

Hveravellir

TEM-mælingar 2006



Ragna Karlsdóttir
Arnar Már Vilhjálmsson

Unnið fyrir Orkumálasvið Orkustofnunar

ÍSOR-2006/049

ÍSLENSKAR ORKURANNSÓKNIR

Reykjavík: Orkugarður, Grensásvegi 9, 108 Rvk. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1699
Akureyri: Rangárvöllum, P.O. Box 30, 602 Ak. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1599
isor@isor.is – www.isor.is

Ragna Karlsdóttir
Arnar Már Vilhjálmsson

Hveravellir

TEM-mælingar 2006

Unnið fyrir Orkumálasvið Orkustofnunar

ÍSOR-2006/049

Desember 2006

ISBN 9979-780-46-0

Skýrsla nr. ÍSOR-2006/049	Dags. Desember 2006	Dreifing <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill Hveravellir TEM-mælingar 2006		Upplag 25
		Fjöldi síðna 52
Höfundar Ragna Karlsdóttir Arnar Már Vilhjálmsson		Verkefnisstjóri Ragna Karlsdóttir
Gerð skýrslu / Verkstig Jarðeðlisfræðileg könnun jarðhitakerfis		Verknúmer 540-114
Unnið fyrir Orkumálasvið Orkustofnunar		
Samvinnuaðilar		
Útdráttur <p>Gerð er grein fyrir jarðeðlisfræðilegum mælingum á jarðhitasvæðinu á Hveravöllum. Um er að ræða fyrsta skref í slíkri könnun á jarðhitanum þar. Viðnámsmælingum er beitt til þess að afmarka stærð háhitakerfa í efstu 1000 metrum undir yfirborði. Samkvæmt mælingum er uppstreymi jarðhitavatns á Hveravöllum um 2,5 km langa sprungu með stefnu nálægt N28°V. Mesta uppstreymið er undir aðalhverasvæðinu á Hveravöllum. Lágt viðnám í yfirborði er við Einbúa og bendir greinilega til uppstreymis þar. Þetta lágviðnám breiðir úr sér með dýpi og tengist jarðhitastöðum sem kenndir eru við Þegjandavolgrur. Lágviðnámslag er neðan 400–700 metra dýpis á mælisvæðinu, grynnt er á það á norðvestanverðu svæðinu og dýpkar á það til suðausturs. Engin merki eru um háviðnámskjarna í efstu 800–1000 metrum, eða eins djúpt og mælingarnar skynja með góðu móti. Það bendir til þess að hitinn í kerfinu sé lægri en 240°C ofan 1 km dýpis. Hveravellir líkjast Geysissvæði, bæði að ytri ásýnd og niðurstöðum viðnámsmælinga. Í báðum tilfellum er um að ræða „ekki heit“ háhitakerfi með líklegt hitastig undir 240°C á 1 km dýpi. Ekki sér fyrir endann á jarðhitasvæðinu til norðurs og norðvesturs. Þarna er lágviðnámið aðeins á um 400 metra dýpi yfirleitt og í yfirborði við Einbúa. Mælingarnar 2005 þekja ekki nægjanlega stórt svæði til að afmarka jarðhitasvæðið á Hveravöllum. Þær sýna tvö uppstreymissvæði en hvergi dýpkun á lágviðnámið meira en á 700 metra dýpi suðaustast á mælisvæðinu. Enn sem komið er sést engin afmörkun til norðurs og vesturs.</p>		
Lykilorð Hveravellir, jarðhitasvæði, TEM-viðnámsmælingar, viðnámsnið, jafnviðnámskort, uppstreymisrás, þrívítt líkan, mæliferlar	ISBN-númer 9979-780-46-0	
	Undirskrift verkefnisstjóra	
	Yfirfarið af ÓGF	

Efnisyfirlit

1	Inngangur	7
2	Jarðhitinn á Hveravöllum.....	7
3	Viðnám í bergi.....	9
4	TEM-mælingar 2005.....	9
5	Niðurstöður mælinga	11
5.1	Uppstreymisrás og líkanreikningar.....	11
5.2	Viðnámsnið	15
5.3	Jafnviðnámskort	23
6	Samandregnar niðurstöður og umræða	39
7	Heimildir	42
	Viðauki 1: Þrívítt líkan og staðsetning mælinga í líkani.....	43
	Viðauki 2: Mæliferlar og túlkun þeirra	44

Myndir

Mynd 1.	<i>Hveravellir; Öskurhóll fremst á myndinni og Bláhver í baksýn.</i>	8
Mynd 2.	<i>Hverinn Einbúi, um 3.5 km norðan Hveravalla. Sprungan, sem vatnið kemur upp um, hefur stefnuna N18°V</i>	8
Mynd 3.	<i>Staðsetning viðnámsmælinga á Hveravöllum.</i>	10
Mynd 4.	<i>Mæliferill og líkanferill innan sprungunnar.</i>	12
Mynd 5.	<i>Mæliferlar og líkanferlar innan við og utan við kant sprungunnar.</i>	12
Mynd 6.	<i>Líkanferlar við enda sprungunnar.</i>	13
Mynd 7.	<i>Líkanferill 200 metrum frá enda sprungunnar og mæliferill 690935.</i>	14
Mynd 8.	<i>Líkanferill 600 m frá sprungu og mæliferlar 690952 og 680935.</i>	14
Mynd 9.	<i>Lega viðnámsniða á Hveravöllum.</i>	15
Mynd 10.	<i>Viðnámsnið AV925.</i>	16
Mynd 11.	<i>Viðnámsnið AV935.</i>	16
Mynd 12.	<i>Viðnámsnið AV945. Neðra sniðið sýnir líkansprunguna.</i>	17
Mynd 13.	<i>Viðnámsnið AV950. Neðra sniðið sýnir líkansprunguna.</i>	18
Mynd 14.	<i>Viðnámsnið AV955. Neðra sniðið sýnir líkansprunguna.</i>	19
Mynd 15.	<i>Viðnámsnið AV965.</i>	20
Mynd 16.	<i>Viðnámsnið AV975.</i>	20
Mynd 17.	<i>Viðnámsnið AV985.</i>	21
Mynd 18.	<i>Viðnámsnið NS567.</i>	21
Mynd 19.	<i>Viðnámsnið NS568.</i>	22
Mynd 20.	<i>Viðnámsnið NS569.</i>	22

Mynd 21. Viðnámsnið NS570.....	23
Mynd 22. Viðnámskort á 600 m y.s.	25
Mynd 23. Viðnámskort á 550 m y.s.	26
Mynd 24. Viðnámskort á 500 m y.s.	27
Mynd 25. Viðnámskort á 450 m y.s.	28
Mynd 26. Viðnámskort á 400 m y.s.	29
Mynd 27. Viðnámskort á 350 m y.s.	30
Mynd 28. Viðnámskort á 300 m y.s.	31
Mynd 29. Viðnámskort á 250 m y.s.	32
Mynd 30. Viðnámskort á 200 m y.s.	33
Mynd 31. Viðnámskort á 150 m y.s.	34
Mynd 32. Viðnámskort á 100 m y.s.	35
Mynd 33. Viðnámskort við sjávarmál.	36
Mynd 34. Viðnámskort á 100 m u.s.	37
Mynd 35. Viðnámskort á 200 m u.s.	38
Mynd 36. Staðsetning uppstreymissprungu á Hveravöllum	41
Mynd 37. Meyjarauga á Hveravöllum.	42

1 Inngangur

Árið 2005 var mælt viðnám í jörðu með svonefndri TEM-aðferð á Hveravöllum á Kili. Viðnámsmælingum er beitt til þess að afmarka stærð háhitakerfa í efstu 1000 metrum undir yfirborði. Rannsóknin var gerð fyrir Orkustofnun og er fyrsta skref í jarðeðlisfræðilegri könnun jarðhitakerfisins. Allítarlegar rannsóknir hafa farið fram á jarðhitasvæðinu á Hveravöllum eins og rakið er í skýrslu Helga Torfasonar (Helgi Torfason, 1997). Jarðfræðileg könnun og kortlagning jarðhitasvæðisins var gerð að undirlagi Orkustofnunar árið 2004, svo og athugun á efnainnihaldi vatnsins. Niðurstöður þeirrar rannsóknar eru birtar í skýrslu ÍSOR (Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005).

2 Jarðhitinn á Hveravöllum

Mjög ítarleg lýsing á jarðhitastöðum á Hveravöllum og næsta nágrenni er í skýrslu Helga Torfasonar (Helgi Torfason, 1997) ásamt nákvæmum kortum og lýsingum. Hér er því vísað í hana svo og skýrslu Árna Hjartarsonar og Magnúsar Ólafssonar. Rétt er þó að nefna helstu svæðin í stórum dráttum til að notast við í texta og umfjöllun um niðurstöður mælinga.

Hveravellir. Aðalhverasvæðið á Hveravöllum er í jaðri Kjalhrauns, þannig að syðstu gufur eru inni á hrauninu en aðalhverirnir utan hrauns. Þeir eru allfjölbreyttir að gerð, gufuhverir, leirhverir, suðuhverir, vatnshverir, laugar og volgrur. Goshverir gjósa óreglulegum smágosum. Útfellingar eru áberandi, hverahrúður og kísilbungur. Hverasvæðið er sérlega fjölbreytilegt og fallett. Ljósmyndin á forsíðu skýrslunnar er af Grænahver á Hveravöllum (Ljósmyndari: Magnús Ólafsson). Svæðið sem hér er kennt við Hveravelli nær allt frá hraunjaðrinum (hrauninu) og norður á Breiðamel. Óhætt er að segja að jarðhitasvæðið á Hveravöllum sé eitt fjölbreyttasta og um leið fallegasta hverasvæði landsins. Því hefur verið spillt talsvert af byggingum of nærri.

Þegjandalaugar eru um 3–3,5 km norðan við Hveravelli og er lýst í skýrslu Árna Hjartarsonar og Magnúsar Ólafssonar.

Einbúi er nyrsti suðuhver á öllu Hveravallasvæðinu og er í lækjarfarvegi sem gengur til vesturs frá Þegjanda.

Beljandavolgrur eru um 7 km norður af Hveravöllum við ána Beljanda. Mælisvæði viðnámsmælinganna nær ekki svo langt til norðurs.

Öllum þessum stöðum er lýst í fyrrgreindum skýrslum og er því vísað til þeirra.



Mynd 1. *Hveravellir; Öskurhóll fremst á myndinni og Bláhver í baksýn. (Ljós. Magnús Ólafsson).*



Mynd 2. *Hverinn Einbúi, um 3.5 km norðan Hveravalla. Sprungan, sem vatnið kemur upp um, hefur stefnuna N18°V. (Ljós. Magnús Ólafsson).*

3 Viðnám í bergi

Helstu áhrifavaldar í viðnámi bergs eru vökvainihald bergsins, selta og hiti vökvans, svo og ummyndun bergsins. Í stuttu máli er því háttað þannig að vatnsmettað berg leiðir rafstraum betur en þurrt berg og rafleiðnin eykst með hækkandi hita. Heit vatnskerfi skera sig úr umhverfinu vegna þess að rafleiðni (viðnám) tiltekinnna leirsteinda (lagsilikata, eins og smektít) á sprunguflötum bergsins er mjög hitaháð. Rafleiðni bergsins er óverulega háð seltu vökvans í berginu nema hún sé mjög há og nálgist seltu sjávar (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 2005).

TEM-viðnámsmælingar sýna vel ummyndun bergs í háhitakerfum, einkum í ferskvatnskerfum. Hefðbundin viðnámsmynd af háhitakerfi sýnir lágviðnámskápu umlykja háviðnámskjarna í miðju jarðhitakerfisins. Viðnámsmælingarnar endurspeglar ummyndun bergsins við hita. Við hitastig frá um það bil 40°C að 200°C eru zeólítar og smektít ráðandi steindir. Smektít er leirsteind, sem hefur þann eiginleika að leiða rafmagn vel og leiðnin vex hratt með hita. Þetta er ástæða góðrar leiðni og þar með lágs viðnáms í lágviðnámskápunni. Þegar hitastig hækkar upp fyrir 200°C hverfur smektít og klórít verður ráðandi þegar komið er upp fyrir 230°C. Klórít er hins vegar ekki jafnvel leiðandi og smektít og veldur því að viðnámið hækkar fyrir ofan 230–240°C (Knútur Árnason o.fl., 2000).

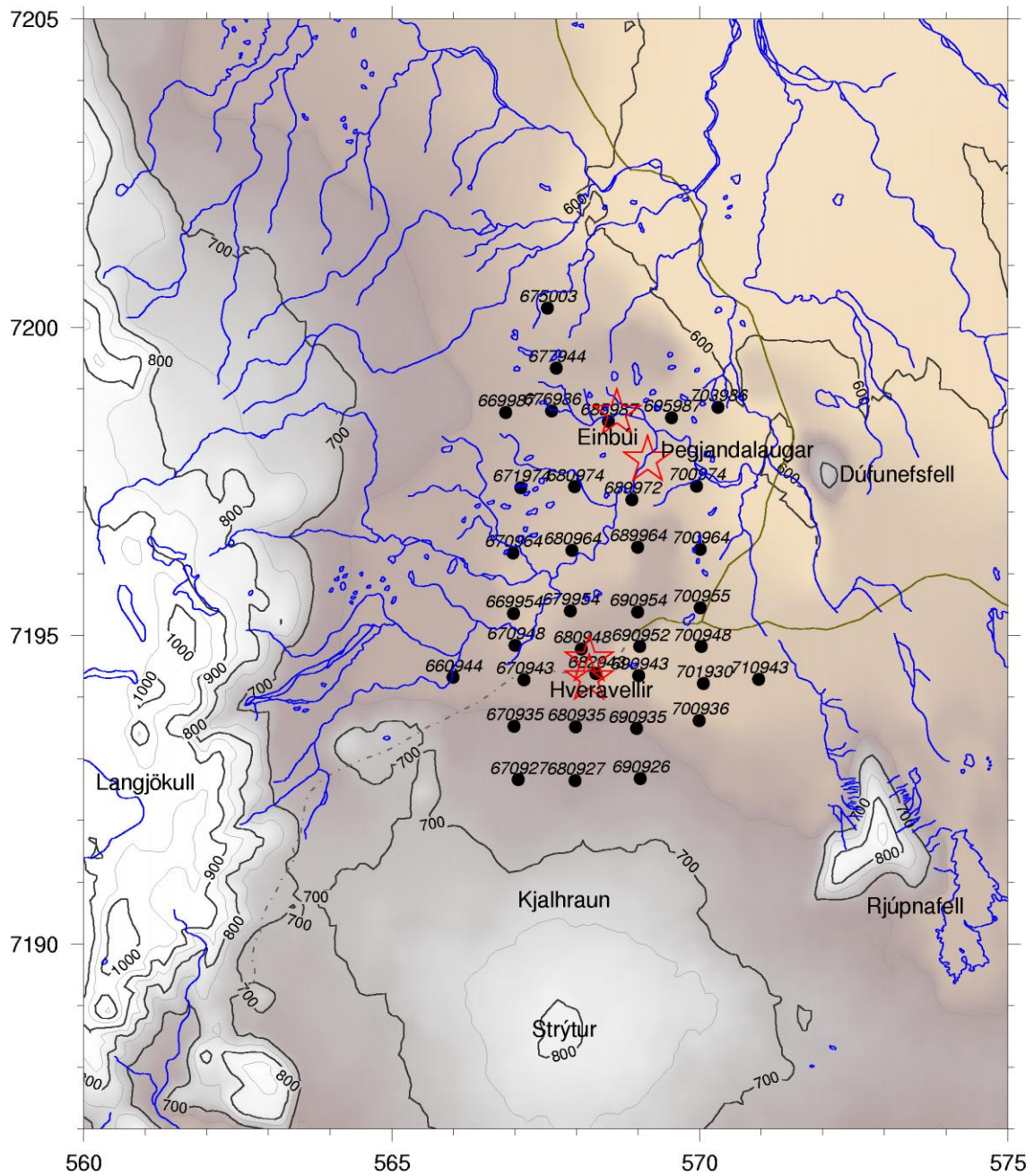
4 TEM-mælingar 2005

Sumarið 2005 hófst rannsókn á viðnámi á jarðhitasvæðinu á Hveravöllum á Kili. Mælingarnar voru fyrsta skref í slíkri rannsókn og er þá mælingum dreift í grófu neti yfir svæðið. Við úrvinnslu kemur síðan í ljós hvort bæta þarf við mælingum til að afmarka stærð svæðisins og þetta mælinetið. Þeir sem komu að mælingunum á Hveravöllum eru Sæmundur Ari Halldórsson, Gunnar S. Hilmarsson, Þorbjörn Guðmundsson, Sigurður Örn Stefánsson og Gísli J. Grétarsson, allt háskólanemar og sumarstarfsmenn á ÍSOR.

Alls urðu mælingar 36, sem hér verða skoðaðar saman.

Mælingarnar eru túlkaðar og settar fram með forritum sem eru hönnuð af sérfræðingum ÍSOR, Knúti Árnasyni og Hjálmar Eysteinsyni. Hver viðnámsmæling er túlkuð einvitt með marglaga líkani (occam inversion) þar sem forritið gerir ráð fyrir mörgum (20–40) láréttum lögum undir mælistað og velur viðnám í þau til að svara mæliferli. Mælingarnar eru síðan bornar saman og settar fram sem heildstæð mynd. Niðurstöður eru sýndar í viðnámsniðum í gegnum mælisvæðið svo og á jafnviðnámskortum sem sýna viðnám í láréttum fleti með 100 metra millibili allt niður á 800 metra dýpi.

Staðsetning mælinganna er sýnd á mynd 3 og einstakar mælingar og túlkun þeirra er sýnd í viðauka 2.



Mynd 3. Staðsetning viðnámsmælinga á Hveravöllum. Rauðu stjörnurnar sýna helstu jarðhitastaði. Hnitakerfi er UTM-wgs84 .

5 Niðurstöður mælinga

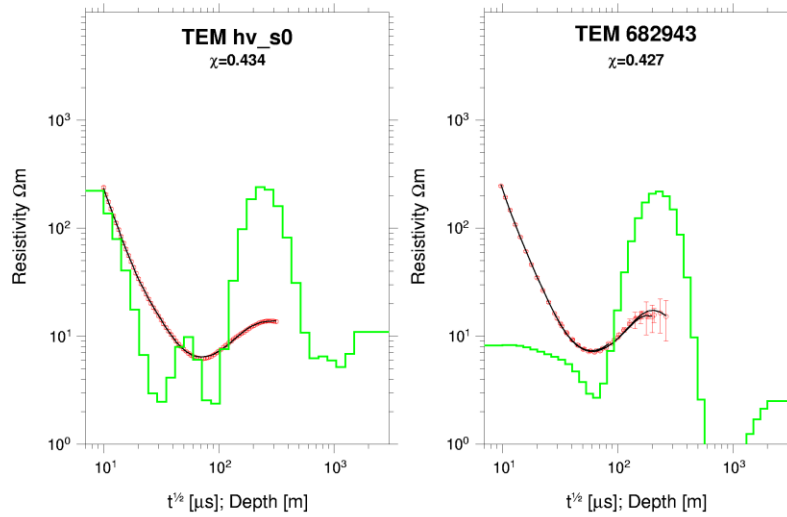
5.1 Uppstreymisrás og líkanreikningar

Við skoðun mælinganna kom í ljós sérkennileg einkenni á þremur mælingum (679954, 680948, 682943). Þessar mælingar liggja í röð með aðeins norðvestlæga stefnu yfir það svæði, sem ætla má sem miðju jarðhitasvæðisins samkvæmt yfirborðsummerkjum. Þessar mælingar sýna allar mjög lágt viðnám á um það bil 100 metra dýpi; síðan um 500 metra þykkt háviðnámslag og svo lágt viðnám undir því. Það sem er athyglisvert við þetta háviðnámslag er að það sést aðeins í þessum þremur mælingum og er ekki í takt við niðurstöður mælinga í kring. Þetta vakti grunsemdir um að þetta „háviðnám“ væri ekki raunverulegt heldur kæmi fram vegna svonefndra þrívíddaráhrifa, þar sem mæling, sem staðsett er yfir þröngri uppstreymissprungu, skynjar ekki aðeins lága viðnámið í sprungunni heldur einnig háviðnám umhverfis hana og mistúlkar það sem lárétt háviðnámslag.

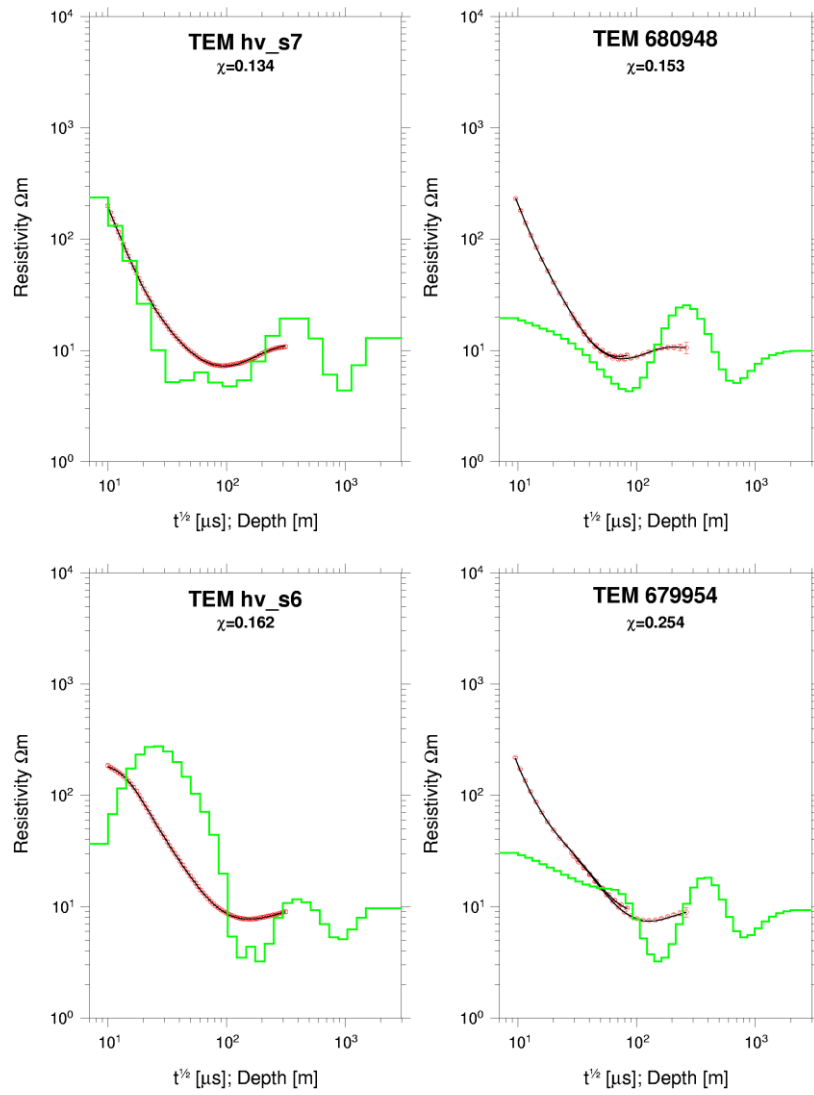
Í framhaldi af þessu var sett upp líkan til túlkunar þrívítt, og mælingar sem herma slíkt líkan bornar saman við raunverulega mæliferla. Líkankeyrslur á þrívíðu líkani eru afar flóknar og það er ástæðan fyrir því að svæðið er ekki allt tekið fyrir og túlkað þannig. Forrit til að nota til túlkunar þrívítt eru í smíðum á ÍSOR, en eru á tilraunastigi enn sem komið er.

Í þrívíða viðnámslíkaninu er líkt eftir heitu vatnskerfi og upp frá því sprungu með heitu vatni. Þetta er með því að gera ráð fyrir lágviðnámi (lágviðnámskápu?, 10 Ω m) á 600–700 metra dýpi og háu viðnámi ofan þess (200 Ω m). Frá lágviðnámslaginu og upp til yfirborðs er svo gert ráð fyrir 3 km langri og 300 m breiðri sprungu með 3 Ω m viðnámi. „Mælingar“ eru síðan staðsettar yfir sprungunni og í ákveðinni fjarlægð frá henni og reiknað út hvernig TEM-mæliferlar líta út við þessar aðstæður. Þessir reiknuðu ferlar eru svo bornir saman við raunverulega mæliferla frá Hveravöllum. Líkanið og staðsetning mælinga í því er sýnt í viðauka 1.

Reiknaði mæliferillinn hv_s0 yfir sprungunni sýnir hliðstæð einkenni og mælingin 682943 (mynd 4) og af því dregin sú ályktun að sú mæling sé yfir miðri uppstreymisrásinni á Hveravöllum. Sömu einkenni sjást í mælingum 679954 og 680948 en ekki eins skörp og í 682943. Líkanmælingar við kant sprungunnar gáfu þær niðurstöður að reiknaði ferillinn hv_s7 í innanverðum kanti líkansprungunnar er mjög í takti við mælinguna 680948 og reiknaði ferillinn hv_s6 í utanverðum kanti líkansprungunnar er í takti við 679954 (mynd 5). Líkanreikningarnir sýna að þessar þrjár mælingar eru yfir eða í jaðri uppstreymisrásar.

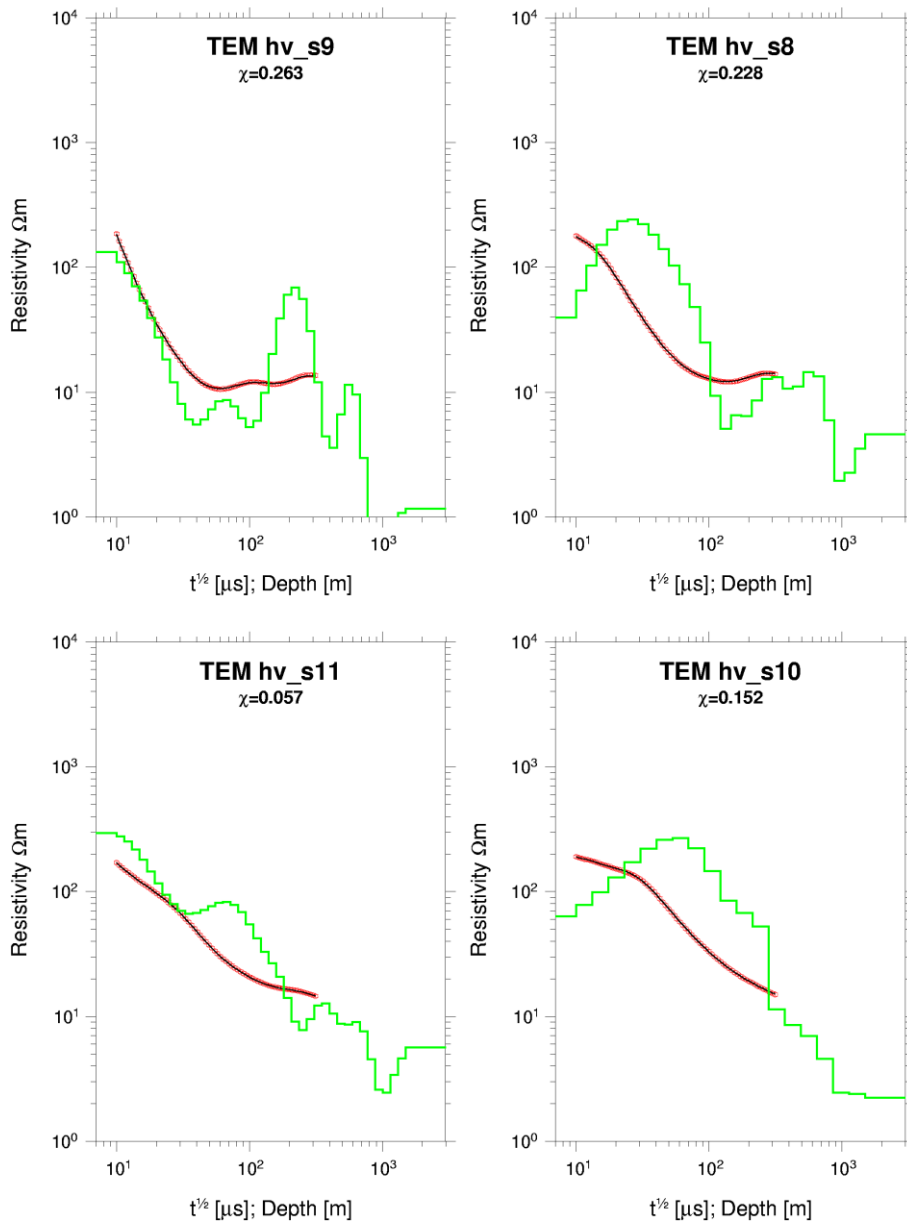


Mynd 4. Mæliferill og líkanferill innan sprungunnar.



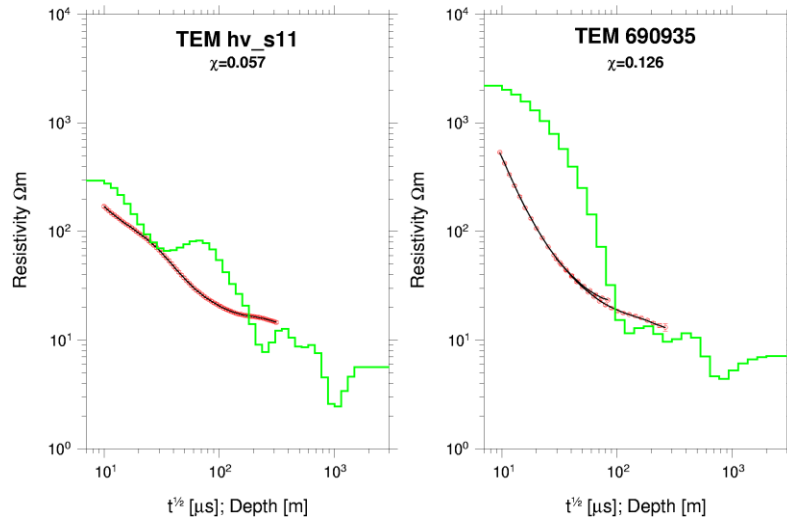
Mynd 5. Mæliferlar og líkanferlar innan við og utan við kant sprungunnar.

Mæling 690935, sem er í stefnu sprungunnar til suð-austurs, ber þess merki að „sjá“ sprunguna. Til þess að reyna að ákvarða hvar endi sprungunnar er, var sett upp röð mælinga í líkaninu þannig að hv_s9 var innan sprungunnar í enda hennar; hv_s8 var utan sprungunnar við endann; hv_s11 var 200 metra frá enda og hv_s10 var 300 metra frá enda. Reiknaðir ferlar frá þessum mælingum (mynd 6) eru svo bornir saman við raunferilinn 690935 og sést þá að ferill hv_s11 fellur best að mælingunni, þó er eins og mælingin 690935 sé aðeins nærri sprunguendanum en þó ekki eins nærri og hv_s8. Mælingarnar 690935 og hv_s11 eru sýndar saman á mynd 7.

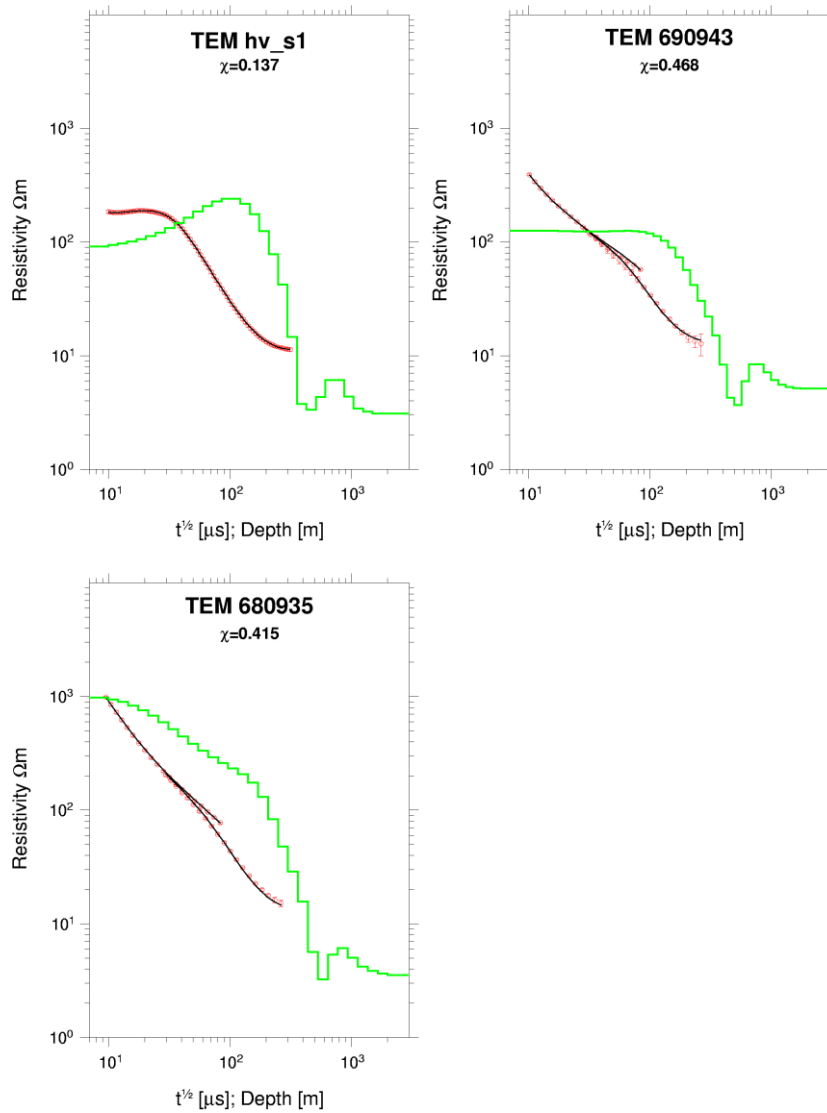


Mynd 6. Líkanferlar við enda sprungunnar.

Mæling hv_s1 í líkaninu er staðsett 600 metra til hliðar við líkansprunguna. Mæliferill hennar fellur vel að mæliferlum 690952, sem er 600 metra vestan við sprunguna og 680935, sem er 700 metra austan við hana (mynd 8).



Mynd 7. Líkanferill 200 metrum frá enda sprungunnar og mæliferill 690935.

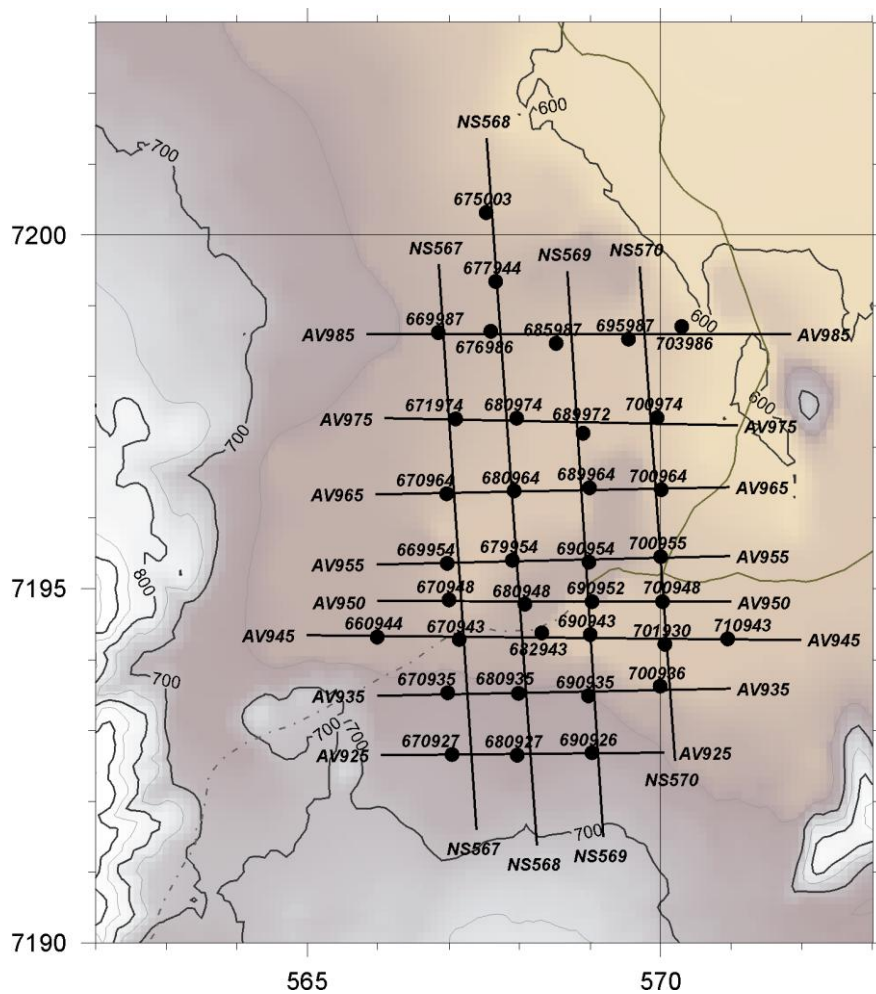


Mynd 8. Líkanferill 600 m frá sprungu og mæliferlar 690952 og 680935.

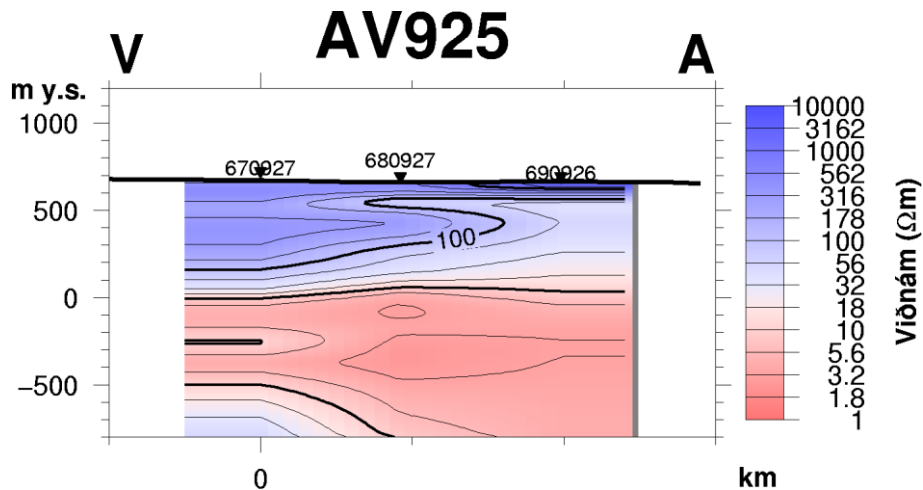
Hafa verður í huga að líkanið er mjög einfalt og einungis hugsað til að fá fram helstu einkenni mælinga yfir og við uppstreymisrás. Ekki var gert ráð fyrir lágu viðnámi í yfirborði út frá sprungunni, sem augljóslega er til staðar í raun. Líkanið er haft einfalt þar sem líkanforritið ræður illa við flóknar aðstæður enn sem komið er. Enda þótt jörðin verði aldrei hermd í einföldu líkani er dergin sú ályktun að jarðhitinn á svæðinu á Hveravöllum stjórist af að öllum líkindum af uppstreymissprungu sem er um það bil 3 km á lengd og hefur stefnuna aðeins vestan við norður.

5.2 Viðnámsnið

Niðurstöður viðnámsmælinganna eru settar fram í nokkrum viðnámsniðum í gegnum svæðið. Í samræmi við líkanreikningana varðandi hugsanlega uppstreymissprungu er háviðnámið í mælingunum þremur yfir sprungunni (679954, 680948, 682943) tekið út enda er lítið svo á að það sé ekki raunverulegt heldur vegna þrívíddaráhrifa frá sprungunni og næsta nágrenni hennar. Í stað háviðnámsins er tengt á milli lágviðnámslaganna ofan við og neðan. Þannig er sprungan í raun sett inn sem lágt viðnám í þessum þremur mælingum. Sniðin eru 12 samanlagt, 8 snið sem liggja A-V í gegnum svæðið og 4 sem liggja N-S. Heiti sniðanna er tilvísun í hnitakerfi UTM-wgs84, en það er notað við hnitsetningu allra mælinganna. Lega sniðanna sést á mynd 9.

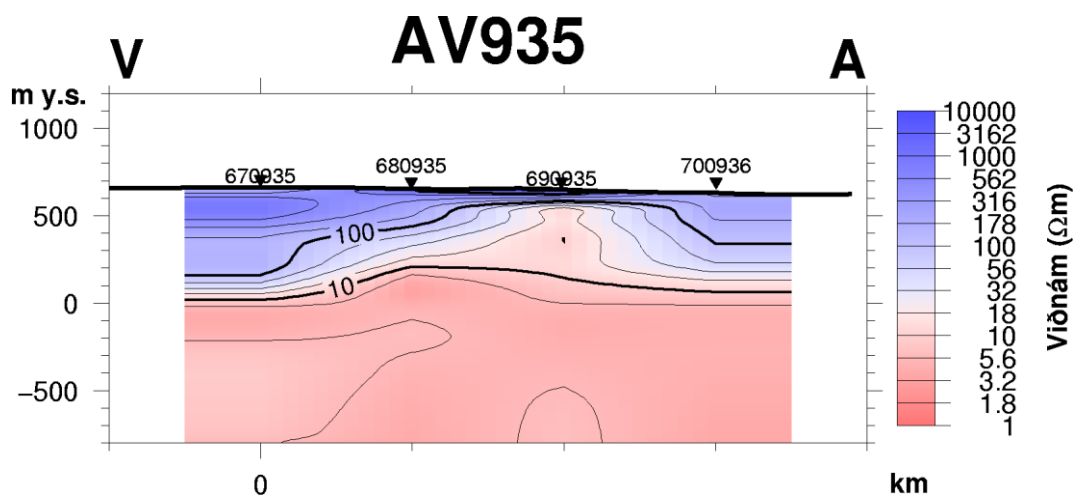


Mynd 9. Lega viðnámsniða á Hveravöllum.



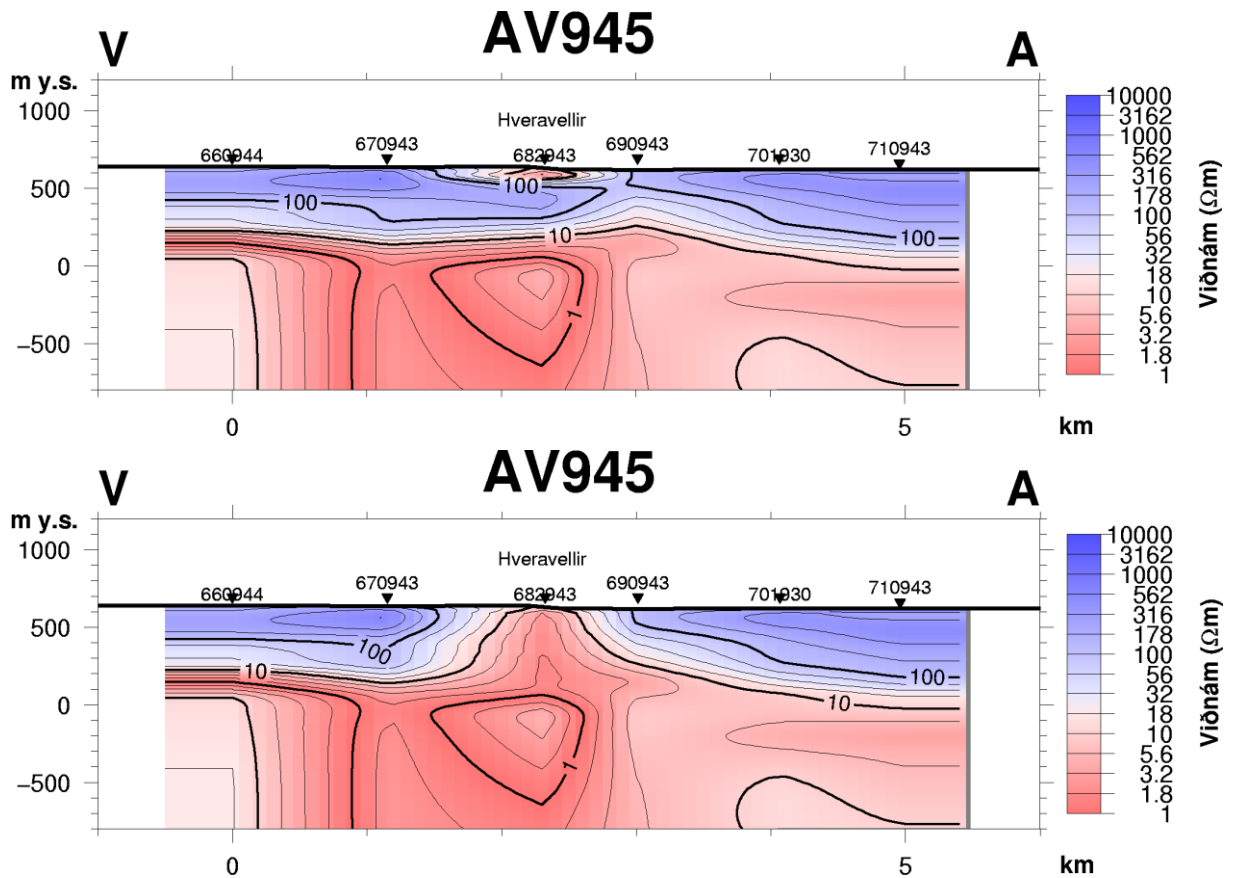
Mynd 10. Viðnámssnið AV925.

Snið AV925 liggur austur-vestur um það bil 2 km sunnan við Hveravelli. Það ákvarðast aðeins af 3 mælingum og sýnir mjög einfalda drætti, hátt viðnám niður á 600–700 metra dýpi og lág viðnám innan við 10 Ωm þar fyrir neðan eins langt og mælingarnar skynja.



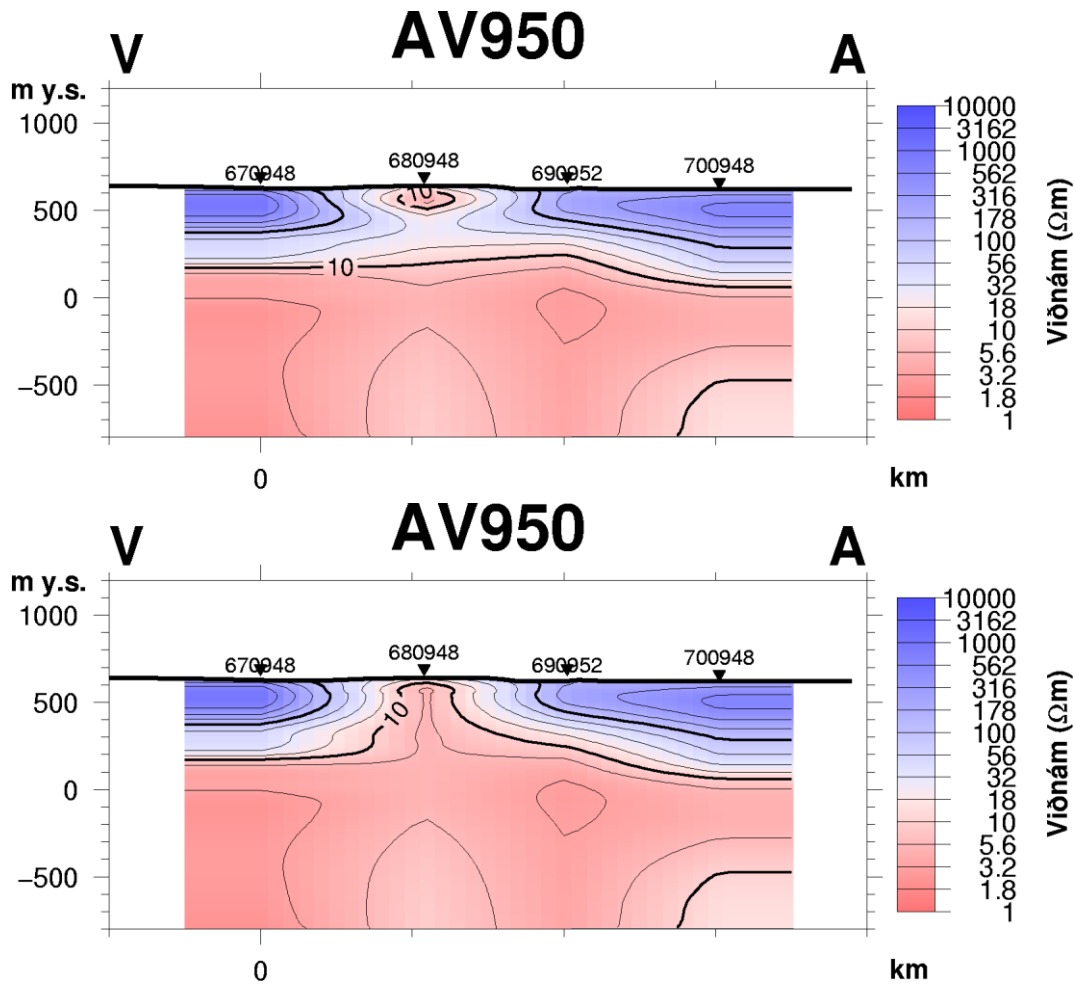
Mynd 11. Viðnámssnið AV935.

Snið AV935 liggur um það bil 1 km sunnan Hveravalla. Í mælingu 690935, sem er mælingin rétt suð-austan við enda sprungunnar sem talað er um hér að framan. Í henni nær lágviðnámið upp undir yfirborð og er því greinilegt að mælingin „sér“ sprunguna vel. Túlkunin sýnir mæliferilinn eins og hann kemur fyrir og ekki gert ráð fyrir að þrívíddarhrifa gæti þarna. Áhugavert er hvernig sniðið sýnir svæðið við enda sprungunnar sem þrönga lágviðnámsrennu. Í næstu mælingu vestan við er lágviðnámið aðeins hærra (á 500 metra dýpi), en utar í sniðinu, en þar er lágviðnámið á 600 metra dýpi.



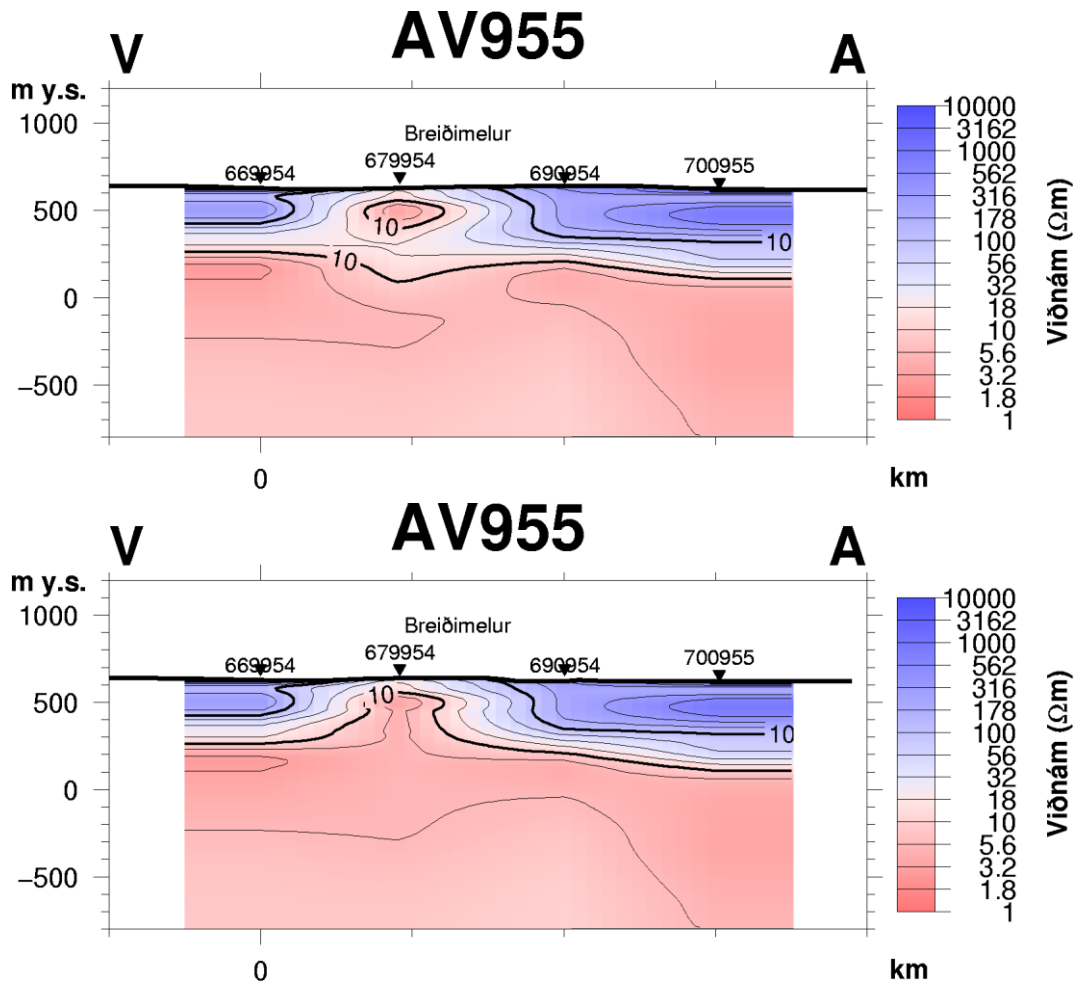
Mynd 12. Viðnámssnið AV945. Neðra sniðið sýnir líkansprunguna.

Snið AV945 liggur austur-vestur yfir Hveravelli. Hér er bæði sýnt sniðið eins og það er beint frá niðurstöðum mælinganna svo og snið þar sem háviðnámið í mælingu 682943, eða þrívíddaráhrifin eru tekin burt og lágviðnám sett í staðinn. Þetta er gert til að sýna hvernig sprungan liggur samkvæmt líkanreikningunum sem fjallað er um í kaflanum hér á undan. Í þessu sniði í mælingu 682943 eru þrívíddaráhrifin skörpust og gert ráð fyrir að þarna sé aðaluppstreymi í sprungunni, enda liggur sniðið um aðalhverasvæði Hveravalla.



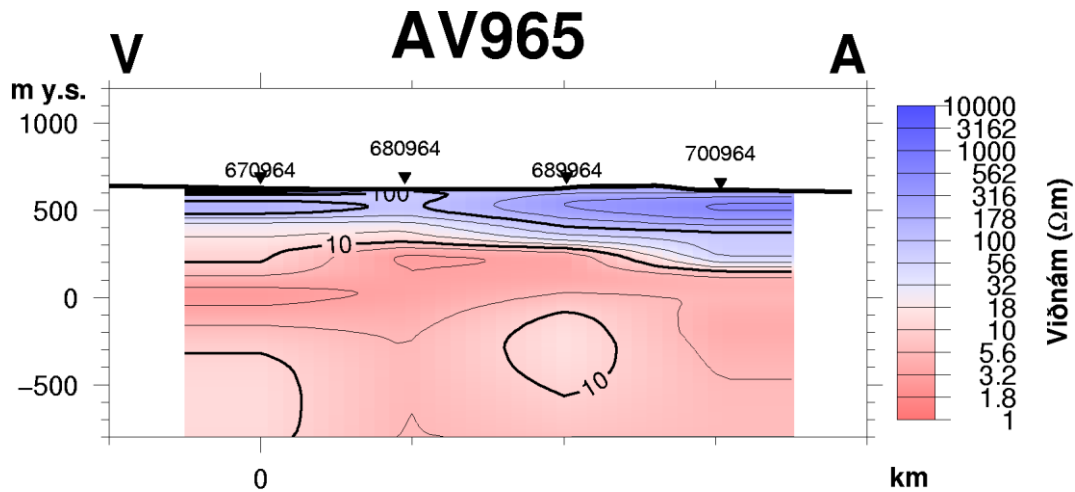
Mynd 13. Viðnámssnið AV950. Neðra sniðið sýnir líkansprunguna.

Snið AV950 liggur austur vestur um hálfum km norðan við sniðAV945. Hér er sýnd tvenns konar birting á sniðinu á sama hátt og í sniðinu hér á undan. Annars vegar sést háviðnámið í mælingu 680948 og hins vegar er það tekið burt. Eins og fjallað er um í kaflanum á undan er mælingin 680948 í innanverðum jaðri sprungunnar. Heldur er dýpra á lágviðnámslagið austan sprungunnar en vestan hennar.



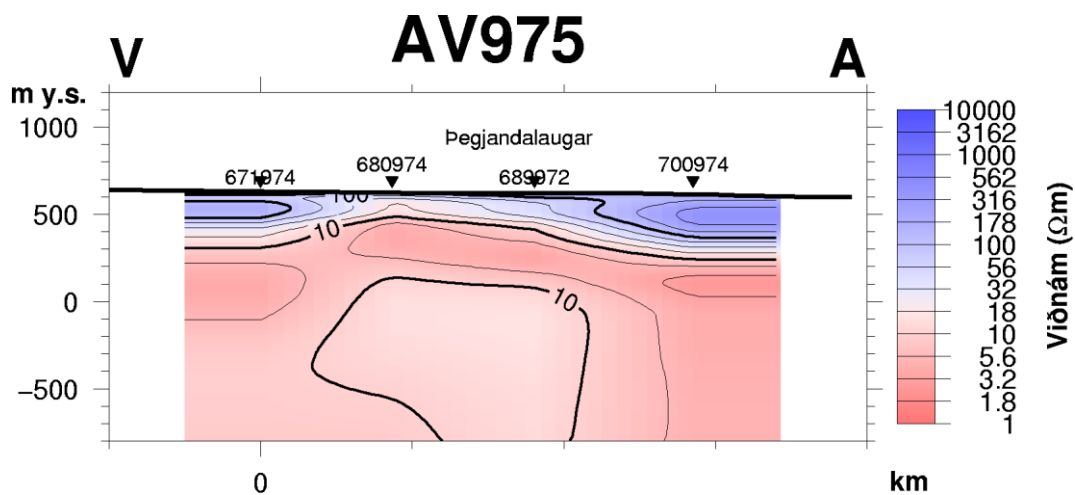
Mynd 14. Viðnámssnið AV955. Neðra sniðið sýnir líkansprunguna.

Snið AV955 liggur austur vestur um 1 km norðan Hveravalla. Sniðið er sýnt á tvennan hátt eins og sniðin tvö AV945 og AV950 á undan. Sprungan sést í mælingu 679954, sem er við utanverðan kant hennar. Lágviðnámslagið er á 400–500 metra dýpi og dýpkar á það til austurs eins og í sniðunum hér á undan.



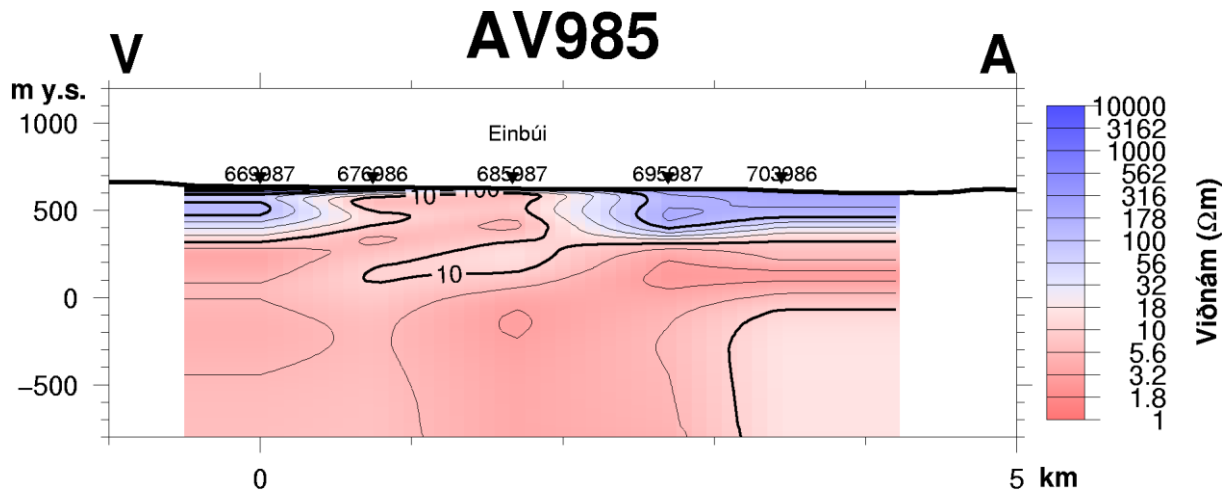
Mynd 15. Viðnámssnið AV965.

Snið AV 965 liggur austur vestur um 2 km norðan Hveravalla. Sniðið liggur norðan við sprunguna. Lágviðnámið er á um 350–500 metra dýpi og er dýpst á það austast í sniðinu.



Mynd 16. Viðnámssnið AV975.

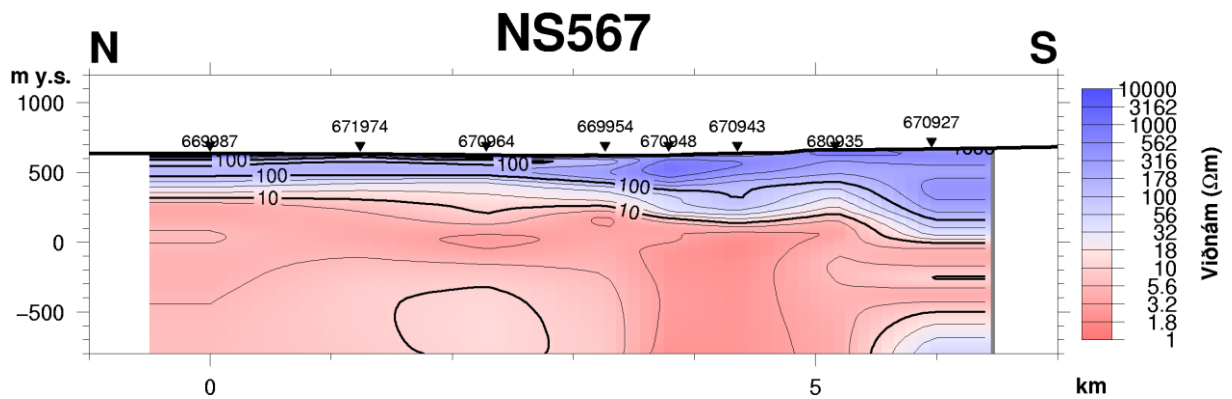
Snið AV975 liggur austur-vestur um 3 km norðan Hveravalla. Hér hvelfist lágviðnámið upp undir yfirborð, eða á 100 metra dýpi í mælingunum 680974 og 689972, en hún er einmitt við Þegjandalaugar. Þetta tengist lágviðnámssvæði, sem betur sést í næsta sniði og endurspeglar hverasvæðið við Þegjandalaugar og Einbúa.



Mynd 17. Viðnámssnið AV985.

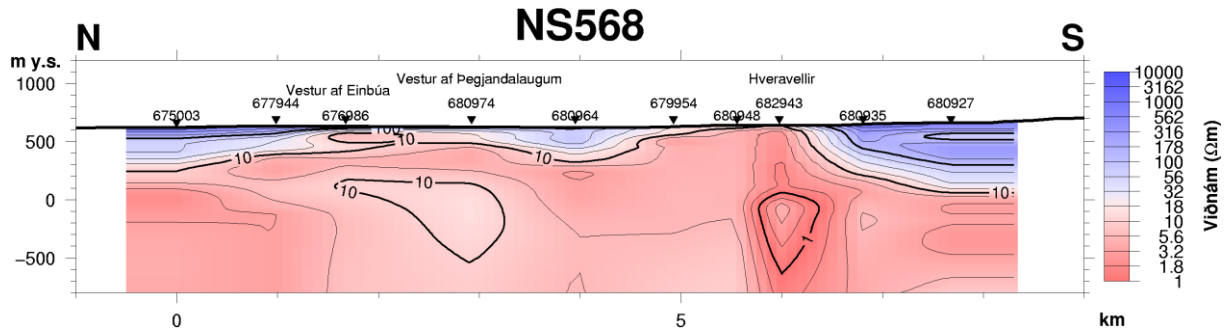
Snið AV985 liggur um 4 km norðan við Hveravelli og er mæling 685987 við Einbúa. Þarna nær lágviðnámið upp í yfirborð og greinilega tengt jarðhitnum við Einbúa. Þetta svæði virðist ekki hafa einkenni þröngrar uppstreymissprungu. Norðan við sniðið eru aðeins til tvær mælingar, sem eru norðvestast á mælisvæðinu. Í þeim sést að það dýpkar á lágviðnámið til norðvesturs en engar mælingar eru til staðar til að sjá norðurmörk jarðhitasvæðisins við Einbúa. Engar mælingar ná norður að volgrunum við Beljanda og því ekki hægt að sjá tengsl þarna á milli.

Fjögur N-S snið eru sýnd í gegnum svæðið til nánari skýringar.



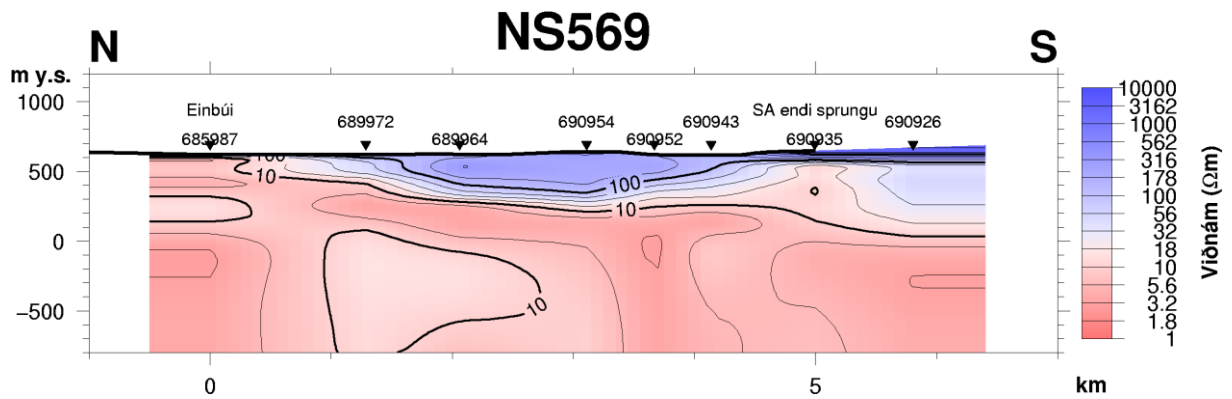
Mynd 18. Viðnámssnið NS567.

Snið NS567 liggur norður-suður alveg vestast á mælisvæðinu. Helstu einkenni þess eru skilin á milli háviðnámsins í efstu 300–600 metrum mælinganna og sést berlega að það dýpkar á lágviðnámið til suðurs. Sniðið er greinilega vestan við sprunguna og „sér“ hana ekki að öðru leyti en því að lægst viðnám er í mælingunum 670948 og 670943 en þær eru einmitt næst sprungunni og er líklegt að lágviðnámið endurspegli nálægðina við uppstreymi heita vatnsins.



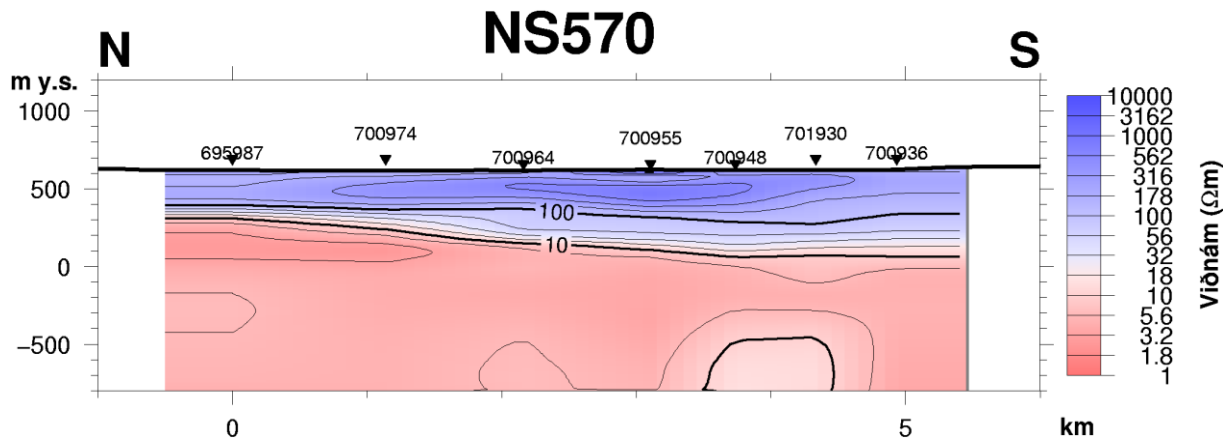
Mynd 19. Viðnámssnið NS568.

Snið NS568 liggur norður-suður yfir hverasvæðið á Hveravöllum, eftir sprungunni. Hér er einungis sýnt sniðið, þar sem lágt viðnám er sett í sprunguna í stað háviðnáms (þrívíddaráhrifanna). Sprungan sést mjög vel, svo og lágviðnám í yfirborði á svæðinu vestur af Einbúa. Fyrir utan þessi tvö uppstreymissvæði er lágviðnámið á 400 metra dýpi nyrst í sniðinu en dýpkar á það til suðurs og er á 700 metra dýpi syðst.



Mynd 20. Viðnámssnið NS569.

Snið NS569 sýnir einnig uppstreymissvæðin tvö. Mæling 690935 er við suðvestur enda sprungunnar og sér vel í uppstreymi hennar. Nyrsta mæling í sniðinu, 685987, er við Einbúa og þar er lágviðnám í yfirborði, vísast tengt jarðhitauppstreymi. Engar mælingar eru norðar til að sjá hvort hér sé um sprungu eða sprungukerfi að ræða, eða til að sjá stefnu þess.



Mynd 21. Viðnámsstrið NS570.

Snið NS570 er komið austur fyrir jarðhitasvæðin. Lágviðnámið er á 400 metra dýpi nyrst í sniðinu og dýpkar á það niður á 700 metra dýpi syðst.

Af sniðunum má sjá að lágt viðnám með viðnámi, undir 10 Ωm , er á 400 til 700 metra dýpi. Grynnt er á það nyrst á svæðinu og dýpkar á það til suðurs. Hvort þetta lágviðnámslag sé eiginleg lágviðnámskápa eins og hún er skilgreind í háhitakerfum er ekki ljóst. Enginn vafi er hins vegar að lágviðnámið er tengt jarðhitanum, sem sýnir vel uppstreymissvæðin tvö. Engin merki eru hins vegar um eiginlegan háviðnámskjarna í efstu 1000 metrunum. Af því má ætla að hiti hafi aldrei náð því marki ofan 1000 metra dýpis, sem þarf til að umbreyta smektíti yfir í klórít (230°C).

5.3 Jafnviðnámskort

Jafnviðnámskortin sýna viðnám á föstu dýpi. Þau sýna þá viðnámið eins og það er á gefnu dýpi, sótt beint í viðnámslíkön túlkuðu mæliferlanna. Hvert kort sýnir viðnám í láréttum fleti og eru kortin sýnd með 50–100 metra dýptarbili. Styttra bil, 50 metrar, eru á milli í efstu 500 metrunum en síðan 100 metrar. Hér eins og áður er lágt viðnám sett inn í mælingarnar þrjár (679954, 680948, 682943) í stað háviðnámsins sem er vegna þrívíddarhrifanna af sprungunni. Þetta veldur breytingu á jafnviðnámskortunum á dýptarbilinu 500 m y.s. niður á 200 m y.s. og gerir það að verkum að sprungan sker sig vel úr. Hæðarviðmiðun kortanna er sjávarmál. Hæð lands á mælisvæðinu er rúmlega 600 til 680 metrar yfir sjó.

Viðnám á 600 m y.s. sýnir viðnámið rétt undir yfirborði og endurspeglar viðnámið úr mælingunum. Lágt viðnám sést í yfirborði á Hveravöllum, á aflöngu svæði, sem hefur stefnu sprungunnar. Lágt viðnám sést einnig í mælingunni við Einbúa.

Viðnám á 550 m y.s. endurspeglar einnig viðnámið úr mælingunum og sýnir enn skýrar lágviðnámið yfir sprungunni og glyttir í framhald hennar til suðausturs frá Hveravöllum. Lágviðnámið við Einbúa teygir sig til vesturs og suðvesturs (suðurs) í átt að Þegjandavolgrum.

Viðnám á 500 m y.s. er nánast eins og á 550 m y.s. en **viðnám á 450 m y.s.** sýnir verulega stækkun á lágviðnáminu á norðursvæðinu, þ.e. við Einbúa og Þegjanda-
laugar. Sprungan við Hveravelli er mjög greinileg og athyglisvert er að sjá skilin á milli
svæðanna.

Viðnám á 400 m y.s. sýnir að svæðin tengjast neðan 250 metra undir yfirborði og
viðnám á 350 m y.s. sýnir lágviðnámslagið á öllu norðvestur mælisvæðinu svo og
áhrifasvæði sprungunnar við Hveravelli.

Á næstu kortum (**viðnám á 300 m y.s.; viðnám á 250 m y.s.; og viðnám á 200 m y.s.**)
sést hvernig dýpkar á lágviðnámslagið jafnt og þétt til suðausturs. Áhrifasvæði
sprungunnar breiðir úr sér, en er samt vel afmarkað með stefnu hennar.

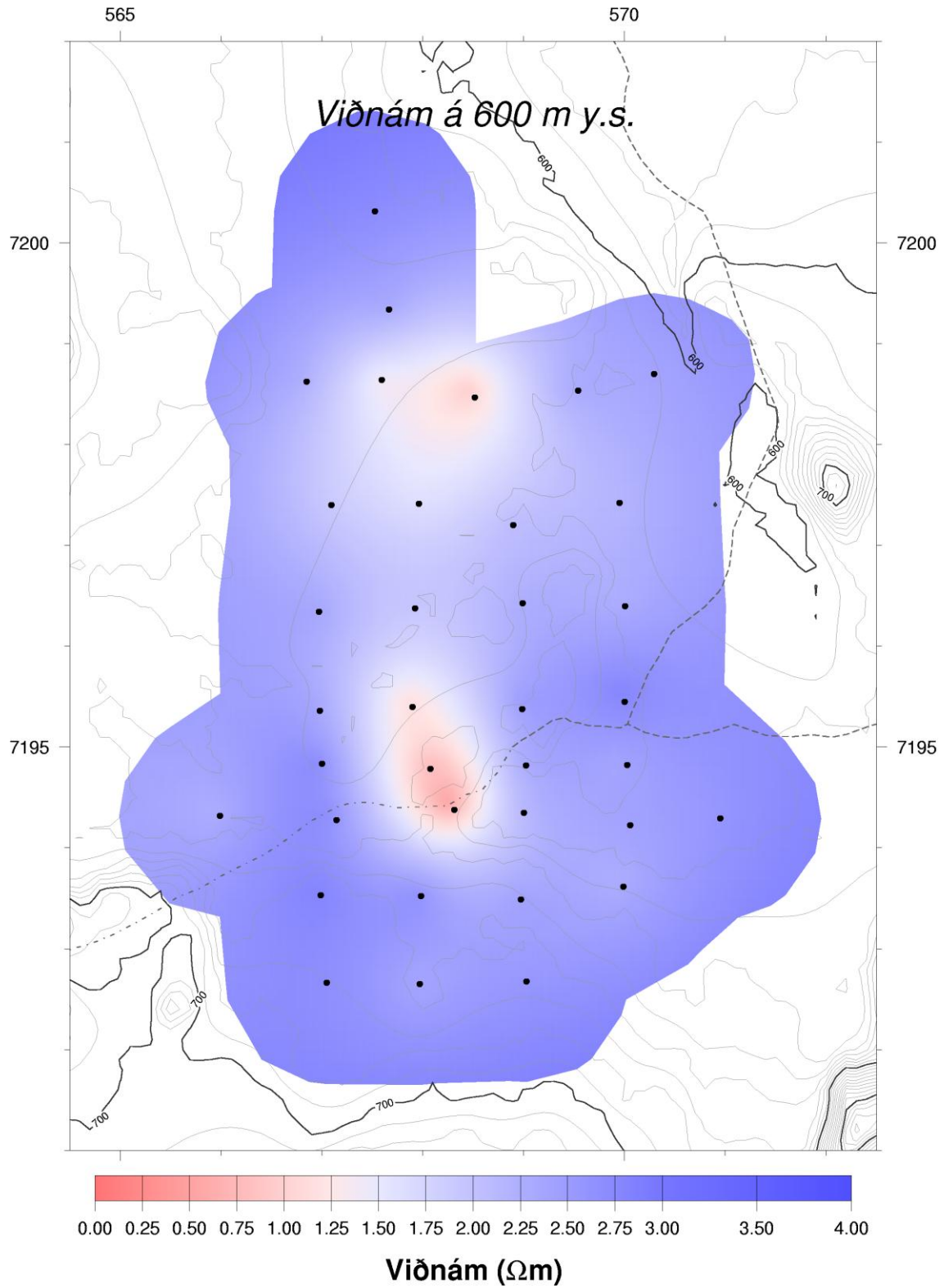
Viðnám á 150 m y.s. sýnir aðstæður neðan þess dýpis sem lágviðnámið var sett á í
sprungunni og endurspeglar því rétt viðnám samkvæmt mælingunum. Áhrifasvæði
sprungunnar er rúmírá kílómetur til beggja handa frá sprungunni og enn dýpkar jafnt á
lágviðnámið til suðausturs.

Viðnám á 100 m y.s. sýnir aðeins í háviðnámið suðaustast á mælisvæðinu og sprungan
sést ekki lengur því kortið sýnir lágviðnámslagið neðan hennar.

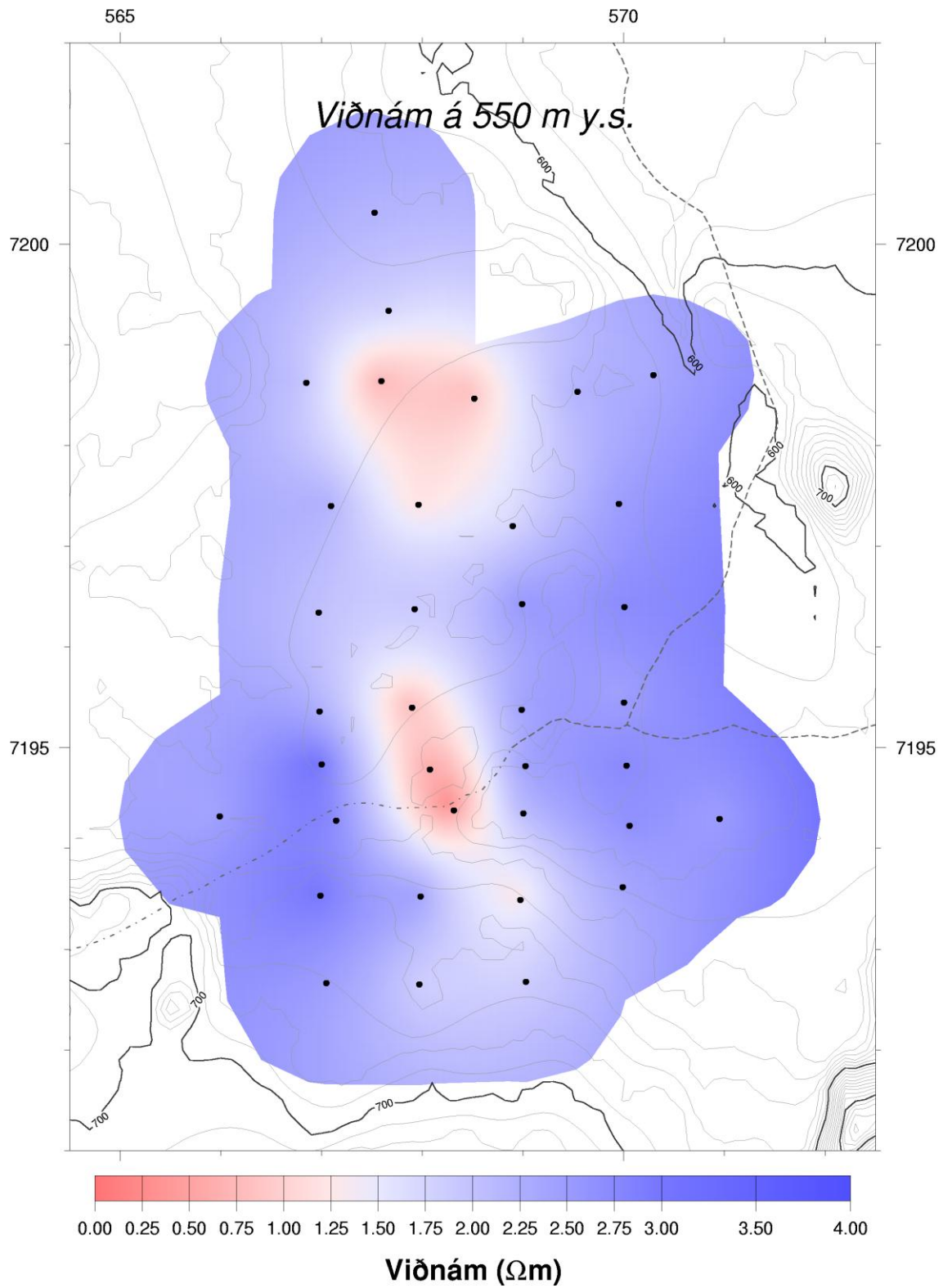
Viðnám við sjávarmál og næstu kort (**viðnám á 100 m u.s. og viðnám á 200 m u.s.**)
sýna öll sömu mynd eða þykkt lágviðnámslag með viðnámi undir 10 Ωm svo langt
sem mælingarnar skynja.

Jafnviðnámskortin sýna að undir öllu mælisvæðinu er lágviðnámslag með innan við 10
Ωm viðnám ofan 800–1000 metra dýpis undir yfirborði og bendir það til viðamikils
heits vatnskerfis ofan 1000 metra dýpis. Efra borð þessa lágviðnámslags er á 350–400
metra dýpi (350 m.y.s.) á norðvestanverðu mælisvæðinu. Það dýpkar síðan jafnt á
lágviðnámslagið til suðausturs og er efra borð þess á um 650 metra dýpi (sjávarmál)
suðaustast á mælisvæðinu.

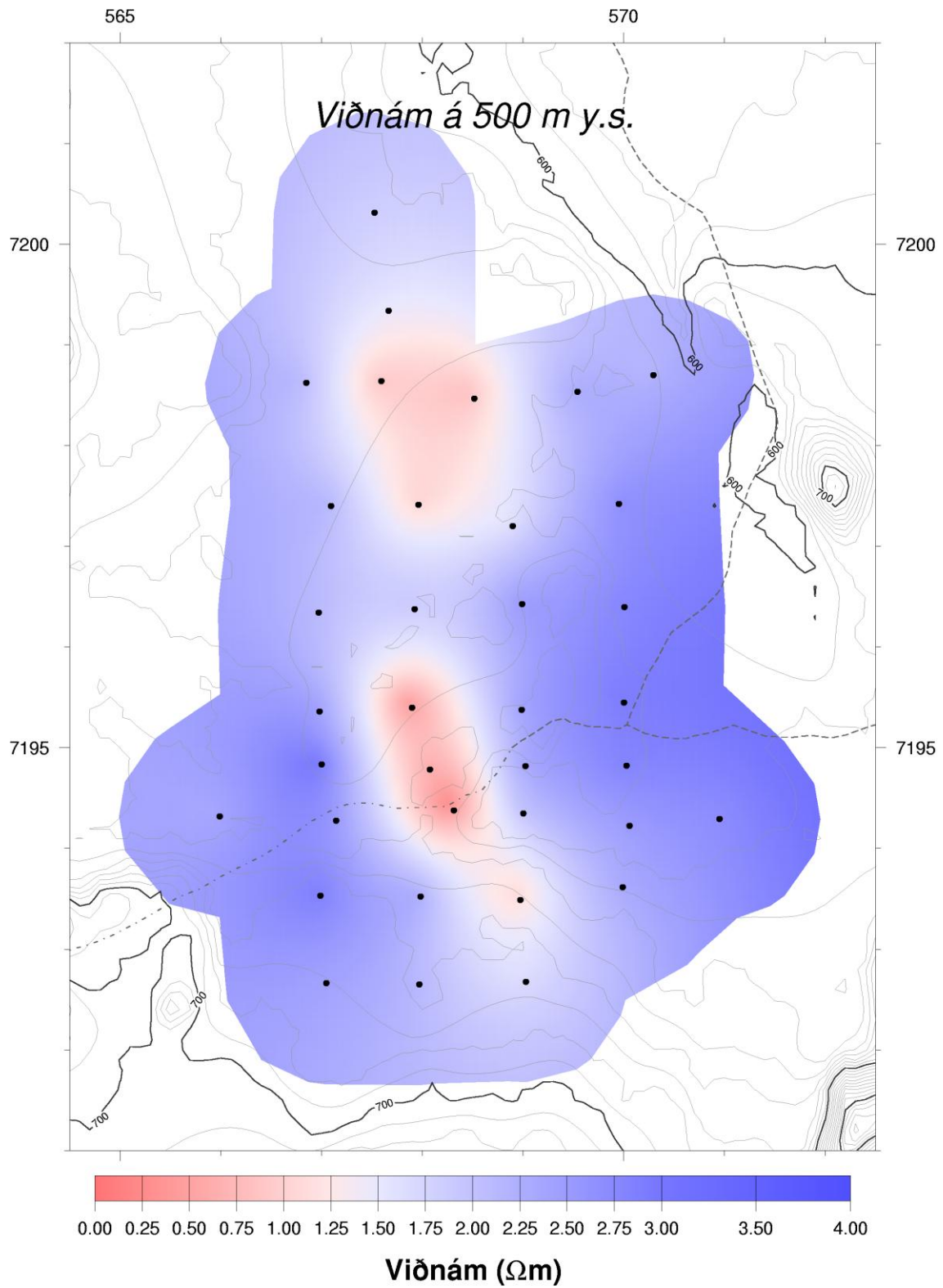
Lágviðnámslagið nær yfirborði í tveimur svæðum, annars vegar í þröngri rás eða
sprungu við Hveravelli og hins vegar hvelfist það upp undir jarðhitnum við
Þegjandavolgrur og í Einbúa.



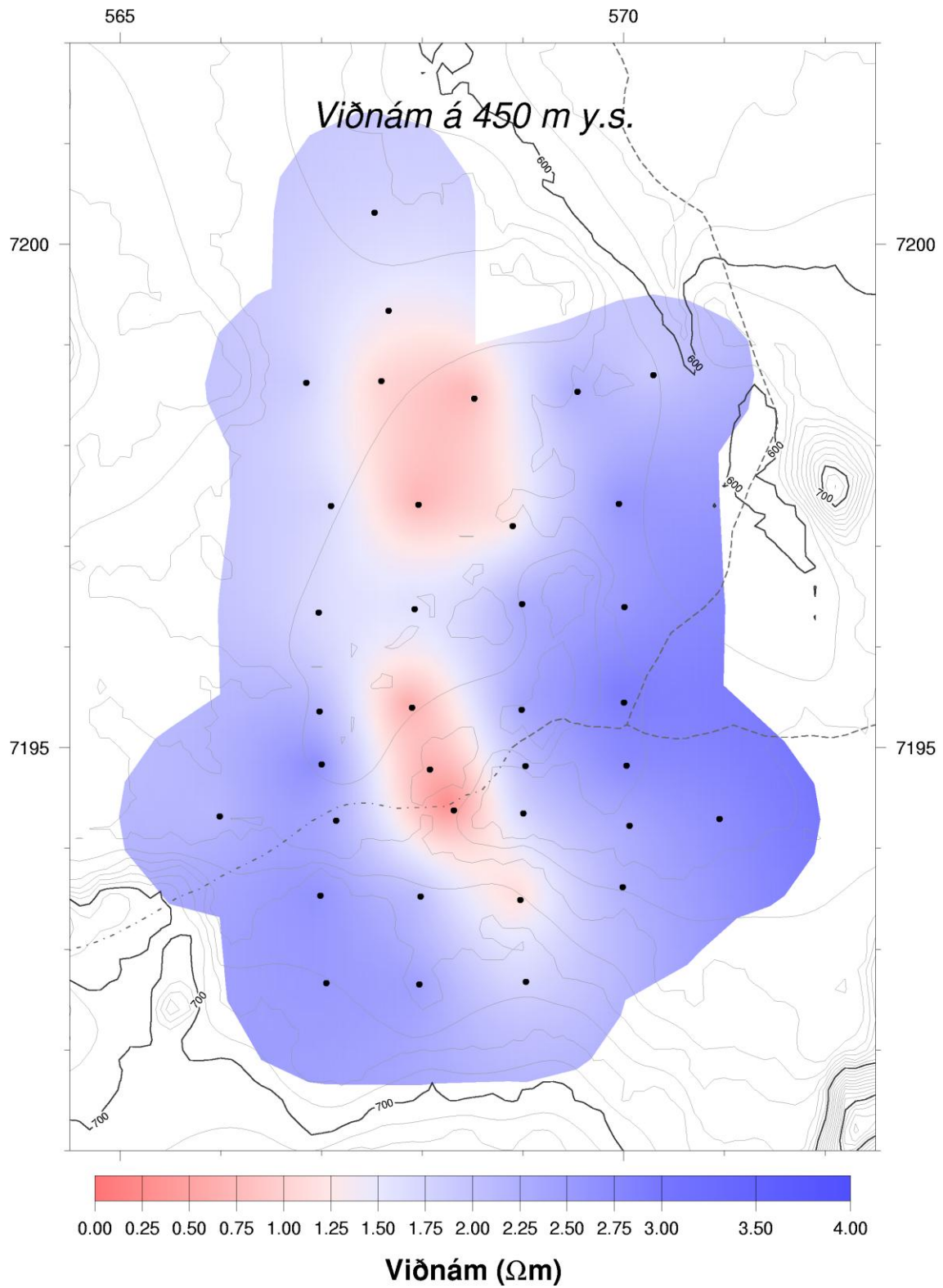
Mynd 22. Viðnámskort á 600 m y.s.



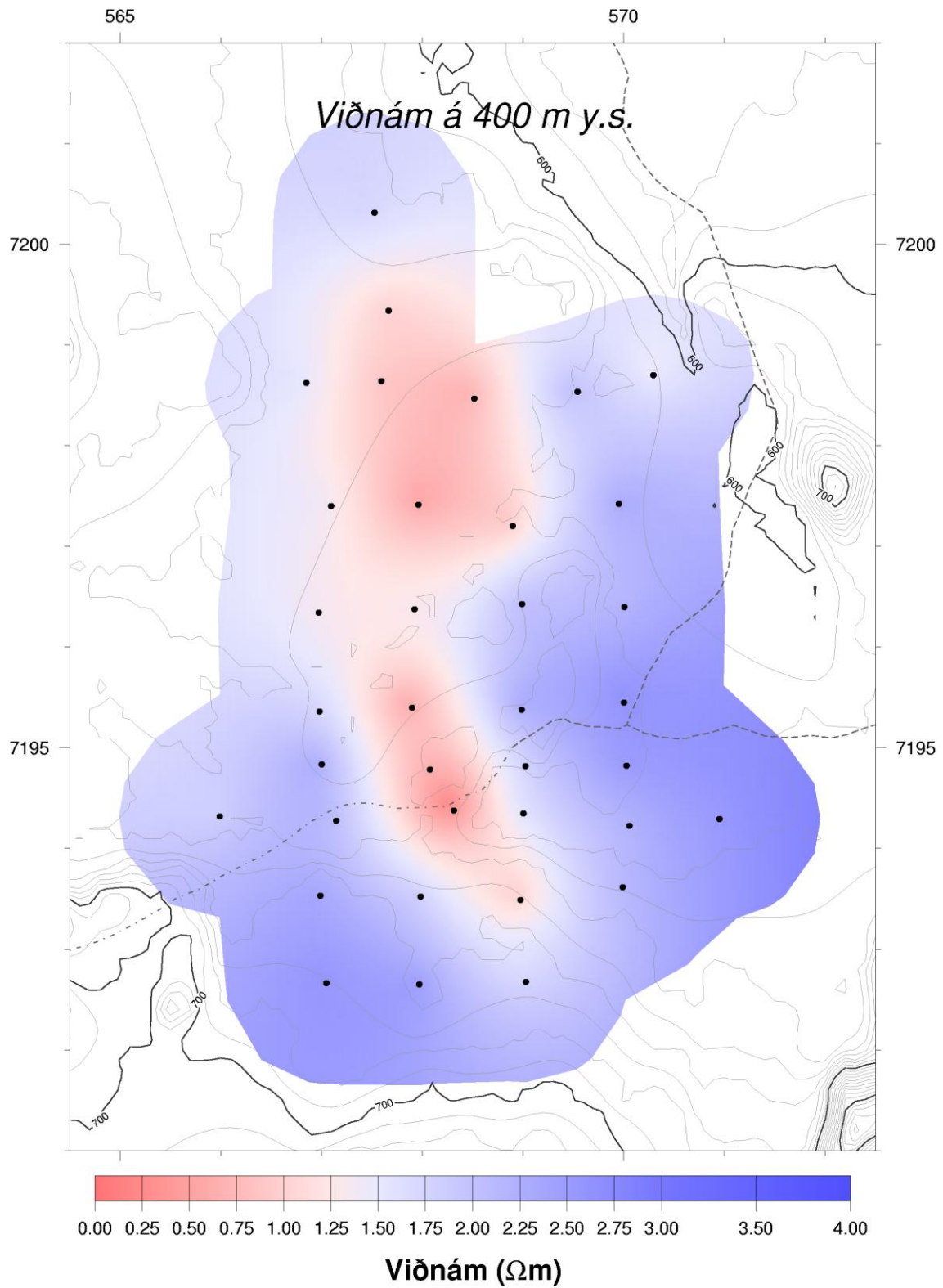
Mynd 23. Viðnámskort á 550 m y.s.



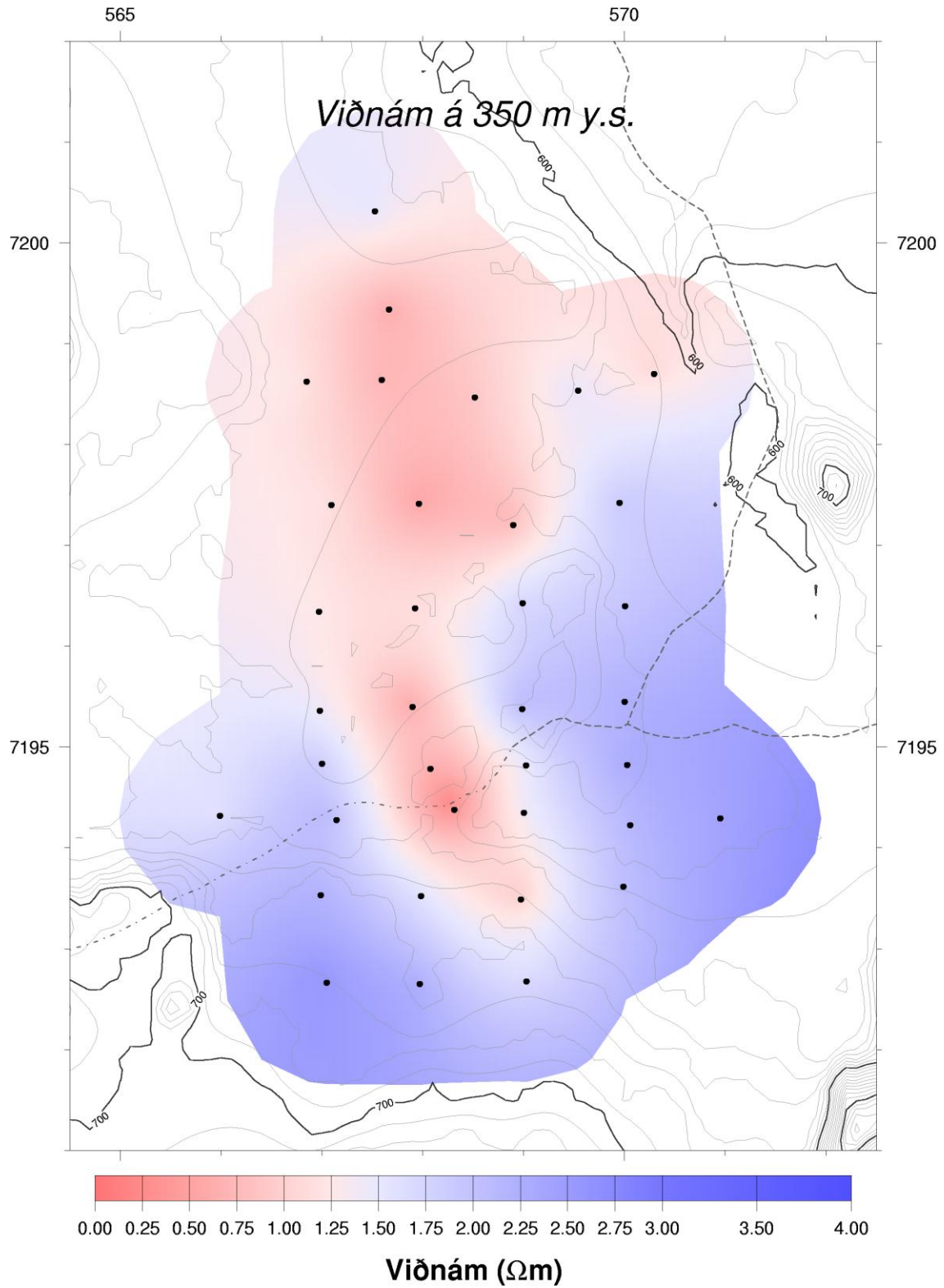
Mynd 24. Viðnámskort á 500 m y.s.



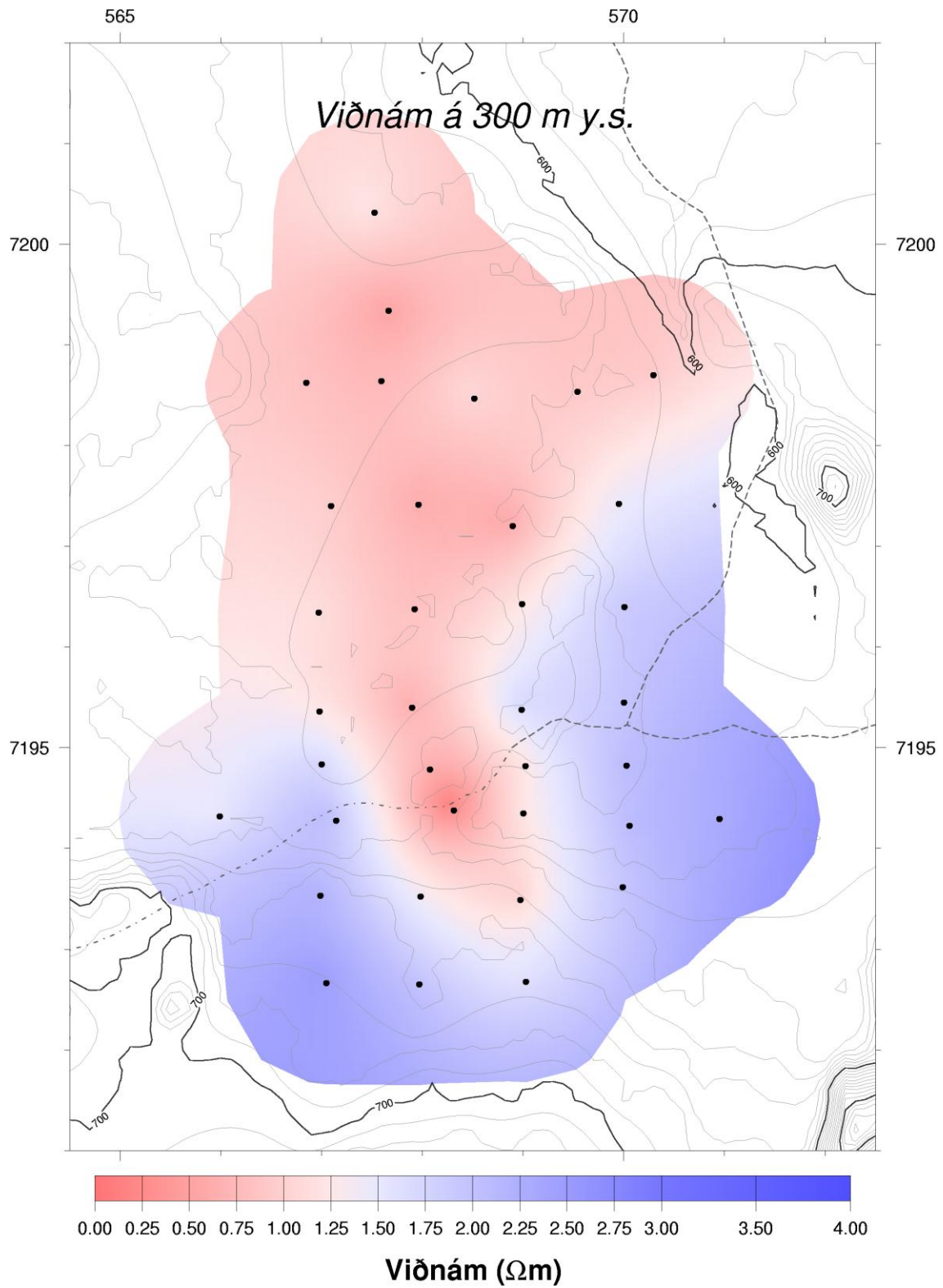
Mynd 25. Viðnámskort á 450 m y.s.



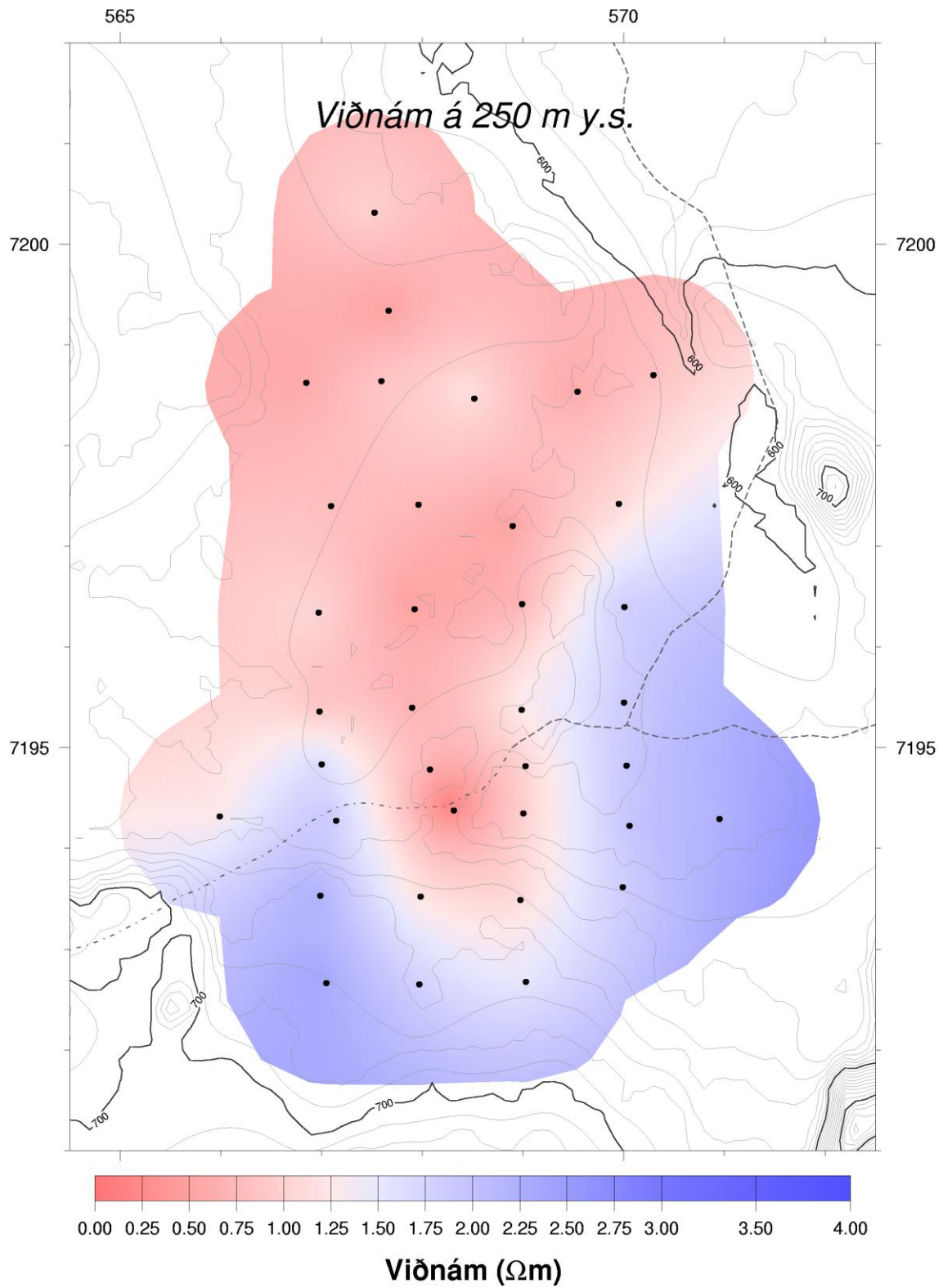
Mynd 26. Viðnámskort á 400 m y.s.



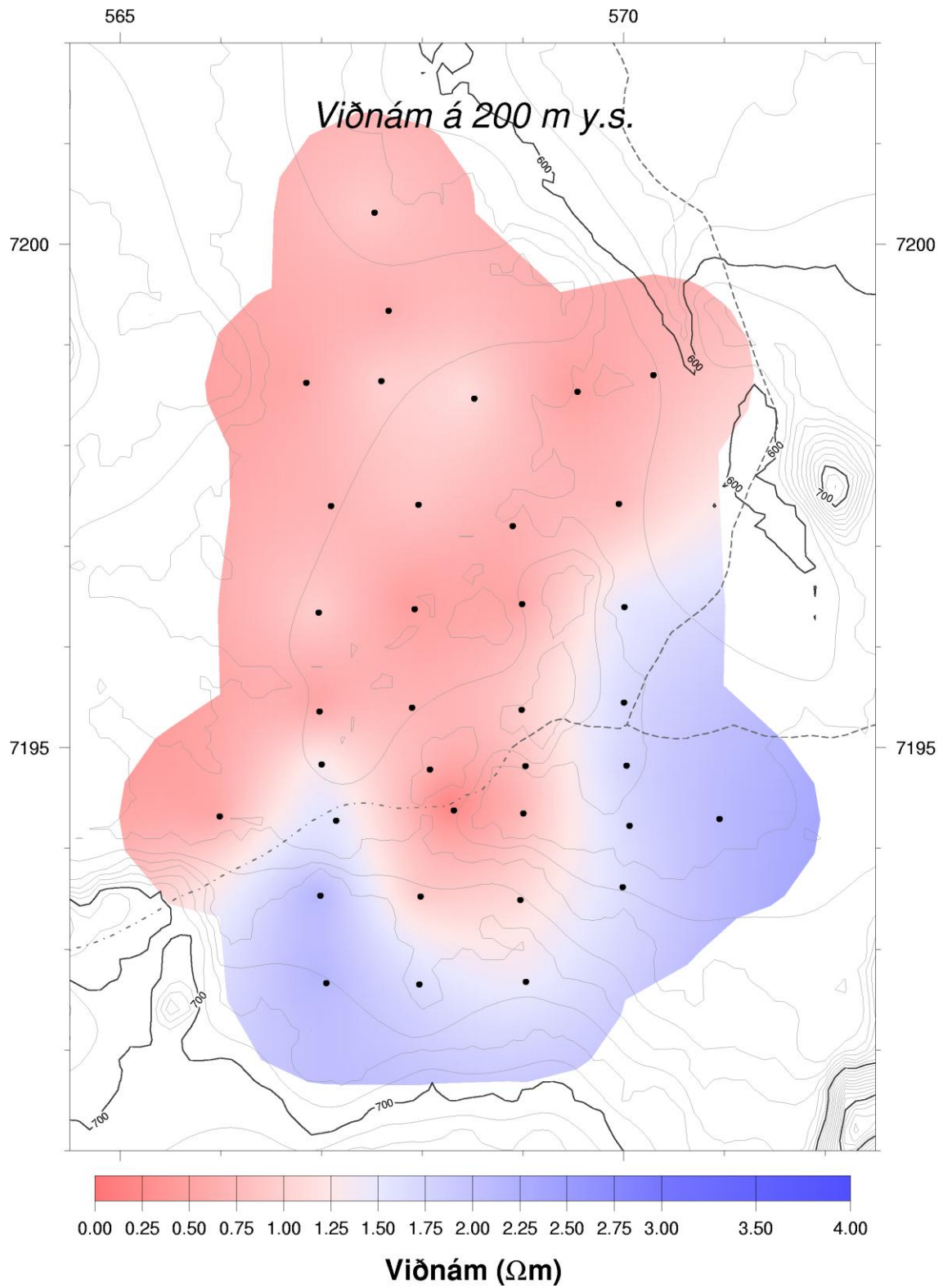
Mynd 27. Viðnámskort á 350 m y.s.



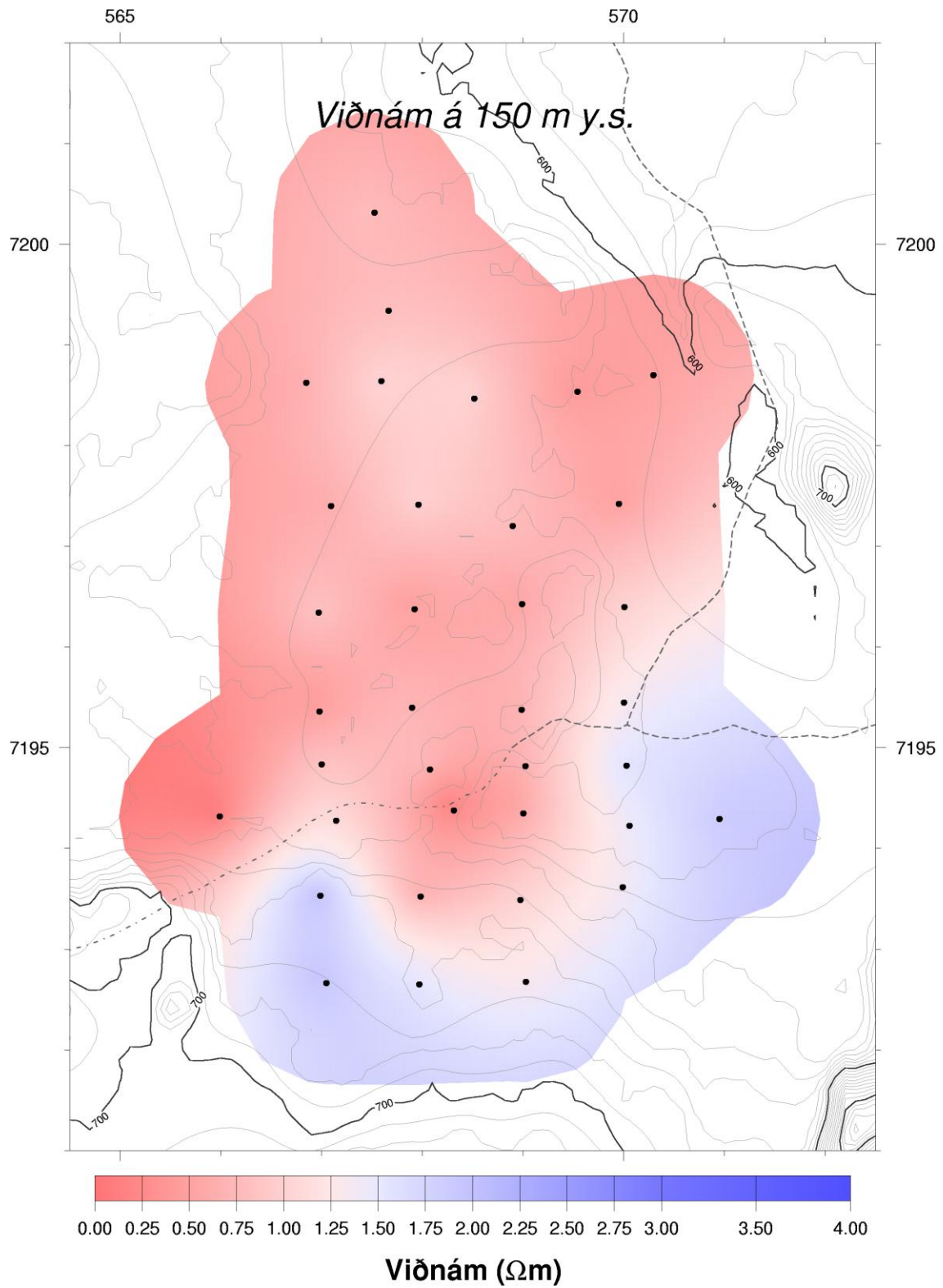
Mynd 28. Viðnámskort á 300 m y.s.



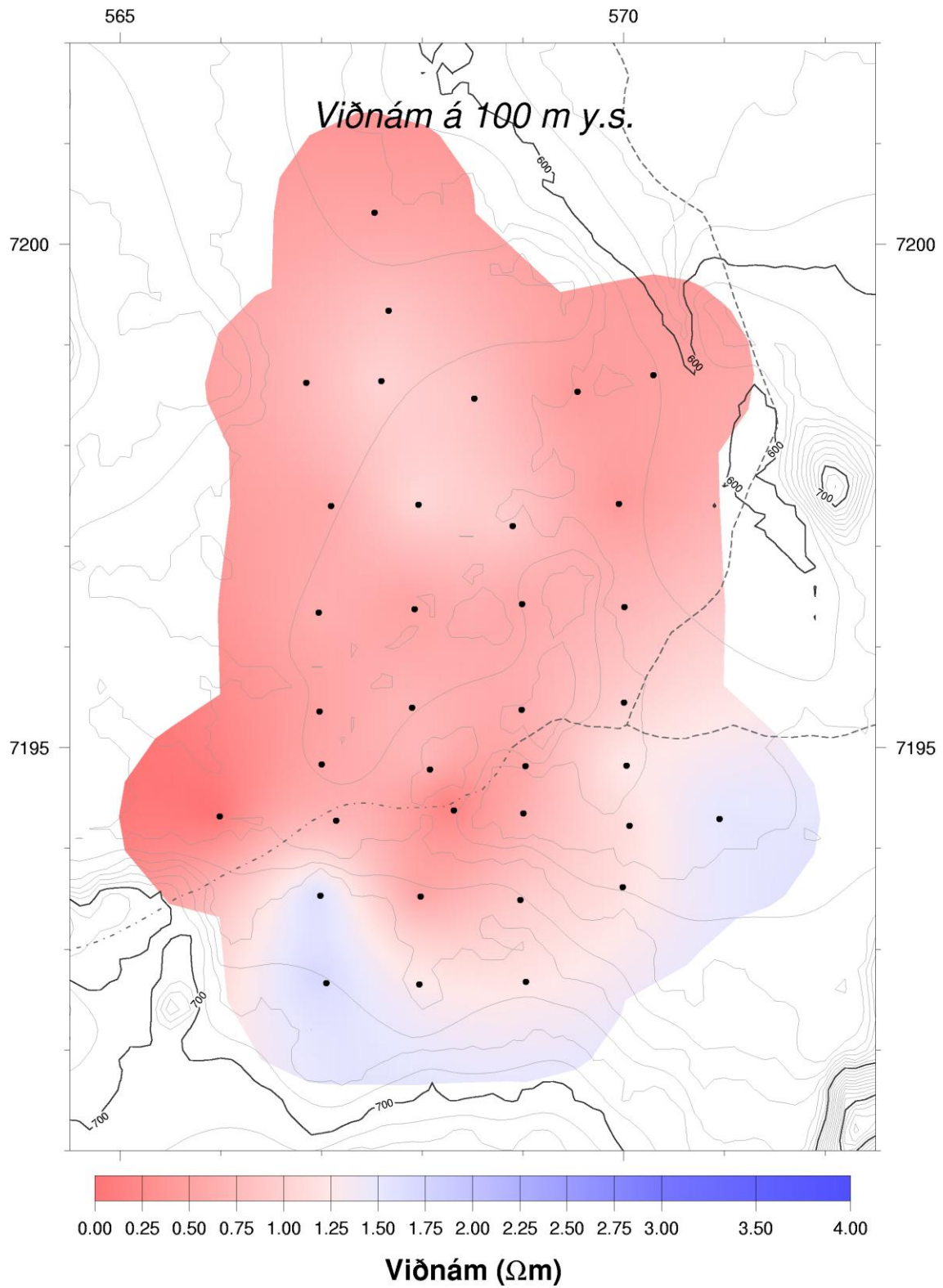
Mynd 29. Viðnámskort á 250 m y.s.



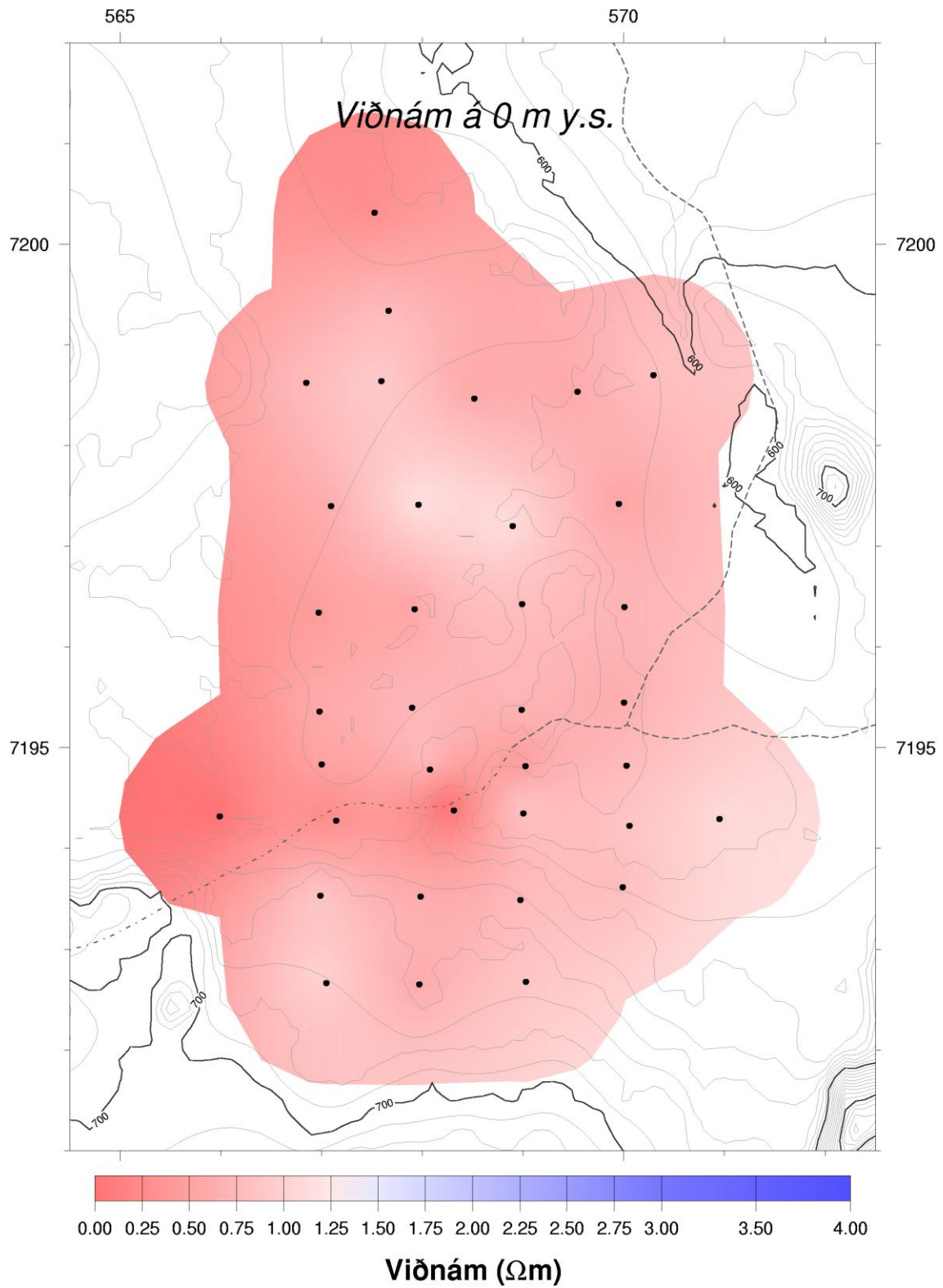
Mynd 30. Viðnámskort á 200 m y.s.



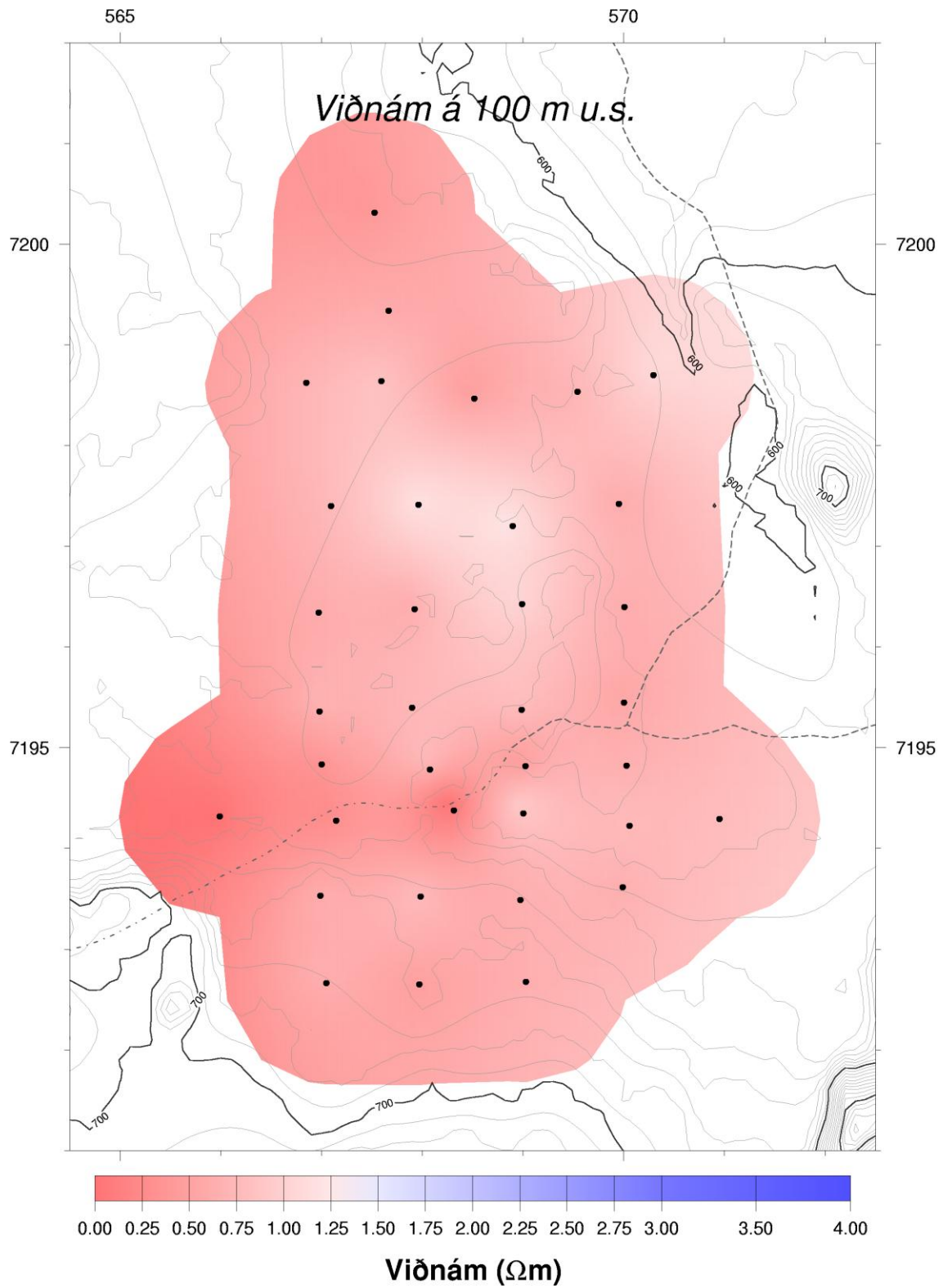
Mynd 31. Viðnámskort á 150 m y.s.



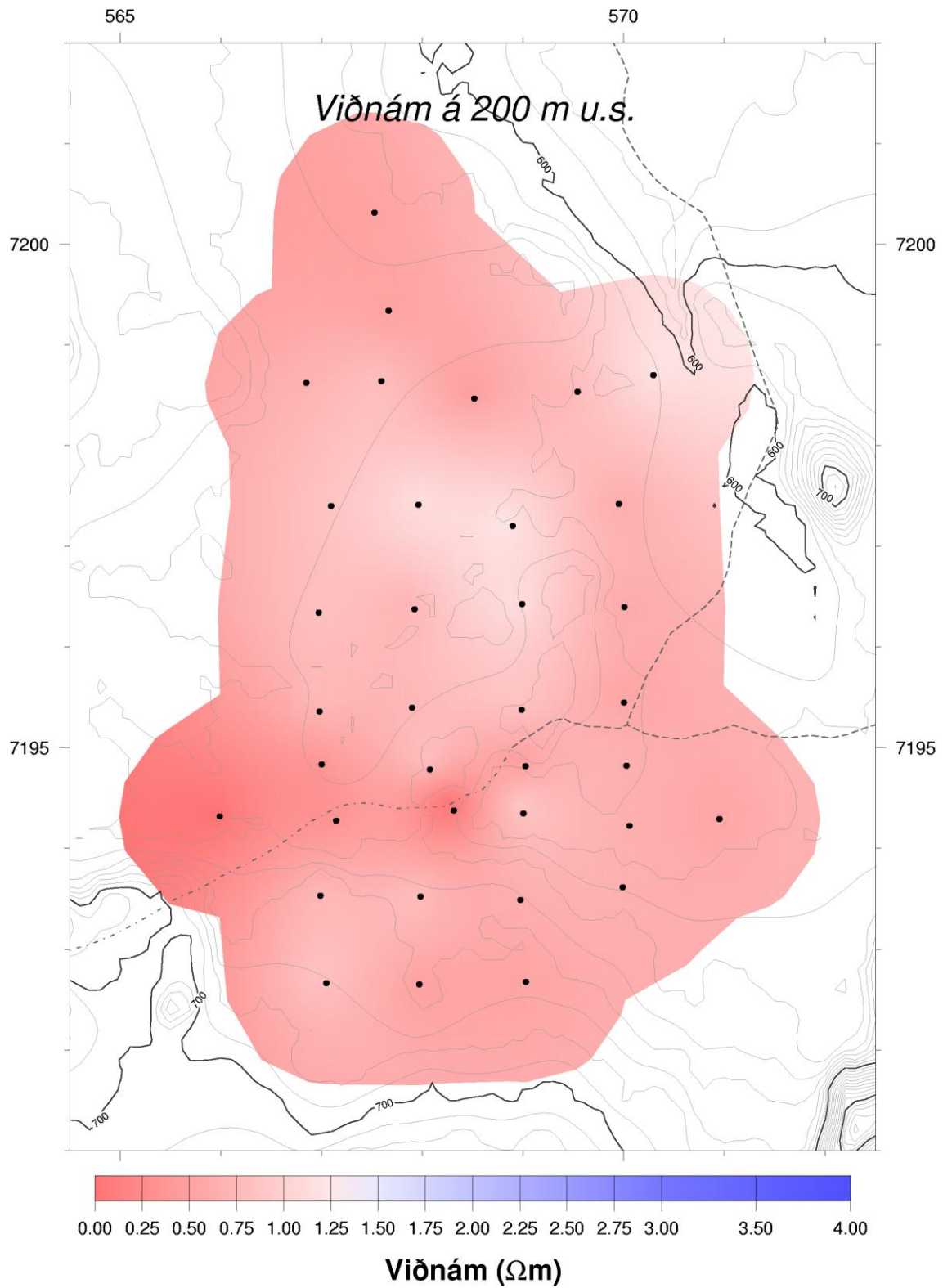
Mynd 32. Viðnámskort á 100 m y.s.



Mynd 33. Viðnámskort við sjávarmál.



Mynd 34. Viðnámskort á 100 m u.s.



Mynd 35. Viðnámskort á 200 m u.s.

6 Samandregnar niðurstöður og umræða

Í TEM-viðnámsmælingum á Hveravöllum á Kili koma ekki fram dæmigerð einkenni viðnáms í háhitakerfi í efstu 800–1000 metrum undir yfirborði. Lágviðnámslag er á 400–700 metra dýpi undir öllu mælisvæðinu. Þetta lágviðnámslag nær eins djúpt og mælingarnar skynja með góðu móti. Þetta er ekki í takt við það sem búast má við í háhitakerfi þar sem lágviðnámskápa liggur utan yfir háviðnámskjarna, sem bendir til herra hitastigs en 240°C í jarðhitakerfinu. Þar sem sést í greinilegan háviðnámskjarna er lágviðnámskápan oft 100–200 metra að þykkt; oft þynnri yfir háviðnámskjarnanum og þykkari til jaðrana á 1000 metra dýpi.

Lágt viðnám nær til yfirborðs á tveimur svæðum, við Hveravelli í þröngri rás og hvelvist einnig upp undir Einbúa og Þegjandavolgrur. Uppstreymissprungan er staðfest með þrívíðum líkanreikningum. Hún er um 2,5 kílómetrar að lengd með stefnu nálægt 28° vestan við N. Uppstreymið er trúlegast mest undir aðalhverasvæðinu við Hveravelli.

Þetta svipmót í viðnámi er þekkt frá einu öðru háhitasvæði, sem rannsakað hefur verið á Íslandi, þ.e.a.s. Geysissvæði (Ragna Karlsdóttir, 2004). Þessi tvö svæði eru um margt lík. Hverir eru fjölbreyttir að gerð, gufu-, leir-, og vatnshverir, laugar og volgrur. Goshverir gjósa óreglulegum smágosum. Útfellingar eru áberandi, hverahrúður og kísilbungur. Það sem er einkum líkt með þessum svæðum að ytri ásýnd eru vatnshverirnir, suðuhverirnir og útfellingarnar. Viðnámsmynd Geysissvæðisins er lík og Hveravalla, en við Geysi er uppstreymisrás um 3 km að lengd, lágt viðnám fyrir neðan og ekki sýnileg merki um háviðnámskjarna í efstu 1000 metrum. Efnahitamælar benda til 240–250°C í Geysissvæði (Susan Pasvanoglu, 1998).

Efnahiti í hverum í athugun Magnúsar Ólafssonar (Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005) er á bilinu 230–265°C fyrir kvarts og 130–190°C fyrir Na/K. Þegar þessar niðurstöður eru settar inn í kísil-vermi blandlíkan, er leitt líkum að því að hiti í jarðhitakerfinu á Hveravöllum sé á bilinu 255–285°C. Sú staðreynd að háviðnámskjarni er ekki til staðar bendir til þess að þann hita sé að finna neðan 1 km dýpis ef hann á annað borð er til staðar. Na/K efnahitamælar benda til 130–190°C hita sem samræmist vel niðurstöðum viðnámsmælinganna. Kísilhitamælar gera ráð fyrir jafnvægi við kvartz ef um háhitakerfi er að ræða, en jafnvægi við kalsedon í lághitakerfum. Ef gert er ráð fyrir jafnvægi við kalsedon í útreikningum á Hveravöllum, fengist lægri efnahiti og í betra samræmi við N/Kniðurstöður efnahitamælis og einnig viðnámsmælinganna. Í ljósi þessa er allt eins líklegt að Hveravellir séu fremur „sjóðandi“ lághitakerfi en raunverulegt háhitasvæði.

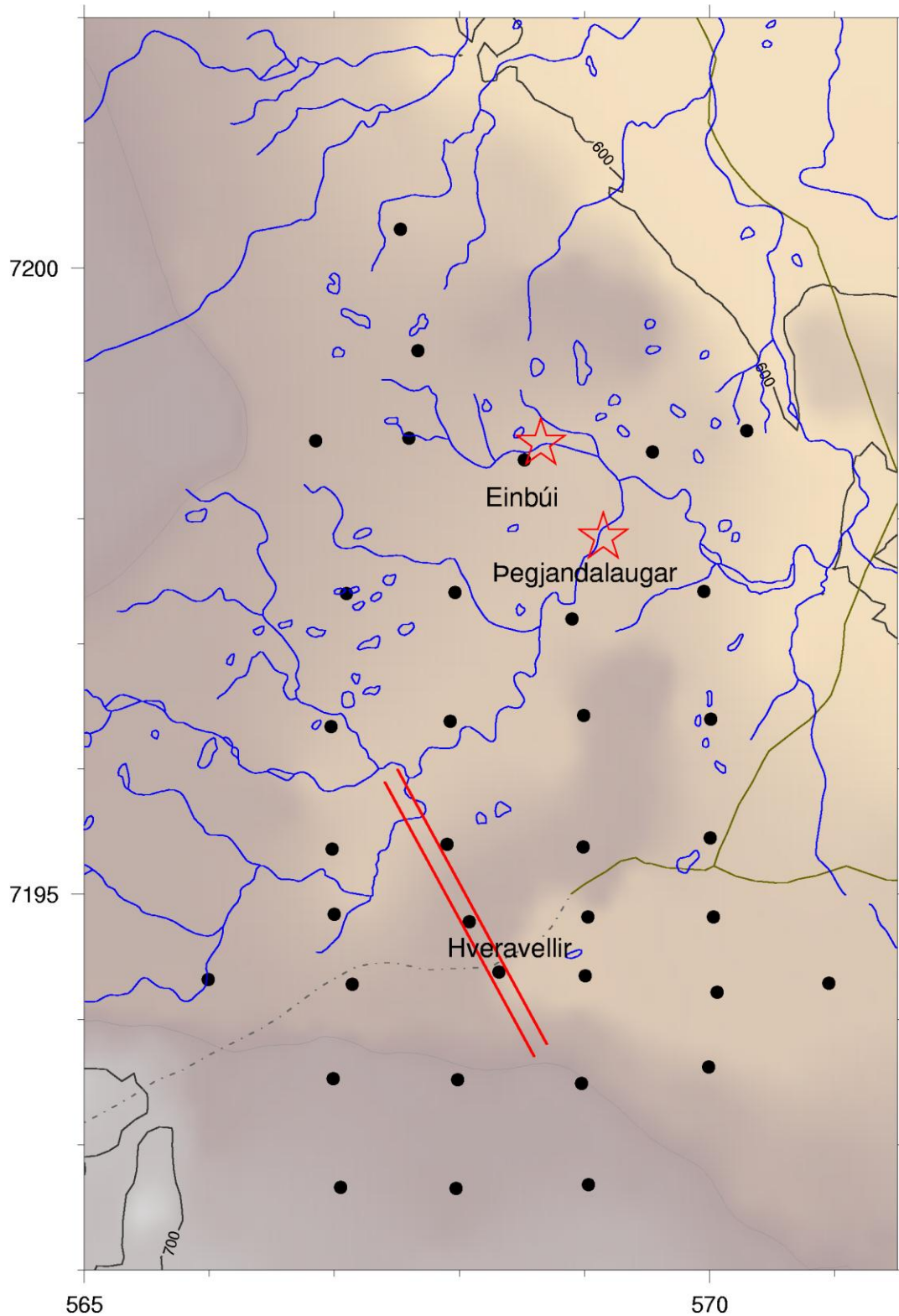
Æskilegt væri að skoða svæðið með viðnámsmælingum (MT-mælingum), sem skynja dýpra til þess að kanna hvort háviðnámskjarni finnist á meira dýpi. Einnig er ástæða til að kanna útmörk heitavatnskerfisins ofan 1000 metra betur með TEM-mælingum.

Helstu niðurstöður eru í stuttu máli:

- Uppstreymi jarðhitavatns á Hveravöllum er um sprungu með nálægt N28°V stefnu um 2,5 km að lengd. Mesta uppstreymið er undir aðalhverasvæðinu á Hveravöllum.
- Lágviðnám í yfirborði er við Einbúa og bendir greinilega til uppstreymis þar. Þetta lágviðnám breiðir úr sér með dýpi og tengist jarðhitastöðum sem kenndir eru við Þegjandavolgrur.
- Lágviðnámslag er neðan 400–700 metra dýpis á mælisvæðinu, grynst er á það á norðvestanverðu svæðinu og dýpkar á það til suðausturs.
- Engin merki eru um háviðnámskjarna í efstu 800–1000 metrum, eða eins djúpt og mælingarnar skynja með góðu móti. Þetta getur hins vegar þýtt að hitinn í kerfinu sé lægri en 240°C ofan 1 km dýpis.
- Samanburður á niðurstöðum viðnámsmælinganna og efnahitamæla gefur til kynna að Hveravellir séu hugsanlega sjóðandi lágheatasvæði fremur en háheatasvæði.
- Hveravellir líkist Geysissvæðinu, bæði að ytri ásýnd og niðurstöðum viðnámsmælinga og efnahitamæla.
- Mælingarnar 2005 þekja ekki nægjanlega stórt svæði til að afmarka jarðheatasvæðið á Hveravöllum. Þær sýna tvö uppstreymissvæði en hvergi dýpkun á lágviðnámið meira en á 700 metra dýpi suðaustast á mælisvæðinu.
- Ekki sér fyrir endann á jarðheatasvæðinu til norðurs og norðvesturs. Þarna er lágviðnámið aðeins á um 400 metra dýpi yfirleitt og í yfirborði við Einbúa. Mælt er því með að gerðar verði frekari TEM-mælingar til að afmarka útmörk heatavatnskerfisins ofan 1000 metra dýpis.
- Mælt er með því að beita MT-mælingum á Hveravöllum til að kanna hvort einkenni háhitakerfis sé neðan 1 km dýpis.

Mynd 36 sýnir legu uppstreymissprungunnar á Hveravöllum.

Á mynd 37 má sjá hverinn meyjarauga sem er afar sérstæður.



Mynd 36. Staðsetning uppstreymissprungu á Hveravöllum. Rauðu línurnar afmarka sprunguna. Rauðu stjörnurnar sýna jarðhitastaðina Pegjandalaugar og Einbúa.



Mynd 37. Meyjarauga á Hveravöllum. (Ljósmynd Magnús Ólafsson).

7 Heimildir

Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005. *Hveravellir. Könnun og kortlagning háhitasvæðisins*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR – 2005/014. 44 s. + kort.

Helgi Torfason, 1997. *Jarðhitarannsóknir á Hveravöllum 1996*. Orkustofnun, OS – 97025. 85 s. + kort.

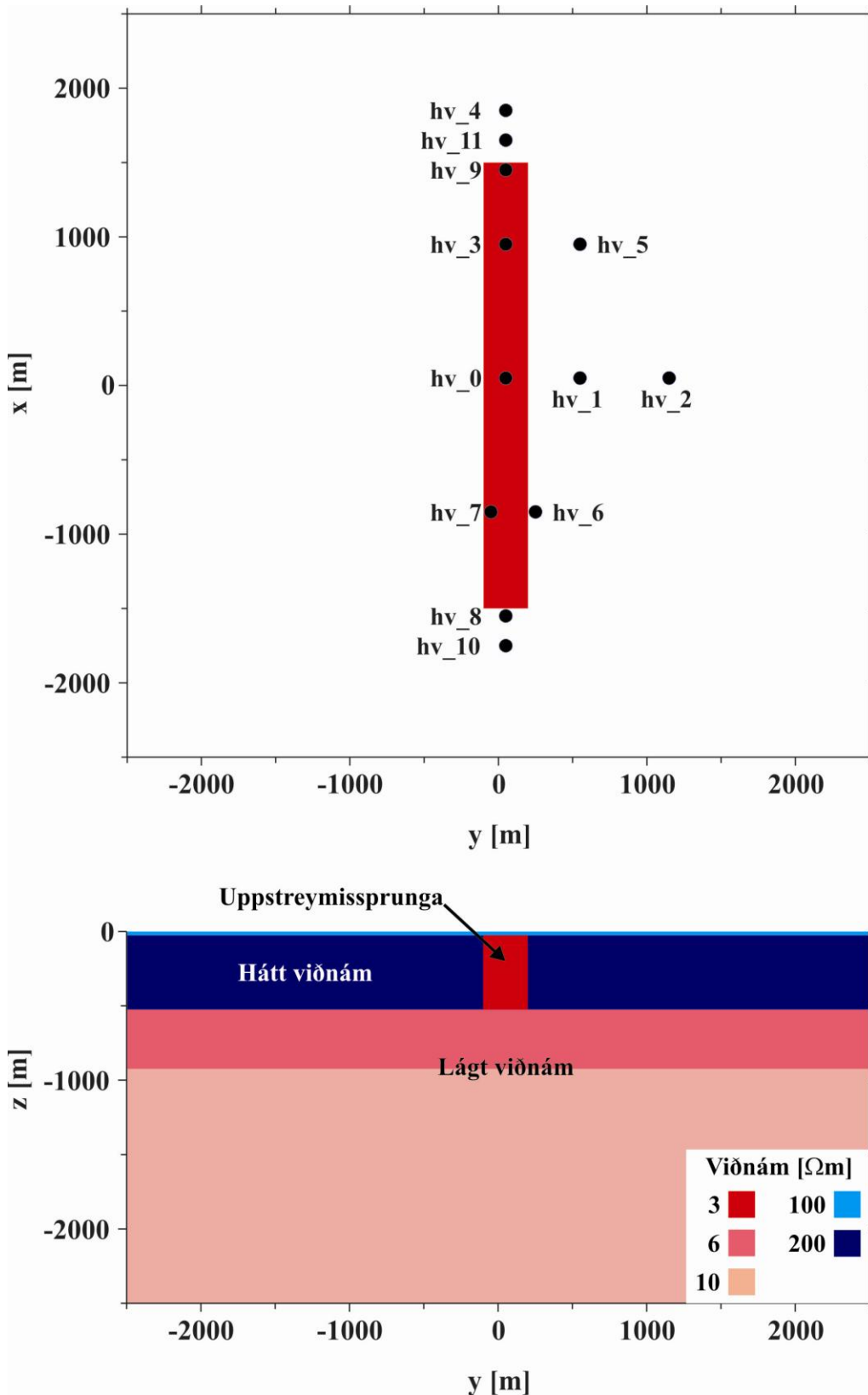
Knútur Árnason, Ragna Karlsdóttir, Hjálmar Eysteinnsson, Ólafur G. Flóvenz og Steinar Þór Guðlaugsson, 2000. *The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland*. Erindi flutt á ráðstefnu IGA, World Geothermal Congress í Japan 2000. Birt í ráðstefnuriti.

Ólafur G. Flóvenz, Erik Spangenberg, Johannes Kulenkamff, Knútur Árnason, Ragna Karlsdóttir og Ernst Huenges, 2005. *The role of electrical interface conduction in geothermal exploration*. Erindi flutt á ráðstefnu IGA, World Geothermal Congress, í Tyrklandi 2005. Birt í ráðstefnuriti.

Ragna Karlsdóttir, 2004. *TEM-mælingar á Geysissvæði*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR – 2004/029. 68 s.

Susan Pasvanoglu, 1998. *Geochemical study of the Geysir geothermal field in Haukadalur, S-Iceland*. In: Geothermal training in Iceland 1998. Reports of the United Nations University Geothermal Training Programme in 1998. (Ed. by Lúðvík S. Georgsson) s. 281-318.

Viðauki 1: Þrívítt líkan og staðsetning mælinga í líkani



Viðauki 2: Mæliferlar og túlkun þeirra

