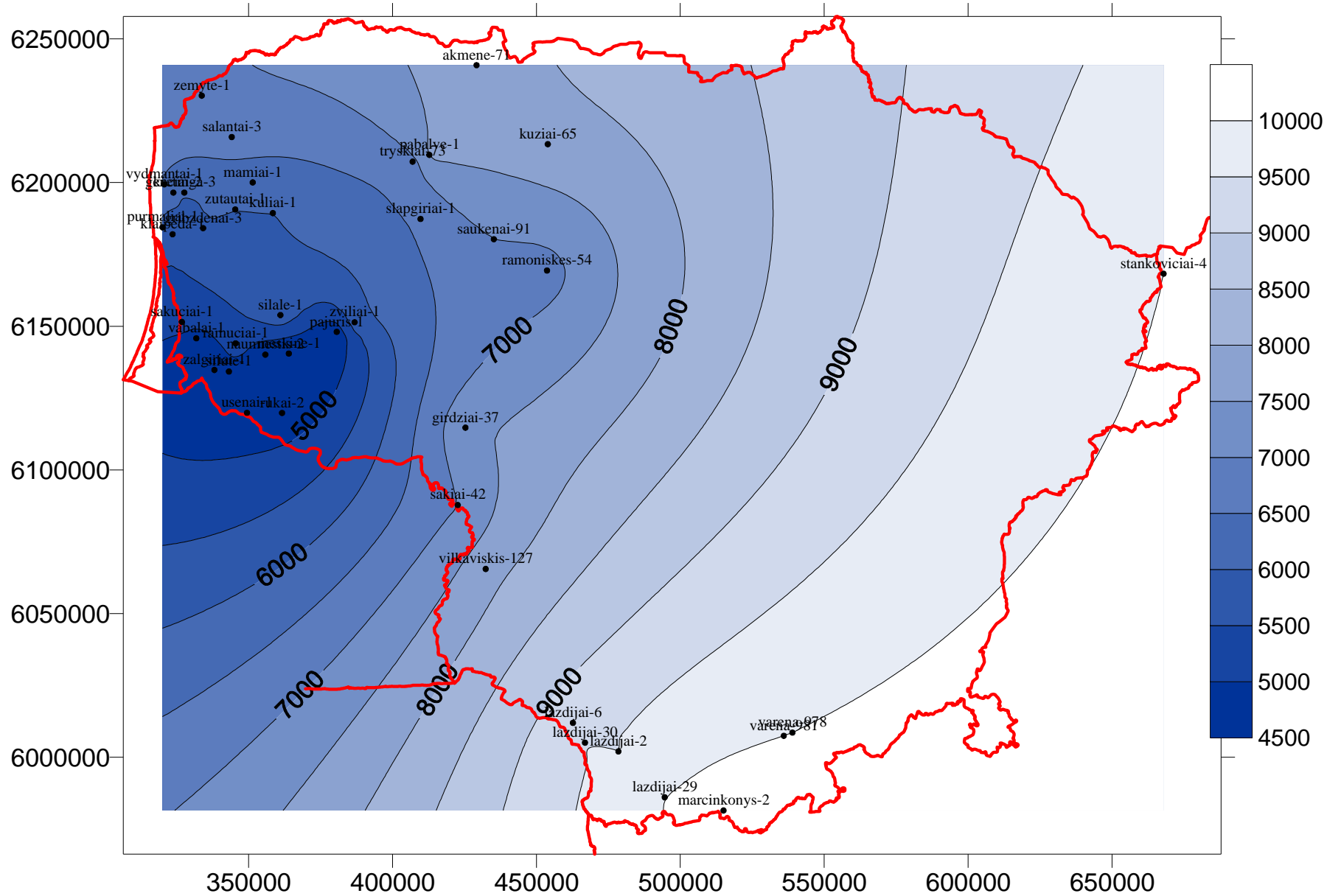
nusileidžia į 9km gylį. Taip pat buvo sudarytas 200 °C izotermos žemėlapis (6.3 pav). Ši izoterma yra gan giliai visoje Lietuvos teritorijoje – nuo 6,5km iki 12,5km gylyje. Izoterma gelmėja iš vakarų į rytus. Arčiausiai žemės paviršiaus ši izoterma yra vakarų Lietuvoje, ties Žemaičių Naumiesčio granitoidų masyvu – 6.5km gylyje.

150°C ir 200°C izotermų gylių žemėlapiai taip pat buvo sudaryti ir alternatyviam modeliui. Alternatyvaus modelio rezultatai šiek tiek skiriasi nuo padidinto mantijos šilumos srauto modelio. Čia 150°C temperatūros gylis kinta nuo 4.4 km Žemaičių Naumiesčio rajone iki 9 km pietų/pietryčių Lietuvoje (6.5 – 6.6 pav), o 200°C temperatūra Vakarų Lietuvoje pakyla į 6,4 km gylį, o rytų Lietuvoje nusileidžia net 12,5km gylį (6.7 pav). Alternatyvaus modelio atveju tiek 150°C tiek 200°C temperatūros vakarų Lietuvoje yra 100m arčiau žemės paviršiaus.

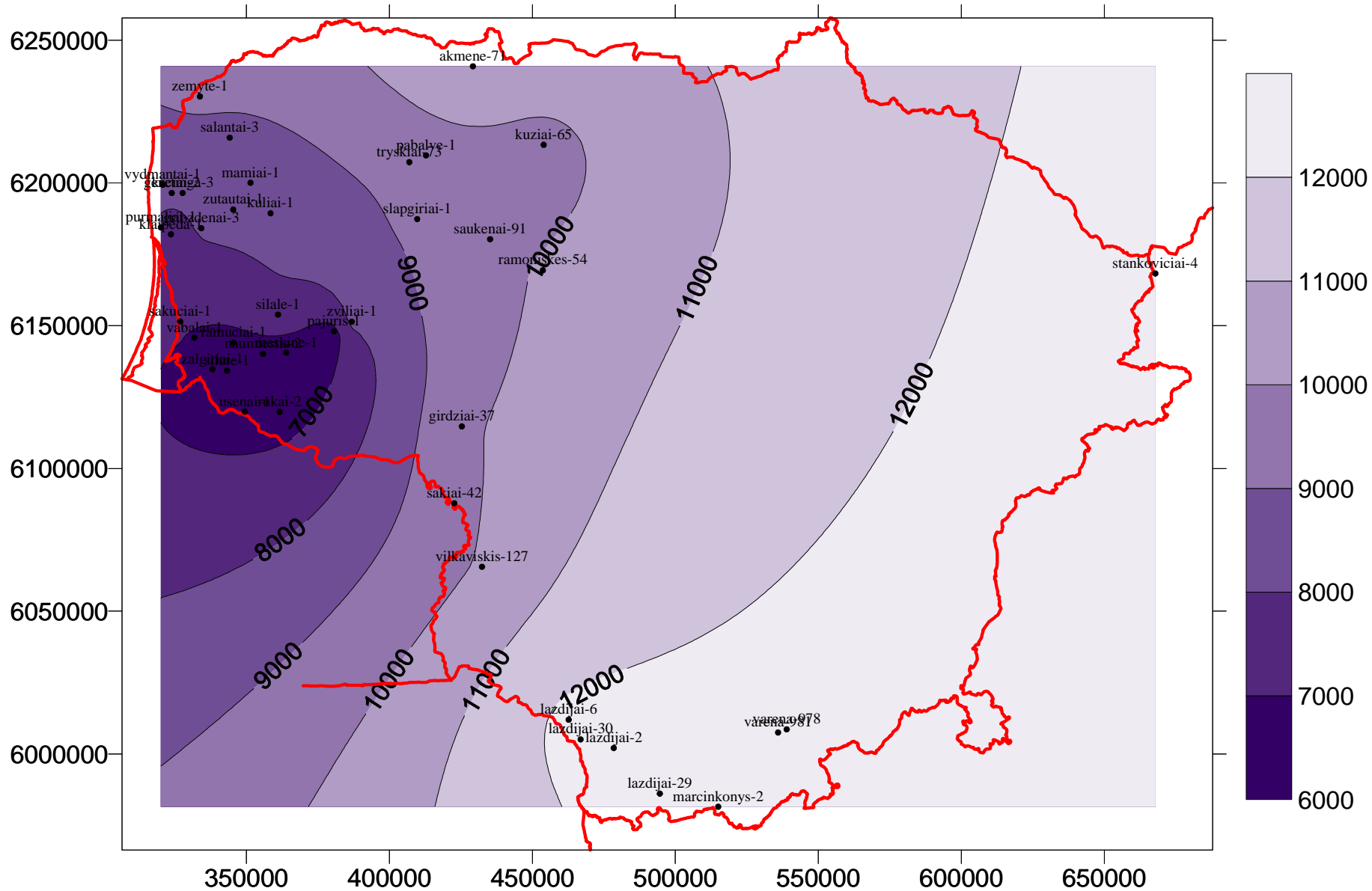
150°C temperatūra yra optimaliausia elektros energijos gamybai, todėl remiantis gautais rezultatais Lietuvos teritorija buvo suskirstyta pagal perspektyvumą geoterminės energijos eksploatacijai į labai perspektyvius, perspektyvius ir neperspektyvius rajonus (6.8 pav). Rajonai, kur minėtą izotermą galima rasti iki 5km gylio priskirti labai perspektyviais, iki 6km gylio – perspektyviais ir >6km gylyje – neperspektyviais. Labai perspektyvus rajonas sutampa su Žemaičių Naumiesčiu bei Vilkyčių plotais, o perspektyvus – su periferinėmis Žemaičių Naumiesčio dalimis bei Klaipėdos rajonu.



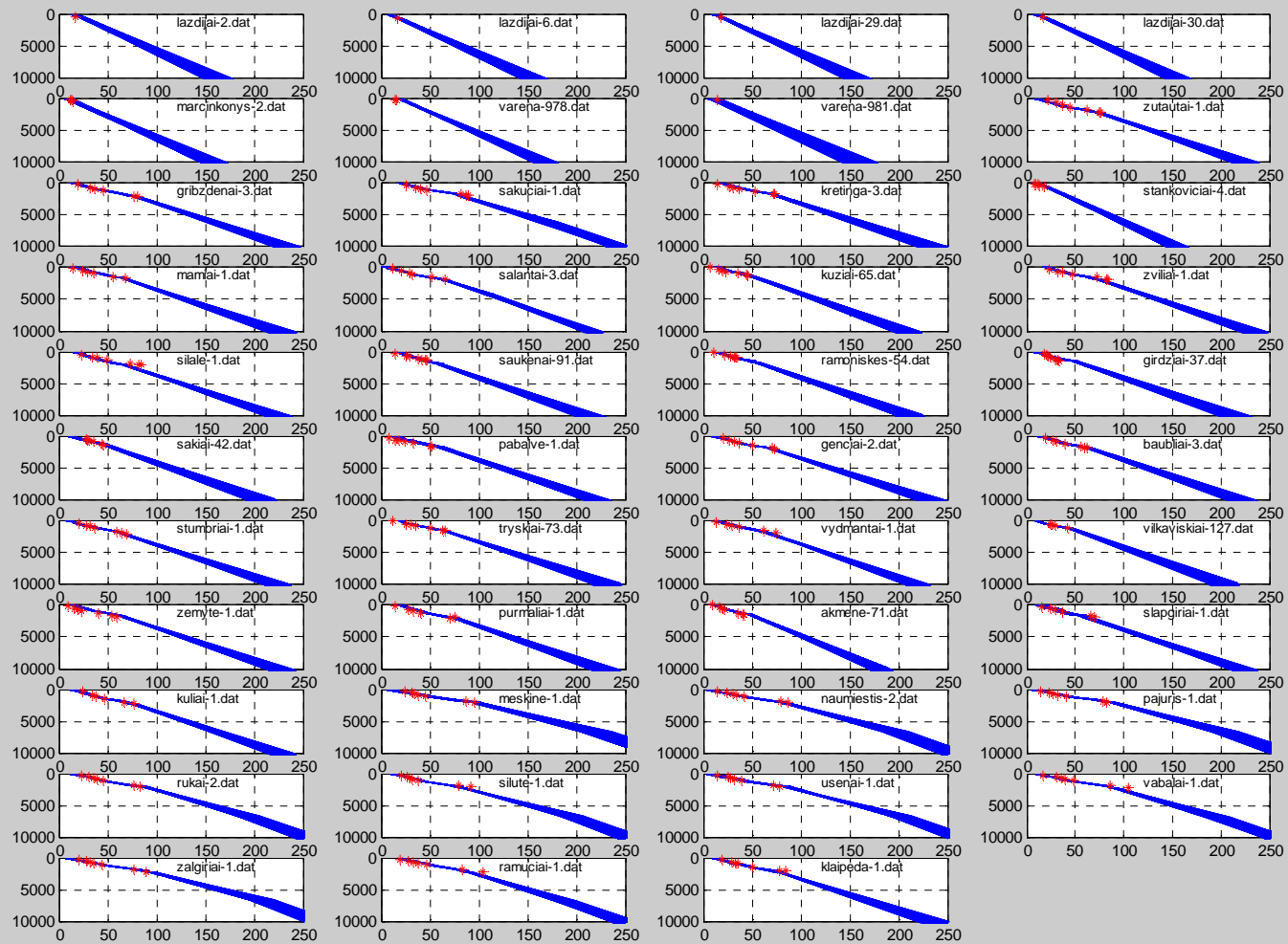
6.2 pav. Temperatūros – gylio profiliai grėžiniuose. Žvaigždutės - temperatūra išmatuota grėžiniuose, linijos – modeliuota temperatūra, y ašis yra gylis (m), x ašis yra temperatūra (°C).



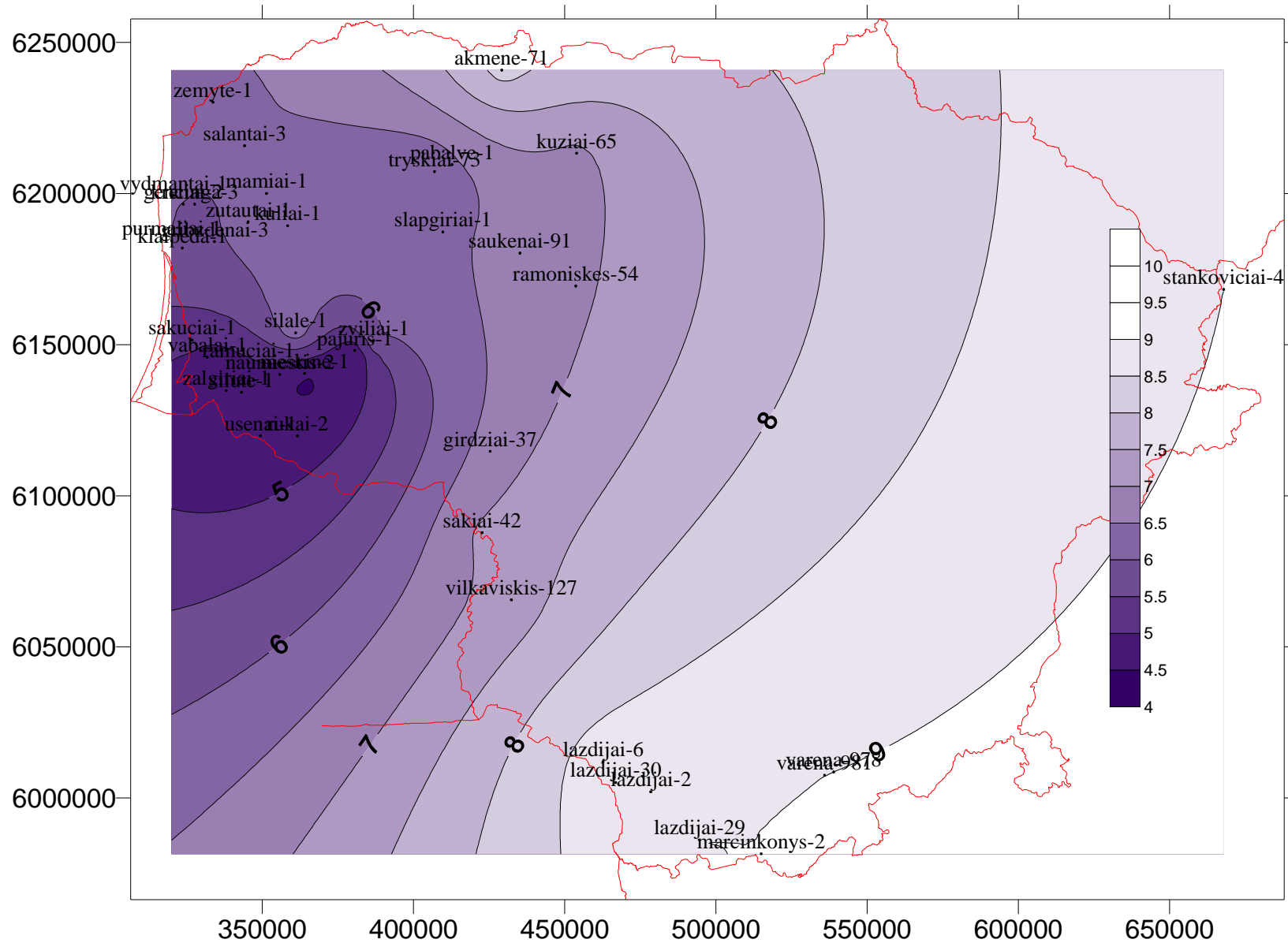
6.3 pav. 150°C izotermos gylis žemėlapis (m). (Padidintos šilumos srauto iš mantijos modelis).



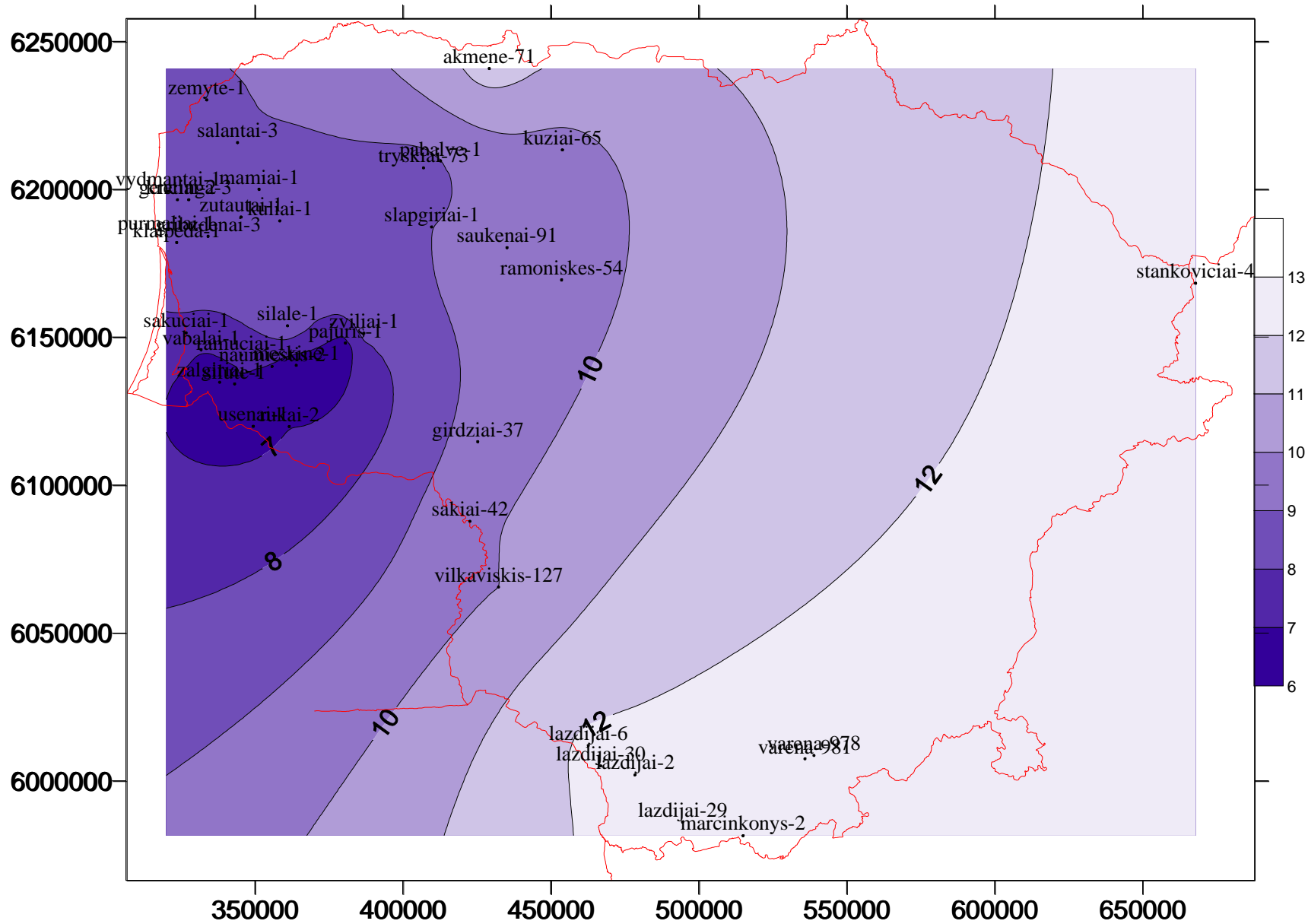
6.4 pav. 200°C izotermos gylio žemėlapis (m). (Padidinto šilumos srauto iš mantijos modelis).



6.5 pav. Temperatūros – gylio profiliai gręžiniuose. Žvaigždutės yra temperatūra išmatuota gręžiniuose, linijos yra sumodeliuoti temperatūros – gylio profiliai, y ašis yra gylis (m), x ašis yra temperatūra (°C).

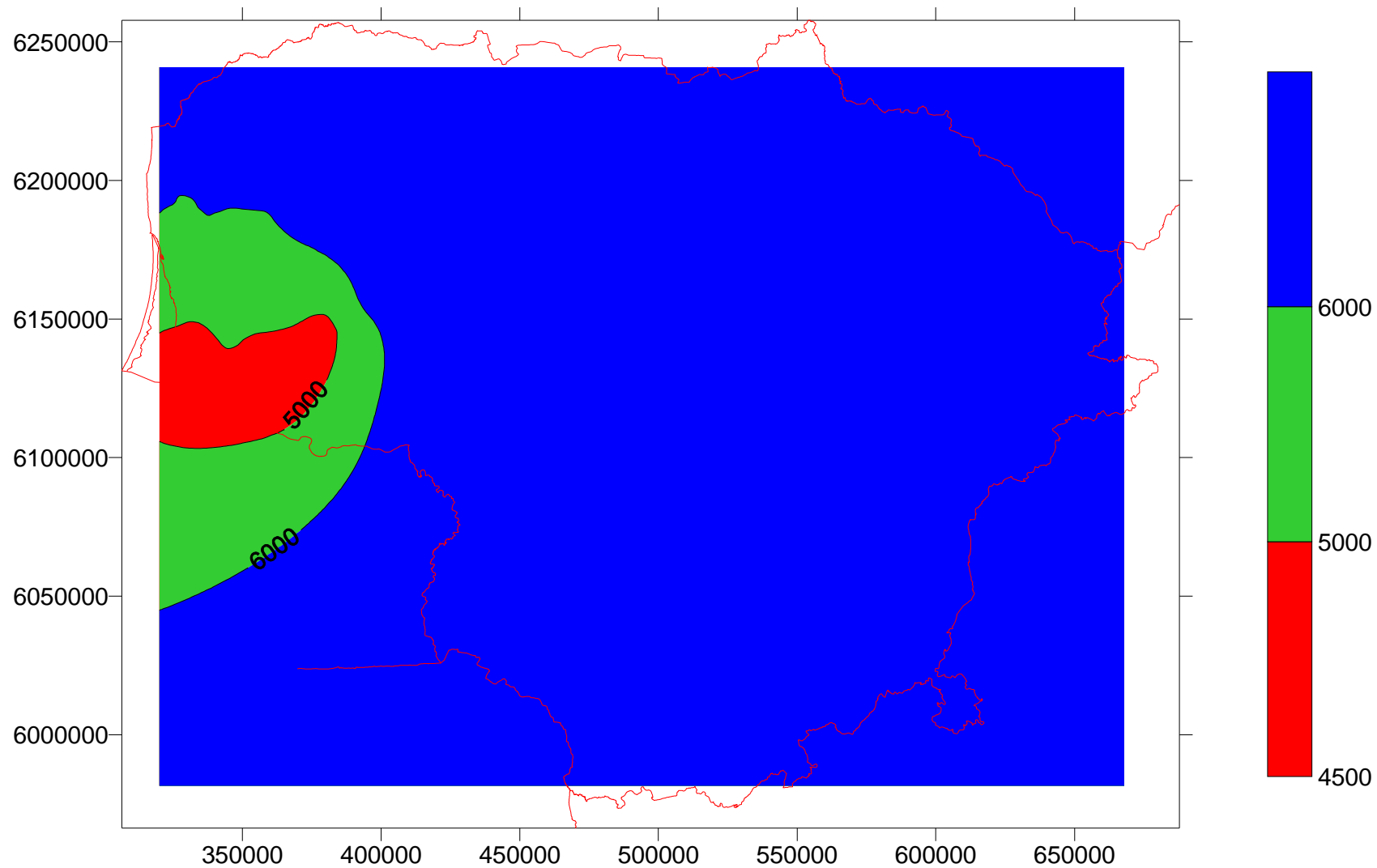


6.6 pav. 150°C izotermos gylis žemėlapis (km). (Alternatyvus modelis).



6.7 pav. 200°C izotermos gylio žemėlapis (km). (Alternatyvus modelis).



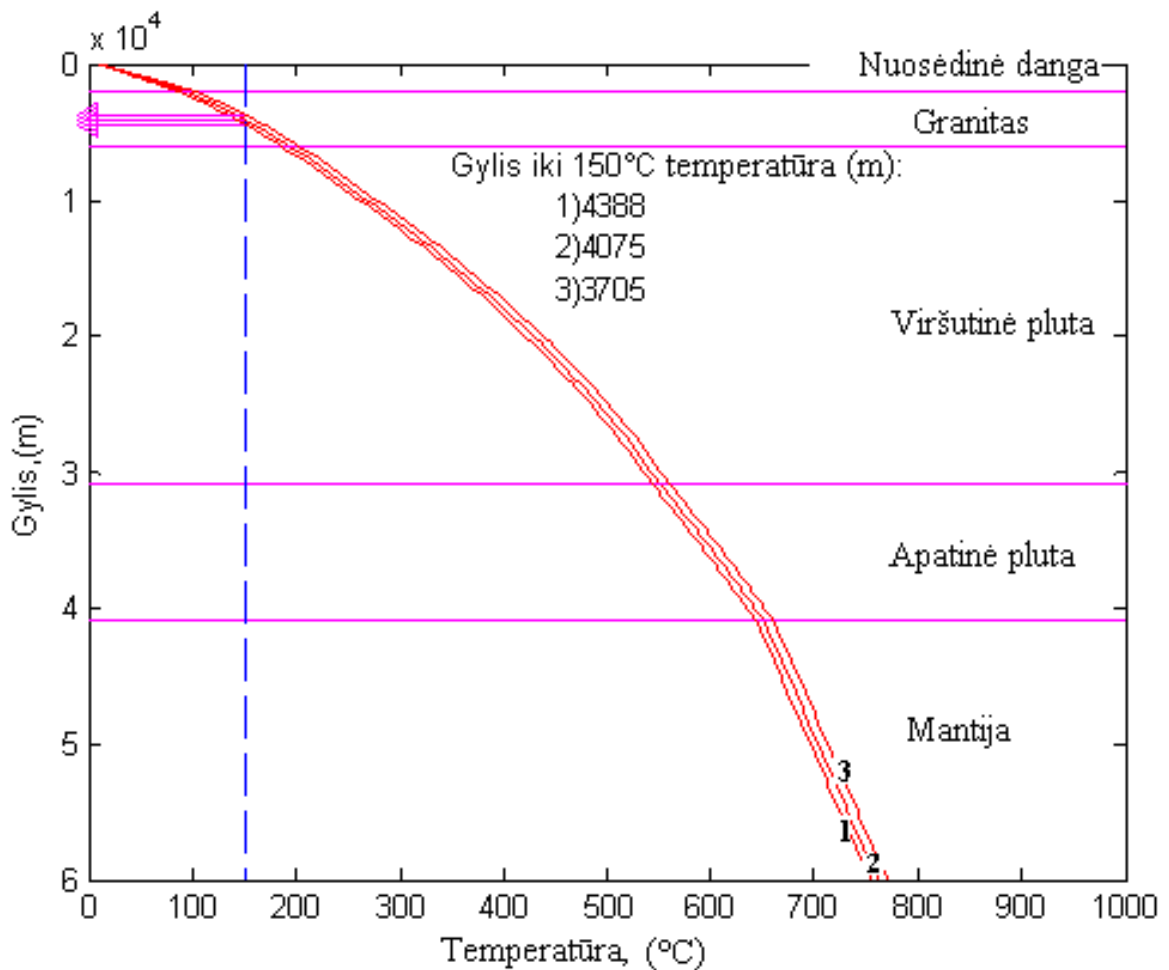


**6.7 pav.** Rajonu perspektivumas geoterminės energijos eksploatacijai. Spalvos: Raudona – labai perspektyvūs rajonai, žalia – perspektyvūs rajonai, mėlyna – neperspektyvūs rajonai.

## 7. NUOSĖDINĖS DANGOS ŠILUMOS LAIDUMO NUSTATYMAS GEOFIZINIŲ TYRIMŲ GRĘŽINIUOSE DUOMENIMIS

2005m vykdyto kompiuterinio modeliavimo metu nustatyta, kad šilumos srautas yra labai įtakojamas uolienų terminio laidumo. Jo metu nustatyta, kad netgi labai mažas – 10% pasikeitimas terminio laidumo parametre sąlygoja ženklų pasikeitimą temperatūrų pasiskirstymui gelmėse.

Temperatūros pasiskirstymo priklausomybė nuo nuosėdinės dangos šiluminio laidumo



**7.1 pav.** 150 °C izotermos jautrumas +/- 10% nuosėdinės dangos šiluminio laidumo pokyčiui. Kreivės 2 modelio ribinės sąlygos yra: 10°C temperatūra Žemės paviršiuje  $T_0$  ir 92 mW/m<sup>2</sup> šilumos srautas žemės paviršiuje  $Q_0$ . Kreivė 1: tas pats modelis kaip ir kreivėje 2, tik nuosėdinės dangos šiluminis laidumas padidintas 10%. Kreivė 3: tas pats modelis kaip ir kreivėje 2 tik nuosėdinės dangos šiluminis laidumas 10% mažesnis. Punktyrinė linija rodo 150°C izoterma.

Antrame skyriuje buvo minėta, kad nesant laboratorinių tyrimų, nuosėdinės dangos uolienu šilumos laidumą galima išskaičiuoti naudojant geofizinių tyrimų gręžiniuose. Kad paskaičiuoti šilumos laidumą minėtu būdu pirmiausia reikia žinoti molio ir smėlio/karbonatų santykį sluoksnyje – tam naudojama gama spinduliavimo kreivė. Gama spindulių reikšmės bus didesnės jei uoliena yra molinga, nes joje yra daugiau radiogeninių elementų.

Molio kiekis pagal Schlumberger (1972) paskaičiuojamas:

$$V_m = \frac{GR - GR_{sm}}{GR_m - GR_{sm}}; \quad 7.1$$

čia  $V_{sm}$  yra smėlio kiekis uolienoje,  $V_m$  yra molio kiekis uolienoje,  $GR$  yra gama spindulių reikšmė uolienoje,  $GR_{sm}$  yra gama spindulių reikšmė grynam smėliui (3.5) ir  $GR_m$  gama spindulių reikšmė grynam moliui (22).

Smėlio kiekis skaičiuotas atitinkamai:  $V_{sm} = 1 - V_m$ ; . Analogiškai skaičiuojamas karbonatų kiekis uolienoje.

Uolienos poringumas paskaičiuojamas iš akustinių bangų greičio:

$$\phi_{sonic} = \frac{(\Delta T - \Delta T_{ma}) - V_m (\Delta T_{ma})}{\Delta T_f - \Delta T_{mas}}; \quad 7.2$$

čia  $\phi_{sonic}$  yra poringumas pagal garso greičio duomenis,  $\Delta T$  yra akustinis bangų greitis tam tikrame gylyje,  $\Delta T_{ma}$  yra akustinių bangų greitis matricoje,  $V_m$  yra molio kiekis uolienoje ir  $\Delta T_f$  yra akustinių bangų greitis gręžimo fluide.  $\Delta T_{ma}$  yra konstanta, kurios dydis priklauso nuo litologijos (2.3 lentelė).

**2.3 lentelė.** Matricos akustinių bangų greitis skirtingose uolienose (pagal Schlumberger, 1972).

	$\Delta T_{ma}$ , $\mu\text{s}/\text{ft}$	$\Delta T_{ma}$ , $\mu\text{s}/\text{m}$
Smiltainis	55.5 – 51.0	182 - 167
Klintis	47.6 – 43.5	156 - 143
Dolomitas	43.5 – 38.5	143 - 126
Anhydritas	50.0	164
Druska	66.7	219
Gręžimo fluidas ( $\Delta T_f$ )	190	623

Nustačius šiuos parametrus, galima paskaičiuoti uolienos šilumos laidumo reikšmes:

$$TL_{ma} = (V_{sm} \times 7.0) + (V_m \times 2.3); \quad 7.3$$

ir atitinkamai

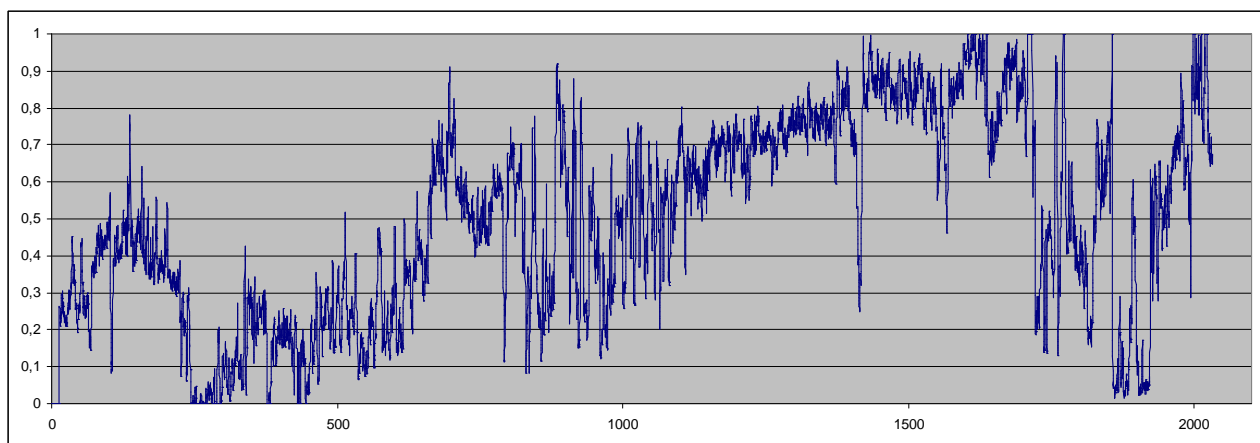
$$TL_{uoln} = \phi_{sonic} + (1 - \phi_{sonic}) \times TL_{ma}; \quad 7.4$$

čia  $V_{sm}$  yra smėlio kiekis uolienoje, 7.0 yra kvarco šilumos laidumas,  $V_m$  yra molio kiekis uolienoje, 2.3 yra molio šilumos laidumas,  $TL_{uoln}$  yra uolienos šilumos laidumas,  $TL_{ma}$  yra uolienos matricos šilumos laidumas.

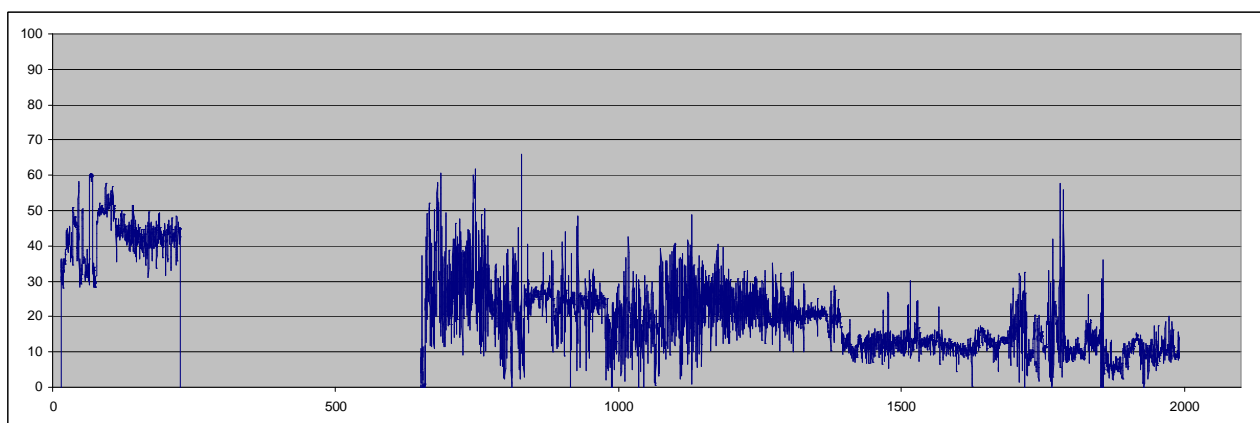
Remiantis šiuo metodu buvo analizuotas vienas gręžinys – Kretinga-4, pasižymintis labai gera termografija. Šiame gręžinyje gama spindulių reikšmė „grynam“ moliui priimta 22 mkr/val., o „grynam“ smėliui arba klinčiai/dolomitui – 3.5 mkr/val. Molingumo/smėlingumo kreivė pateikta 7.2 pav, poringumo – 7.3 pav ir šilumos laidumas - 7.4 pav. Skaičiavimų rezultatai buvo nepakankamai patikimi, todėl į geoterminį modelį nebuvo integruoti. Šio gręžinio analizės duomenys pateikti 2.4 lentelėje.

**2.4 lentelė.** Vidutinės šilumos laidumo reikšmės Kretinga – 4 gręžinyje paskaičiuotos remiantis geofiziniais duomenimis.

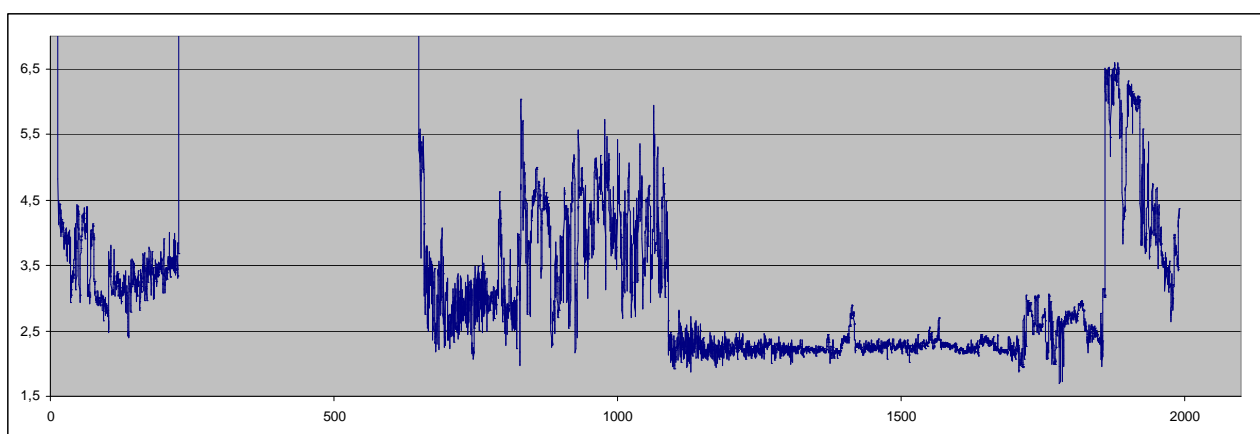
Sluoksnis	Šilumos laidumas, W/m °C
Q – T	3.4
P <sub>2</sub>	5.0
D <sub>3ys</sub>	2.85
D <sub>3šv-up</sub>	2.97
D <sub>2nr</sub>	3.0
D <sub>2pr-D1</sub>	4.0
S <sub>2</sub>	2.3
S <sub>1 –O</sub>	1.9
Cm <sub>2</sub>	5.8
Cm <sub>1</sub>	3.5



**7.2 pav.** Molio kiekis (Vsh) Kretinga-4 gręžinyje (paskaičiuota remiantis 7.1 lygtimi). X ašis – gylis (m), y ašis molio kiekis nuo 0 (0%) iki 1 (100%).



**7.3 pav.** Poringumas Kretinga – 4 gręžinyje (paskaičiuotas iš akustinių bangų greičio pagal 7.2 lygtį). X ašis – gylis (m), y ašis – poringumas (%).



**7.4 pav.** Šilumos laidumas Kretinga – 4 gręžinyje paskaičiuotas remiantis geofiziniais duomenimis. X ašis – gylis (m), y ašis – šilumos laidumas ( $W/m^{\circ}C$ ).

## IŠVADOS

Šilumos srauto anomalijas kratonuose sąlygoja padidinta uolienu šilumos generacija, mantijiniai procesai; lokaliai - hidroterminių fluidų cirkuliacija.

Vakarų Lietuvos šilumos srauto anomalijai paaiškinti neužtenka vien viršutinės plutos uolienu padidintos šilumos generacijos. Modeliavimas rodo, kad mantijos šilumos srautas Vakarų Lietuvoje yra 10-15 mW/m<sup>2</sup> didesnis nei įprasta kratoniniams regionams (Vakarų Lietuvoje siekia 42 mW/m<sup>2</sup>). Mantijos ir paviršiaus šilumos srautas mažėja iš rytų į vakarus. Rytų Lietuvoje mantijos šilumos srautas yra 27 mW/m<sup>2</sup>. Nuosėdinių uolienu šilumos laidumas įtakoja šilumos srautą, tačiau pats savaime nesukuria šilumos srauto anomalijos. Nuosėdinių uolienu šilumos laidumas daro nemažą įtaką temperatūrų pasiskirstymui žemės gelmėse.

Padidinto šilumos srauto iš mantijos priežastys gali būti (A) nedidelio masto mantijos srautai arba (B) viršutinės mantijos uolienu „praturtinimas“ šilumai laidžiais mineralais.

Pagal alternatyvų modelį šilumos srautas vakarų Lietuvoje yra 30,5 mW/m<sup>2</sup>, o rytų Lietuvoje – 28 mW/m<sup>2</sup>. Vakarų Lietuvos šilumos srauto anomaliją sąlygoja padidinta Žemaičių Naumiesčio ir mažų seisminių greičių zonos uolienu šilumos generacija

150°C temperatūra Vakarų Lietuvoje yra 4.4 – 4.5 km gylyje, rytų Lietuvoje – 9 km gylyje. 200°C temperatūra vakarų Lietuvoje yra apie 6,4 - 6,5 km gylyje. Nedideli gyliai sudaro galimybes geoterminės elektros energijos gamybai Vakarų Lietuvoje. Perspektyviausi geoterminės energijai yra Žemaičių Naumiesčio granitoidų plotas ir Vilkyčių plotas.

## LITERATŪRA

- Allen, P.A, Allen, J.R. 2004. Basin analysis: Principles and Applications. United Kingdom: Blackwell Science, Chapter – 9, 368-70.
- Artemieva I.M., Mooney W.D., 2001. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere. A global study. *Journal of geophysical research.*, Vol. 106.
- Bachu S., 1988. Analysis of heat transfer processes and geothermal pattern in the Alberta Basin, Canada. *Journal of geophysical research*, Vol. 93.
- Ballard S., Pollack H.N., 1987. Diversion of heat by Archean cratons: a model for southern Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 85, , 253–264
- Bates, R.L., Jackson J.A., 1980. Glossary of Geology. American Geological Institute, Falls Church, VA, USA, 751 p
- Brigaud, F., Vasseur, G. 1989. Minerology, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophys. J.* 98, 525 – 542.
- Cermak V., Bodri L., Rybach L. 1991. Radioactive heat production in the continental crust and its depth dependence. In: Cermak V., Rybach L (eds.) *Terrestrial Heat-Flow and Lithosphere Structure*. Springer, Berlin. 23-69.
- Cooper C.M., Lenardic A., Moresi L., 2004. The thermal structure of stable Continental lithosphere within a dynamic mantle. *Elsevier. Earth and planetary science letters* 222.
- Fowler C.M.R., 2002. The Solid Earth. An introduction to global Geophysics. *Cambridge university Press*, 285 – 309
- Giese R. (1998) Eine zweidimensionale Interpretation der Geschwindigkeitsstruktur der Erdkruste des südwestlichen Teils der Osteuropäischen Plattform (Project EUROBRIDGE). Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Fachbereiches Geowissenschaften der Freien Universität Berlin, Scientific Technical Report STR98/16, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Gupta M.L., Sundar A., Sharma S.R., Singh S.B., 1993. Heat flow in the Bastard Craton, central Indian Shield: implications for thermal characteristics of proterozoic cratons. *Elsevier*.
- Jõelegt, A., Kirsimäe, K., Shogenova, A., Šliaupa, S., Kukkonen, I.T., Rasteniene, V., Zabele, A. 2002. Thermal conductivity of Cambrian siliciclastic rocks from Baltic paleobasin. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology* 51(1), 5–15.

- Jones M.Q.M., 1987. Heat flow and heat production in Namaqua mobile belt, South Africa. *Journal of Geophysical Research*. Volume 92. Abstract
- Jones M.Q.W., 1992. Heat flow anomaly in Lesotho – implications for southern boundary of Kaapvaal craton. *Geophysical research letters (American geophysical Union)*. Abstract.
- Lewis, T.J., Hyndman, R.D., and Fluck, P., 2003, Heat flow, heat generation, and crustal
- Majorowicz J.A., 1999. Anomalous heat flow regime in the Western margin of the North American Craton, Canada. *Journal of Geodynamics*, Vol. 21.
- McLaren S. Saniford M., Hand M., Neumann N., Wyborg L., Bastirakova I., 2003. The hot Southern Continent: heat flow and heat production in Australian Proterozoic terranes. *Geological society of Australia Special publication 22*, 151-161.
- Pasquale V., Cabella C., Verdoya M., 1990. Deep temperatures and lithospheric thickness along the European Geotraverse. *Tectonophysics* 176. 1-11.
- Kepežinskas K., Rasteniėnė V., Suveizdis P, 1996. Vakarų Lietuvos geoterminė anomalija. Geologijos institutas. Vilnius.
- Rybach L., 1979. The relationship between seismic velocity and radioactive heat production in crustal rocks: An exponential law. *Pure and Applied Geophysics*. 117 (1/2). 75-82.
- Rybach L., Buntebarth G., 1982. Relationship between the petrophysical properties density, seismic velocity, heat generation and mineralogical constitution. *Earth Planet. Sci. Lett.* 57, 367–376.
- Rybach L., Buntebarth G., 1984. The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental crust. *Tectonophysics* 103, 309–344.
- Schlumberger Well Services Inc. 1972. Log interpretation manual/principles, vol. I.
- Šliaupa, S. 2004. Alternatyvūs atsinaujinantys energijos šaltiniai: karštųjų kristalinių uolienu geoterminis potencialas ir jo praktinio panaudojimo galimybė Vakarų Lietuvoje. Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas, geologijos ir geografijos institutas.
- temperatures in the northern Canadian Cordillera: Thermal control of tectonics: *Journal of Geophysical Research*, v. 108(B6)
- Turcotte D.L., 2002. *Geodynamics*. Cambridge University Press, 1 – 46, 135 – 141.



Weeraratne D.S, Forsyth D.W., Fisher K.M., Nyblade A.A., 2003. Evidence for an upper mantle plume beneath the Tanzanian craton from Rayleigh wave tomography, *Journal of geophysical research.*), Vol .108.

Zui V.I., Atroshchenko, V.G., Makarenko V.M., Parkhomov M.D., Urban G.I., Tsalko P.B.,1998. Geothermal field within the territory of Belarus. *International conference „The earths thermal fied related research methods“*, 294 – 297.

LGT Fondu Ataskaita Nr. 5769, geoterminių duomenų rinkimas ir sisteminimas II dalis;

LGT Fondu Ataskaita Nr. 4745, Baltijos sedimentacinio baseino vystymosi bazinis geofizinis-geologinis modelis

## SUMMARY

The theme of Master thesis is “**Origin of West Lithuanian geothermal anomaly**”.

Geothermal anomaly in western part of Lithuania is the most intense in the Eastern Europe Craton that implies exceptional regime in the lithosphere of the region. Inventory of similar heat flow anomalies in the cratons worldwide indicates a strong correlation with age of lithosphere increasing from Archean (41 – 46 mW/m<sup>2</sup>) to Proterozoic (49 – 54mW/m<sup>2</sup>). It is related mostly with different amount of heat generating elements in the crust. According to different estimates the mantle heat flux in stable cratons does not exceed above 20-35 mW/m<sup>2</sup>.

Geothermal anomalies observed in stable cratons can be related to several reasons: higher heat flow from mantle, higher concentration of the heat generating elements in the crust, advective heat transfer along the fault zones.

The origin of the geothermal anomaly in west of Lithuania is not completely clear and is still a matter for discussions. This question is not only scientific, it also has a practical background relating to exploration of geothermal resources.

### **The purposes of the study:**

1. Inventory of the geothermal anomalies in cratons;
2. Origin of the geothermal anomaly in west Lithuania;
3. Assessment of the crustal and mantle input to the the surface heat flow;
4. Identification of the perspective areas for geothermal energy exploration.

According to geothermal modelling the West Lithuanian geothermal anomaly is caused by several factors (1) high heat generation of crustal lithologies and (2) increased heat flow (10-15mW/m<sup>2</sup> higher than that in east Lithuania) from the mantle. And input to the total heat flow from the crustal heat generation is about 45mW/m<sup>2</sup> in west Lithuania. Higher mantle heat flow can be caused by small-scale mantle flow or enrichment by minerals having increased thermal conductivity in the upper mantle.

The alternative geothermal model was also constructed. It shows that  $3 \mu\text{W}/\text{m}^3$  of heat generation in the low velocity layer at 10 km depth might be enough to explain high surface heat flow in west Lithuania.

Modelling shows that most perspective areas for geothermal exploration where  $150^\circ\text{C}$  temperature is less than 5km depth coincides with Žemaičių Naumiestis granitoids and Vilkyčiai areas.