

Ragna Karlsdóttir
Ólafur G. Flóvenz

TEM-mælingar í Öxarfirði 2004

Unnið fyrir Íslenska orku ehf.

ÍSOR-2005/020

Júní 2005

Skýrsla nr. ÍSOR-2005/020	Dags. Júní 2005	Dreifing <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill TEM-mælingar í Öxarfirði 2004	Upplag 20	Fjöldi síðna 65
	Höfundar Ragna Karlsdóttir Ólafur G. Flóvenz	Verkefnisstjóri Ragna Karlsdóttir
Gerð skýrslu / Verkstig Jarðeðlisfræðilegar mælingar á jarðhitasvæði	Verknúmer 8-630674	
Unnið fyrir Íslenska orku ehf.		
Samvinnuaðilar		
<p>Útdráttur</p> <p>Greint er frá niðurstöðum um 60 TEM viðnámsmælinga í Öxarfirði. Þær voru gerðar í kjölfar þess að tvær djúpar borholur, BA-02 og BA-03, sýndu aðrar niðurstöður en vænta mátti út frá eldri og strjálri viðnámsmælingum með Schlumbergeraðferð.</p> <p>Viðnámsmælingarnar sýna mjög flókna mynd af eðlisviðnámi í Öxarfirði þar sem margir þættir valda breytingum í viðnámi frá einum stað til annars og er erfitt að greina hvað veldur í hverju tilviki. Þannig koma mörk setlaga og basalts fram sem hækkun í viðnámi. Um setlöggin í berggrunninum leikur vatn, sem ýmist er heitt vatn með lágu viðnámi eða kalt með háu. Jafnframt er það sumstaðar sjávarblandað og því hærri sem seltan er því lægra verður viðnámið. Það er því erfitt að greina að hvort viðnámslægð innan setlaganna stafar af aukinn seltu eða hærri hita. Dæmigerður háviðnámskjarni sést hvergi öndvert því sem túlkun eldri mælinga gaf til kynna. Það bendir til þess að ofan 800m dýpis sé hvergi að finna verulega útbreitt svæði þar sem hiti hafi náð yfir 240°C. Í heildina tekið fæst gott samræmi milli niðurstöðu TEM viðnámsmælinga og mælinga í borholum BA-01, BA-02, BA-03, ÆR-04 og LI-01.</p> <p>Ljóst er að jarðhitinn í Öxarfirði getur ekki talist til hefðbundinna háhitakerfa en hefur heldur ekki helstu einkenni lághitakerfa. Hann er því eins konar millistig milli kerfa, sem best má lýsa sem litlum staðbundum háhitablettum þar sem hiti nær e.t.v. 200°C en er vart mikið þar yfir. Kringum þessa háhitabletti eru síðan svæði sem bera ýmis einkenni vatnsmikilla lághitasvæða.</p> <p>Telja má nær öruggt að jarðhitasvæðið við Bakkahlaup sé fremur kalt af háhitasvæði að vera og lítið að flatarmáli. Ef túlkun TEM viðnámsmælinganna er rétt þá er meginuppstreymið á afmörkuðum stað rétt vestan og sunnan Bakkahlaups til móts við holu BA-01. Eflaust má vinna þar talsvert magn af allt að 200°C vökva. Hafa ber í huga að enn er alllangt milli mælinga á þessum slóðum. Því er mælt með því að bætt verði við 6-8 TEM-mælingum við fyrirhugaðan borstað til að fá nákvæmari upplýsingar fyrir staðsetningu borholu þar.</p>		
Lykilorð Jarðhiti, jarðhitasvæði, TEM-viðnámsmælingar, viðnámsnið, viðnámskort, viðnámslíkan, Öxarfjörður	ISBN-númer	
	Undirskrift verkefnisstjóra	
	Yfirfarið af ÓGF	

EFNISYFIRLIT

1	INNGANGUR.....	6
2	VIÐNÁM Í BERGI	8
3	MÆLINGAR 2003 OG 2004	9
4	NIÐURSTÖÐUR TEM-VIÐNÁMSMÆLINGANNA.....	12
4.1	Viðnámsnið	12
4.2	Jafnviðnámskort	16
4.3	Hvað sýnir viðnámsmyndin ?.....	17
5	SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR.....	19
6	FRAMHALD.....	20
7	HEIMILDIR	21
	VIÐAUKI I: Hitamælingar í borholu BA-1, BA-2, BA-3, ÆR-4 og LI-1	22
	VIÐAUKI II: Viðnámsnið S1-S21	27
	VIÐAUKI III: Viðnámskort	37
	VIÐAUKI IV: Mæliferlar og túlkun þeirra	53

MYNDIR

Mynd 1.	Mælingamennirnir Sæmundur Ari og Þorbjörn að störfum sumarið 2004.....	9
Mynd 2.	Staðsetning viðnámsmælinga.....	10
Mynd 3.	Lega viðnámsniða.....	11
Mynd 4.	<i>Viðnámsnið S14</i>	15
Mynd 5.	<i>Viðnámsnið S15</i>	15
Mynd 6.	<i>Viðnámsnið S21</i>	16
Mynd 7.	Viðnám á 800 m u.s. og uppstreymisrásir samkvæmt túlkun TEM-viðnámsmælinganna.....	18

1 INNGANGUR

Íslensk orka hefur látið bora tvær djúpar holur í Öxarfirði, holu BA-2 árið 1999 og holu BA-3 árið 2000. Staðsetning holnanna var byggð að verulegu leyti á niðurstöðum viðnámsmælinga frá áttunda og níunda áratugnum (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1993). Þær mælingar voru gerðar með Schlumberger-tækni sem er eldri og lakari tækni en beitt er í dag auk þess sem þær voru fremur strjálar. Engu að síður var það mat Rannsóknasviðs Orkustofnunar, forvera ÍSOR, að þær nægðu sem forsenda fyrir borun fyrstu rannsóknarholu. Mælingarnar sýna útbreitt lágviðnámsvæði í jörðu sem bendir ótvírætt til jarðhita. Undir miðju lágviðnámsvæðinu mældist kjarni með herra viðnámi sem reynsla hefur sýnt að stafar yfirleitt, en ekki alltaf, af steindum í berginu sem myndast fyrst þegar hiti hefur náð 230–240°C. Á þeim háhitasvæðum íslenskum sem könnuð hafa verið umlykur lágviðnámið háviðnámskjarnann eins og kápa. Það vakti því nokkra undrun að í Öxarfirði var lágviðnámskápan ekki alls staðar yfir háviðnámskjarnanum. Var sett fram sú tilgáta að staðbundin kólnun frá austri í háhitakerfinu breytti viðnámsmyndinni á þennan hátt.

Yfirborð háviðnámskjarnans ætti að greina svæði í jörðu þar sem hiti hefur að öllum líkindum náð 230–240°C en segir ekki til um það hvort sá hiti er enn til staðar. Í Öxarfirði er borun eina færa leiðin til að skera úr um þetta. Háviðnámskjarnar þurfa þó ekki alltaf að þýða að hiti hafi náð 230–240°C, aðrar skýringar eins og kólnun með dýpi eða breytingar í berggerð eða seltu geta haft svipuð áhrif. Rannsóknir höfðu sýnt að þykk setlög hylja berggrunninn í Öxarfirði og því mætti ef til vill skýra viðnámsmyndina þannig að lága viðnámið táknaði setlög en háa undirliggjandi viðnámið basaltberggrunninn. Til að skera úr um þetta voru gerðar allumfangsmiklar bylgjubrotsmælingar og þyngdarmælingar. Þær bentu til þess að ekki var unnt að skýra viðnáms-hækkunina með mörkum setlaga og berggrunns (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1993).

Efnagreiningar á gasi úr gufuaugum koma að mestu gagni til að meta hita djúpt í háhitakerfum en slík gufuaugu er því miður ekki að finna í Öxarfirði. Hins vegar lágu fyrir efnagreiningar á kísli í jarðhitavatni þaðan sem bentu til um 200–230°C hita í jarðhitakerfinu ef miðað er við að kísillinn í vatninu sé í jafnvægi við kvars í undirliggjandi háhitakerfi. Ef hins vegar gert er ráð fyrir að kísillinn í jarðhitavatninu sé í jafnvægi við kalsedón, eins og gerist í lághitakerfum, fengist talsvert lægri hiti. Efnagreiningar á kísli skera því ekki endilega úr um hvort um háhita- eða lághitakerfi er að ræða.

Á sínum tíma var deilt um hvort jarðhitasvæðið í Öxarfirði væri háhita- eða lághitasvæði. Háhitasvæði er skilgreint þannig að hiti í þeim nær a.m.k. 200°C á 1 km dýpi en lághitasvæði hafa hita undir 150°C á sama dýpi. Því til viðbótar eru kólnandi kvikuinnskot talin varmagjafi háhitasvæðanna meðan lághitasvæðin fá varma sinn úr varmastraumi jarðar þar sem kvika kemur ekki beint við sögu. Fá jarðhitakerfi á Íslandi lenda á hitabilinu 150–200°C á 1 km dýpi og eru þau fyrst og fremst kólnandi háhitasvæði eða afrennsli frá nærliggjandi háhitasvæðum. Eftir að hafa borið saman niðurstöður allra ofangreindra rannsókna að viðbætti þeirri vitneskju að í Kröflueldum 1975–1984 hlupu kvikuinnskot ítrekað frá kvikuþrónni undir Kröflu og norður í Öxarfjörð var full ástæða til að ætla að háhitasvæði væri undir söndum Öxarfjarðar.

Hola BA-2 varð 1962 m djúp og boruð í jaðri þess svæðis þar sem vænta mátti um eða yfir 230°C hita samkvæmt viðnámsmælingum. Sú hola fór gegnum tæplega 200°C heitt vatnskerfi á 300–500m dýpi og var það kerfi fóðrað af enda búist við heitara vatni neðar. Raunin varð önnur; holan kólnaði fyrir neðan 500 m og var köldust í botni, 115–120 °C (sjá viðauka I). Steindir bergsins sýna hins vegar ótvírætt að berghitinn hefur

einhvern tíma verið um eða yfir 250°C en síðan þá hefur svæðið kólnað. Jafnframt kom í ljós að setlöggin voru þarna um 370 metra þykk og basaltgrunnur undir. Það var því engin mótsögn milli niðurstaða viðnámsmælinganna við holu BA-2 og þeirra upplýsinga sem fengust við borunina. Meginniðurstaða borunar holu BA-2 var sú að dýpri hluti jarðlaganna, sem hola er boruð í, hefur kólnað en jafnframt er ljóst að sá tæplega 200°C hiti sem fannst ofan 500 m dýpis er vegna lárétts rennslis háhitavatns frá uppstreymi í nokkurri fjarlægð. Það uppstreymi hlýtur að vera um eða yfir 200°C vegna þeirrar kælingar sem óhjákvæmilega er í láréttu rennslis (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl., 1999; Bjarni Richter o.fl., 1999; Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl., 1999).

Að þessum niðurstöðum fengnum var afráðið að bora holu BA-3 í mitt lágviðnámsfrávikið en talsvert norðar. Tilgangurinn var að bora í gegnum lága viðnámið og ofan í háviðnámskjarnann. Með því að bora þarna átti að ganga úr skugga um hvort jarðhitasvæðið væri einnig kælt þarna norður frá. Niðurstöðurnar komu á óvart, holan hitti á gjöfular vatnsæðar sem voru aðeins um 80°C heitar og steindasamsetning bergsins gaf ekki til kynna að hiti hafi þar nokkru sinni náð 230°C (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl., 2000). Þegar þessar niðurstöður lágu fyrir var frekari rannsóknum á gögnum sem aflað var með borun BA-3 hætt. Engar hitamælingar hafa verið gerðar í holunni síðan örskömmu eftir borlok þegar holan hafði augljóslega ekki náð að jafna sig eftir borunina. Þó er ljóst að hitinn í botni á um 700 m dýpi er varla yfir 100°C. Einnig er líklegt að hiti sé um eða yfir 90°C á 420 m dýpi og hugsanlega kólnar eitthvað þar fyrir neðan. Skýringin á háviðnáminu var því ekki hár hiti, hvorki fyrr á tíð né nú. Hugsanlega er skýringarinnar að leita í mismun í berggerð, þ.e. háviðnámið stafi af fremur þéttum basalhraunum undir þykkum setlögum.

Að lokinni borun BA-2 og BA-3 blasti sú mynd við að jarðhitasvæðið í Öxarfirði væri að mestu leyti afar gjöflugt jarðhitasvæði með 80-200°C hita. Á litlum hluta þess, sunnarlega, er þó mjög líklegt að hiti geti verið um eða yfir 200°C. Norður við Skógarlón er önnur svipuð hitamiðja með 130–170°C hita. Talið er líklegt í báðum þessum tilvikum að háhitauppstreymi fylgi misgengjum sem liggja um svæðið og tilheyri brotakerfi Kröflu. Með því að bora um 700m holu nærri holu BA-2, nánast við holu BA-1 (sem er einungis 80 m djúp), ætti að vera auðvelt að ná í um eða yfir 200°C heitt vatn á 300–500m dýpi úr lárretta rennslinu sem hola BA-2 fór í gegnum.

Í ljósi þeirra niðurstaðna sem höfðu fengist var um tvo meginkosti að ræða við framhald leitar að háhita í Öxarfirði. Annar var sá að bora um 700 m holu ofan í lárretta rennslid nærri holu BA-2 og framleiða orku úr henni (Guðmundur Ómar Friðleifsson, 2001), hinn var sá beita hinni nýju gerð viðnámsmælinga (TEM) til að leita að uppstreymi þessa 200°C vatns sem fannst ofan 500 m dýpis í holu BA-2. Íslensk orka valdi seinni kostinn og sótti því um 8,7 Mkr. styrk úr Orkusjóði til að láta framkvæma viðnámsmælingar með TEM tækni á háhitasvæðinu í Öxarfirði og bera niðurstöðurnar saman við þau gögn sem boranir hafa leitt í ljós. Tilgangurinn var að afmarka háhitauppstreymið og leita skýringa á viðnámsgerð jarðlaganna í Öxarfirði. Veitti Orkusjóður 8,7 Mkr. styrk til verkefnisins. Fjallar þessi skýrsla um niðurstöður þeirra mælinga.

2 VIÐNÁM Í BERGI

Helstu áhrifavaldar í viðnámi bergs eru vökvainnihald þess, 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 viðnámið minnkar (rafleiðnin eykst) með hækkandi hita. Við lághituummyndun myndast leirsteindir (smektít) á öllum sprunguflötum í berginu og þessar leirsteindir eru mjög vel leiðandi, mun betur en vökvinn í berginu svo lengi sem selta hans er lág. Viðnámið í leirsteindunum er mjög hitaháð, það lækkar u.þ.b. tvöfalt hraðar með hita en viðnám í vökvnum sjálfum (Kulenkampff o.fl., 2003). Við u.þ.b. 230°C eyðist smektítið en við tekur önnur leirsteind, klórít, sem leiðir rafstraum heldur ver. Því kemur fram hátt viðnám þar sem mótin milli smektíts og klóríts eru í jarðlögum og það gerist við u.þ.b. 230°C. Því er oft hægt að kortleggja 230°C jafnhitaflötinn með viðnámsmælingum ef selta vökvans í berginu er fremur lág. Ef seltan er orðin það há að leiðni vökvans í berginu er meiri en 10000 μ S/cm hefur ummyndunin tiltölulega lítil áhrif á viðnám bergsins og viðnám þess ræðst mest af seltunni og hitanum (Ólafur G. Flóvenz o.fl. 2005). Þá er leiðni bergsins í réttu hlutfalli við leiðni vökvans í berginu. Ef leiðni vökvans er undir 5000 μ S/cm er viðnám bergsins nær óháð seltunni en er þá fyrst og fremst háð hita og ummyndunarstigi. Fyrir leiðnigildi þarna á milli gætir í senn áhrifa seltunnar og leirsteindanna.

Viðnámsmælingar á háhitasvæðum, einkum í ferskvatnskerfum, sýna vel ummyndun bergsins. Hefðbundin viðnámsmynd af háhitakerfi sýnir lágviðnámskápu umlykja háviðnámskjarna í miðju jarðhitakerfisins. Viðnámsmælingarnar spegla þannig ummyndun bergsins við hita. Við hitastig frá um það bil 150°C að 240°C eru zeólítar og smektít ráðandi steindir í berginu. 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 230°C hverfur smektít og klórít verður ráðandi. Klórít er hins vegar ekki jafnvel leiðandi og smektítið og veldur því að viðnámið hækkar fyrir ofan 230°C (Knútur Árnason o.fl., 2000).

Einn áhrifavaldur enn er til staðar í Öxarfirði, sem er sjórinn, en hann nær sumstaðar inn undir land. Hann hefur áhrif á alla viðnámsmyndina vegna mikillar seltu og þar með leiðni.

3 MÆLINGAR 2003 OG 2004

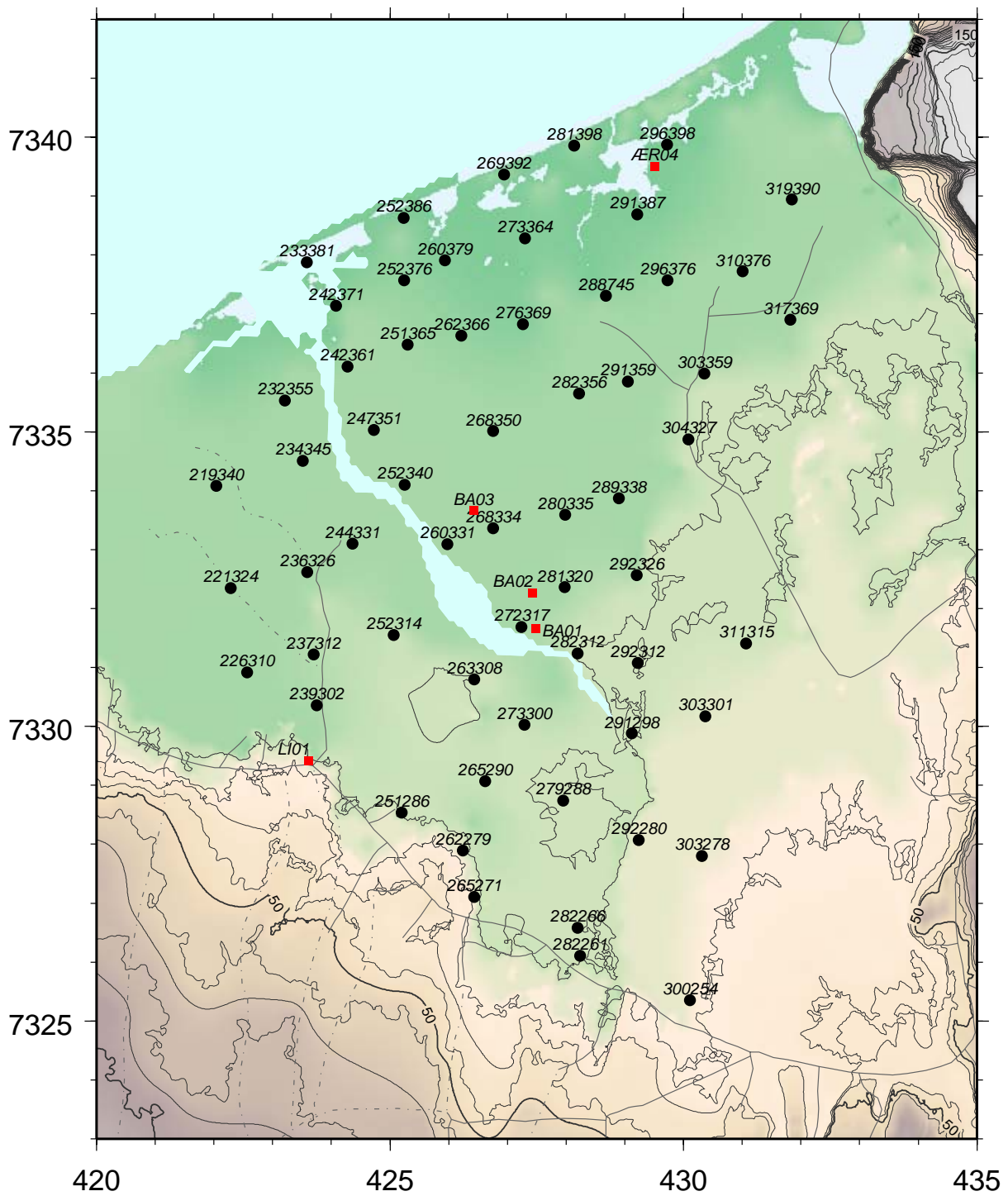
Mælt var í tveimur áföngum, sá fyrri var í október 2003 og sá síðari í júnímánuði 2004. Fyrri áfangann unnu Ingvar Þór Magnússon og Þorsteinn Egilsson, jarðeðlisfræðingar á ÍSOR. Yfirumsjón með seinna úthaldinu hafði Hjálmar Eysteinnsson, jarðeðlisfræðingur á ÍSOR. Með honum í mælingunum voru þeir Sæmundur Ari Halldórsson, Þorbjörn Guðmundsson og Sigurður Örn Stefánsson, háskólanemar og sumarmenn á ÍSOR (mynd 1). Alls urðu mælingarnar 60. Mynd 2 sýnir staðsetningu mælinganna.

Mælingarnar eru síðan túlkaðar hver fyrir sig. Notuð er svonefnd *Occam-inversion* þar sem túlkunarforritið fær val um að raða viðnámsgildum í fjölda láréttra laga og reikna út frá því líkani feril til að fella að raunverulegum mæliferli. Gert er ráð fyrir einvíðu líkani fyrir hverja mælingu þ.e. að viðnámsbreytingar verði aðeins með dýpi. Túlkunarforritin eru þróuð og staðfærð á ÍSOR.

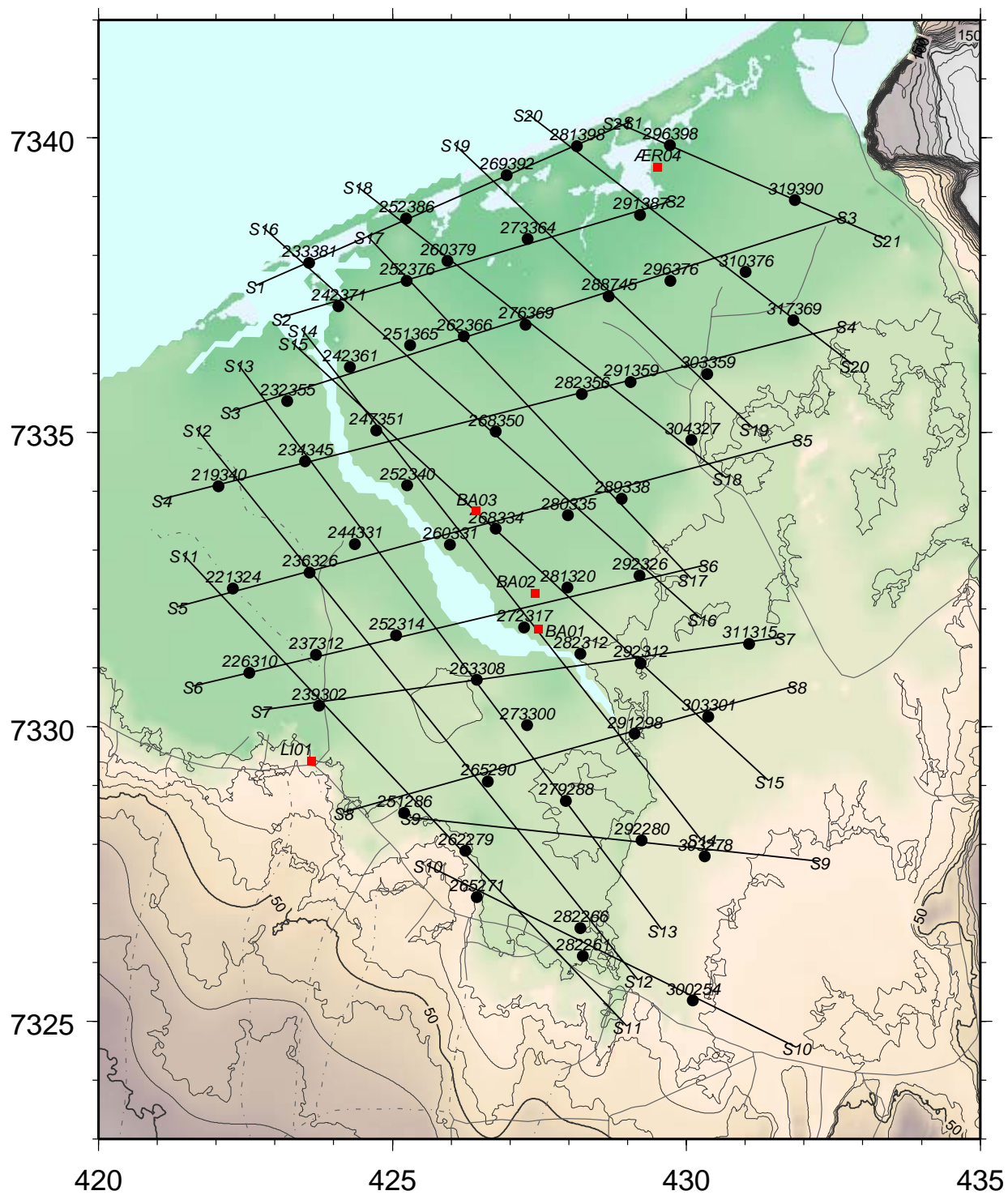
Að lokinni úrvinnslu hvorrar einstakrar mælingar var niðurstöðunum raðað upp á tvo vegu, annars vegar sem lóðrétt viðnámsnið og hins vegar sem kort sem sýna viðnám á tilteknu dýpi. Þar sem hver mæling um sig sýnir viðnámið undir mælistað þarf að brúa á milli mælinganna til að fá tvívíð snið og kort. Er til þess notaður teiknihugbúnaður byggður á GMT forritapakkanum. Viðnámsniðin eru öll í viðauka II og staðsetning þeirra sýnd á mynd 3. Viðnámskortin með 50 metra dýptarbili eru öll í viðauka III.



Mynd 1. Mælingamennirnir Sæmundur Ari og Þorbjörn að störfum sumarið 2004.



Mynd 2. Staðsetning viðnámsmælinga.



Mynd 3. Lega viðnámsniða.

4 NIÐURSTÖÐUR TEM-VIÐNÁMSMÆLINGANNA

4.1 Viðnámssnið

Mynd 3 sýnir legu viðnámssniðanna. Þar sést að um er að ræða 11 snið með A-V læga stefnu og svo 10 NV-SA snið. Hér á eftir verða ræddar niðurstöður úr hverju sniði fyrir sig.

Snið S1 liggur SV-NA úti við ströndina. Í því sést þunnt lag með mjög lágu viðnámi á 50–150 metra dýpi. Þetta er túlkað sem setlag sem inniheldur sjó. Austast í því sést lágt viðnám teygja sig niður og eru þar áhrif hækkaðs hita frá jarðhitasvæðinu við Skógalón.

Snið S2 liggur nokkurn veginn samsíða S1 og um það bil 1 km sunnar. Þarna sést sjávarlagið niður á 200 metra dýpi. Í sniðinu sést einnig lágt viðnám austantil, aðskilið frá sjávarlaginu og er eðlilegt að túlka það sem áhrif jarðhitans við Skógalón.

Snið S3 liggur um 1 km sunnan við S2 og samsíða. Hér sjást nýir hlutir. Vestan til í sniðinu sést sjávarlagið ofan á og smá tenging niður í lágviðnám fyrir neðan, sem trúlega tengist jarðhitauppstreymi. Hvort þessi tenging er raunveruleg er ekki hægt að segja um, en það er ekki ótrúlegt að jarðhitauppstreymi finni sér þarna farveg upp í sjávarlagið. Á sama stað sker misgengi sniðið. Önnur vísbending um uppstreymi gæti verið undir mælingu 276369. Austast í sniðinu sést í þunnt lágviðnámslag á 100–150m dýpi sem er trúlega sjávarlag. Neðan þess hækkar viðnám en frá um 300m dýpi er mjög ákveðið lágviðnám á ný, sem tengist jarðhitunum við Skógalón. Lárétt lágviðnámslæna er á 200 metra dýpi til vesturs út frá Skógalóns-lágviðnáminu og getur þýtt lárétt rennsli út frá jarðhitakerfinu.

Snið S4 liggur 1–1,5 km sunnar og er með heldur austlægari stefnu. Það liggur um það bil 500 metrum fyrir norðan Ytri Bakka og rétt sunnan við Ærlækjarsel. Sjávarlagið sést yfir öllum vesturhluta sniðsins með tengingu við lágviðnám sem nær djúpt niður undir mælingu 268350 og hlýtur að tákna uppstreymi jarðhitavökva sem þó er undir 230°C heitur. Undir vestustu mælingunni í sniðinu sést í lágviðnám á 700–800 metra dýpi, sem er vísbending um jarðhita. Austast sést í jarðhitann við Skógalón svo og sjávarlag á um 150–200 metra dýpi.

Snið S5 liggur SV-NA yfir holu BA-3. Holan er um 200 metra frá mælingu 268334. Í þeirri mælingu er viðnám lægst á 200–300 metra dýpi. Þetta er staðfest með mældu lágu viðnámi í borholunni sjálfri ofan 330 metra dýpis. Hitamæling sem gerð var í holunni tveimur dögum eftir borlok (viðauki I) sýnir rólegan stíganda í hita upp í 80°C á rúmlega 400 metra dýpi, og kólnun þar fyrir neðan allt niður á 650 metra dýpi og svo hækkun í hita þar fyrir neðan. Þessi hitamæling er trufluð af skolvatni svo stuttu eftir borun, en ekki eru til nýrri hitamælingar úr holunni. Viðnámssniðið gefur vísbendingar um hitauppstreymi 1–2 km vestan við holuna. Vatnið í holunni er því lárétt rennsli, að öllum líkindum blandað sjávarlaginu. Mælingar á leiðni vatns úr holunni sýna um 18900µS/cm sem telst mjög hátt.

Snið S6 liggur SV-NA yfir holu BA-2. Holan er um 250 metra frá mælingu 281320 þar sem viðnám er lægst á 250–400 metra dýptarbili með hækkandi viðnámi fyrir neðan og vísbendingu um viðnámslækkun aftur neðan 800 metra dýpis. Í holunni er hæsti hiti sem mælst hefur í holu í Öxarfirði eða nálægt 190°C á 300–500 metrum. Samkvæmt skýrslu Bjarna Richters o.fl. (1999) eru mörk berggrunns og setlaga á um 370 m dýpi í holunni. Viðnámsmælingar í holunni sýna að viðnám er mjög lágt í setlögnum en

hækkar snögglega þegar komið er í berggrunninn. Þannig fellur botn setlaganna saman við hækkun viðnáms neðan þeirra. Holan kólnar síðan mjög hratt fyrir neðan 500 metra og er um 120°C á 700 metra dýpi en lækkun hita með dýpi leiðir af sér samsvarandi hækkun í viðnámi. Þessu til viðbótar sést að komið er í epídót neðan 500 m dýpis sem bendir til þess að þar hafi einhvern tíma verið yfir 240°C hiti. Það er því greinilegt að viðnámsþækkunin neðan lágviðnámslinsunnar skýrist af þrennu, breyttri berggerð, lægri hita og hærri ummyndun. Vestan við holuna sést sjávarlagið, sem hér er án efa blandað jarðhitavatni. Vestast til í sniðinu sést lágviðnám neðan 6–700 metra dýpis, sem getur bent til jarðhita. Þetta lágviðnám sést í sniðunum S4, S5, S6 og S7.

Snið S7 liggur VSV-ANA 1–1,5 km sunnan við S6. Þar sést í sjávar- og afrennslislagið á 200–400 metra dýpi og er það aðskilið frá lágviðnámi neðar sem hlýtur að vera tengt jarðhita. Þetta lágviðnám er gleggst í mælingu 263308 sem trúlega er nálægt uppstreymi.

Snið S8 sýnir vísbendingu um jarðhita neðst í mælingu 273300, líkt og hún sé nærri „enda” jarðhitasprungu.

Í sniðum **S9** og **S10** sem eru syðstu sniðin með A-V stefnu, eru mælingarnar komnar suður fyrir jarðhitann. Ennþá sést þó votta fyrir viðnámslækkun á 200–400 metra dýpi, sem sýnir trúlega syðstu mörk setlagsins, sem er mesti áhrifavaldur í láréttu rennsli norðar á svæðinu. Borholan við Lindarbrekku liggur mitt milli vestustu mælinga í sniðum S7 og S8. Þar mælist hátt viðnám sem samræmist lágum hita í holunni, aðeins 21°C á botni hennar á 350m dýpi.

Snið S11 – S21 liggja NV-SA þvert á fyrri sniðin (sjá mynd 3).

Snið S11 er vestast og liggur NV-SA yfir Skjálftavatn. Norð-vestast sést í sjávarlagið og í raun sést setlagið sem lækkun í viðnámi alveg eftir öllu sniðinu. Norðvestast í sniðinu er svo lágviðnám með dýpi sem gefur vísbendingu um jarðhita.

Snið 12 sýnir að mæling 236326 er í námunda við jarðhitauppstreymi. Efst í sniðinu sést sjávarlagið norð-vestast og framhaldið af setlaginu til suðurs.

Snið S13 sýnir margt áhugavert. Sjávarlagið sést út við sjó og framhald af því til suðurs. Ákveðið lágviðnám í setlaginu sést í mælingu 263308, líkt og linsa og bendir til þess að hér gæti hækkaðs hita í setlaginu vegna jarðhita. Sniðið sker líkt og tvö lágviðnáms-svæði neðan 500 metra dýpis og gæti bent til þess að sniðið skeri tvær uppstreymisrásir. Lágviðnámið neðst og norð-vestast í sniðinu gæti verið vegna seltuáhrifa sjávarins.

Snið S14 (mynd 4) liggur NV-SA um holu BA-1 og um 400 metra vestan við holurnar BA-2 og BA-3. Sjávarlagið sést vel og hvernig það tengist lágviðnámslinsunni. Hún nær næst yfirborði í mælingu 272317, sem er um 400 metrum vestan við holu BA-2 þar sem jarðhitinn er við yfirborð. Þessi lágviðnámslinsa skapast af láréttu heitu rennsli í setlögum og lögun hennar sést í sniðunum S13, S14 og S15 svo og sniðunum þvert á þau S5, S6 og S7. Þessi snið sýna tengingu við sjávarlagið og tengsl við lágviðnám á dýpi. Lágviðnámið djúpt í mælingu 260331 gæti bent til nálægðar við hitauppstreymi.

Snið S15 (mynd 5) liggur austan við holurnar. BA-2 sker lágviðnámslinsuna nálægt mælingu 281320 eins og minnst er á í umfjöllun um snið S6. Tengingin við sjávarlagið er greinileg. Lágviðnám á 100–400 m dýpi í mælingu 268334, sem er um 400 m til suðausturs frá holu BA-3, ber merki um hitauppstreymi í nánd. Lágviðnám á dýpi nyrst í sniðinu má samt trúlegast telja til sjávaráhrifa. Hóla BA-3 ætti að skera lágviðnámslinsuna. Samkvæmt skýrslu um borun holu BA-3 (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl. 2000) má ætla að neðra borð lágviðnámslinsunnar sé við mörk setlaga og basaltberg-

grunns. Vatnsæðar sjást í setlöggunum en þó eru meginvatnsæðar holunnar niðri í basaltinu. Ummyndun neðst í setlöggunum bendir ekki til þess að þar hafi verið hærri hiti en 50–70°C. Áberandi lágt viðnám er í linsunni við mælingu 268334 sem kemur ekki vel saman við lágan hita í holunni. Hugsanlegt er að hitinn í lágviðnámslinsunni lækki umtalsvert frá mælingu 268334 í átt að holu BA-3 eða selta vökvans við BA-3 sé mun meiri en í BA-2. Síðastnefnda skýringin virðist rétt, rafleiðni vatns úr BA-3 er um 18900 μ S/cm en 8060 μ S/cm úr holu BA-2. Þess þarf þó að gæta hér að vatnið úr BA-2 kemur úr æðum neðan fóðringa á 780 m en vatnið í holu BA-3 úr æðum á 260-650 m. Líklegt er að nærri holu BA-02 sé uppstreymi tiltölulega fersks vatns af miklu dýpi sem berst út í lárétta löggin og þrýsti saltvatninu burtu. Lauslegir reikningar benda til þess að seltumunurinn á milli holnanna geri meira en að upphefja hitamuninn. Því sé eðlilegt að fá lægra viðnám í lárétta laginu við holu BA-3 en við BA-2 þótt hitinn við BA-2 sé um 100°C hærri við botn setlaganna.

Á jafnviðnámskortunum sjást skörp viðnámskil, þ.e.a.s. hærra viðnám austur af holunum. Hvernig afstaða holunnar BA-3 er við skilin er ekki ljóst en hafa verður í huga að viðnámsmyndin byggir á mælineti þar sem 1–1,5 km eru á milli mælinga.

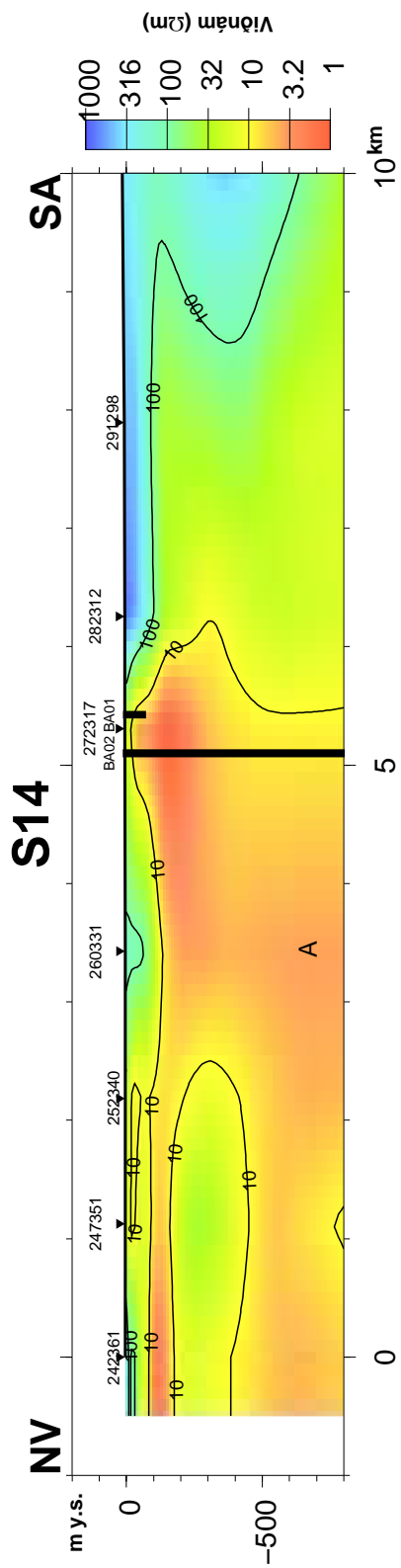
Snið S16 sýnir svipaða mynd og S15, þ.e. sjávarlagið og tengingu þess við lágviðnámslinsuna. Lágviðnám neðan 400m í mælingu 251365 bendir til hás hita, en þar er einmitt þekkt misgengi á yfirborði. Lágviðnámið á dýpi nyrst í sniðinu er vísast vegna sjávaráhrifa.

Snið S17 er austan við fyrnefnda lágviðnámslinsu. Það sýnir sjávarlagið svo og lárétt rennsli á 500 metra dýpi, sem vísast tengist uppstreymi sem sést enn betur í sniði S18.

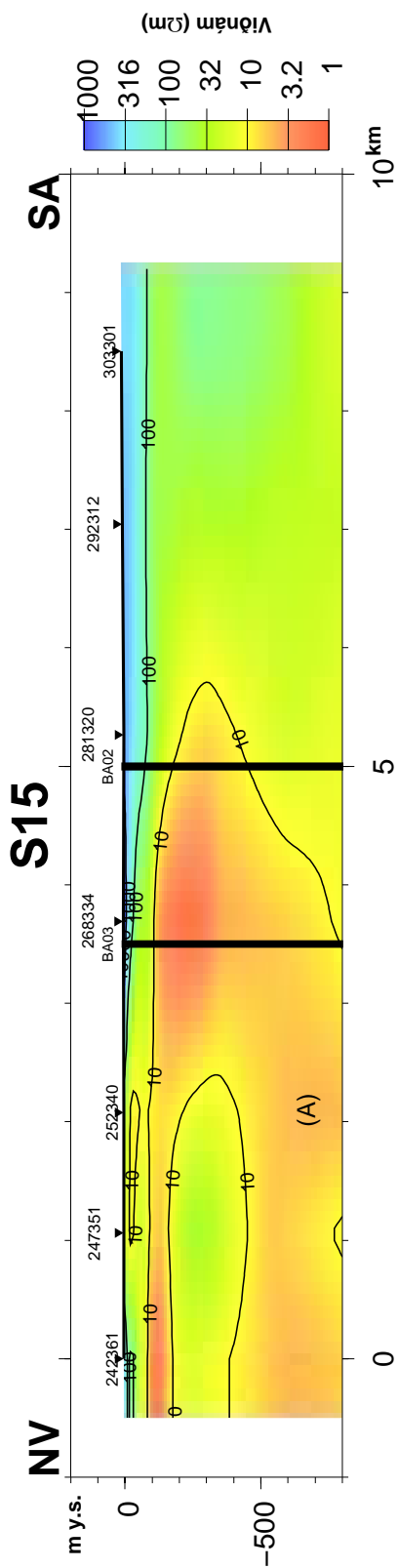
Snið S18 sýnir sjávarlagið og sjávaráhrif nyrst. Það sker svo uppstreymi í mælingu 276369 og er það trúlegast tengt lágviðnáminu á 500 metrum í S17 og bendir til lárétts streymis út frá því.

Snið S19 sýnir sjávarlagið og svo lágviðnám neðan 300 metra dýpis í mælingu 273364. Þetta lágviðnám getur tengst uppstreyminu sem minnst er á í umfjöllun um S18. Lágviðnám á enn meira dýpi í mælingu 288745 getur svo tengst lágviðnámi við Skógalón.

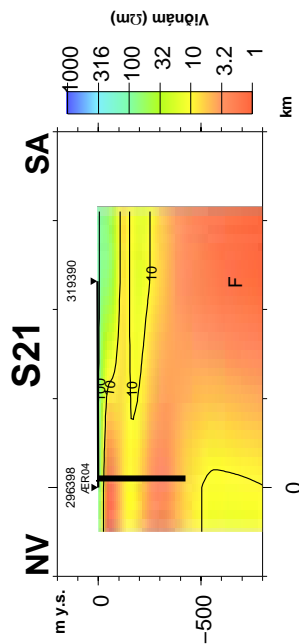
Snið S20 sýnir sjávaráhrif og lágviðnám í mælingu 291387, sem freistandi er að tengja við Skógalón. Einnig sést greinilegt lágviðnám á dýpi í mælingu 317369 sem staðfestist enn í sniði **S21** í mælingu 319390 (mynd 6). Á þessum slóðum sést sjávarlagið, síðan viðnámslækkun svo og viðnámslækkun með dýpi. Hitamælingar úr borholu ÆR-4 við Skógalón, sem er rétt við mælingu 296398, sýnir hitatopp á 100 metra dýpi á móts við sjávarlagið. Það inniheldur því um 80°C heitan sjó á þessum stað. Neðan þess kólnar holan niður á 200 metra og hitnun þar fyrir neðan og eru um 150°C í botni á um 400 m dýpi. Hækkun viðnáms neðan 400 m dýpis við holu ÆR-4 bendir til þess að um lárétt flæði jarðhitavatns sé að ræða frá uppstreymi sunnar og spáir fyrir um lækkun hita með dýpi ef holan yrði dýpkuð. Gott samræmi er milli hita og viðnáms á þessu svæði.



Mynd 4. Viðnámssnið S14.



Mynd 5. Viðnámssnið S15.



Mynd 6. Viðnámssnið S21.

4.2 Jafnvíðnámsskort

Til að skoða betur þessa flóknu viðnámssmynd sem fram kemur í viðnámssmælingunum í Öxarfirði, eru gerð jafnvíðnámsskort á föstu dýpi með 50 metra dýptarbili. Viðnámsskortin eru í viðauka III.

Viðnám á 50 metra dýpi sýnir hátt viðnám í öllu yfirborði, þegar frá er talið lágviðnám úti undir sjávarkambi þar sem sést hvernig sjórinn flæðir inn undir land.

Á 100, 150 og 200 metra dýpi sést hvernig sjávarlagið teygir sig inn undir land og sameinast lágviðnámstotu við Bakkahlaup. Þessi tota er einmitt lágviðnámsslinan sem minnst er á í lýsingunum á sniðunum hér að framan.

Á 250 metra dýpi sést linsan greinilega, en hér er komið niður úr tengilaginu á milli linsunnar og sjávarlaga.

Á næstu kortum 300, 350, 400, og 450 metra dýpi sést neðsti hluti lágviðnámsslinunnar við Bakkahlaup.

Á 500 metra dýpi sýnir kortið lágviðnám sem trúlegast afmarkar jarðhita á þessu dýpi. Það á þó varla við um mælingarnar yst út á sjávarkambi, þær eru vísast undir áhrifum sjávar. Það er athyglisvert að sjá skýr viðnámsskil með NS stefnu rétt austan við BA-holurnar. Austan við þessi skil er hátt viðnám á austurhluta mælisvæðisins og ekki merki jarðhita fyrr en nyrst á svæðinu við Skógalón og norðaustur af Ærlækjarseli. Þetta er að því leyti merkilegt að austurjaðar sprungusveimsins liggur þarna um og sjást misgengin á yfirborði. Það er því ljóst, að þessar sprungur eru ekki uppstreymissprungur heits vatns, nema e.t.v. framhald þeirra til norðurs en þar sjást hins vegar ekki sprungur á yfirborði.

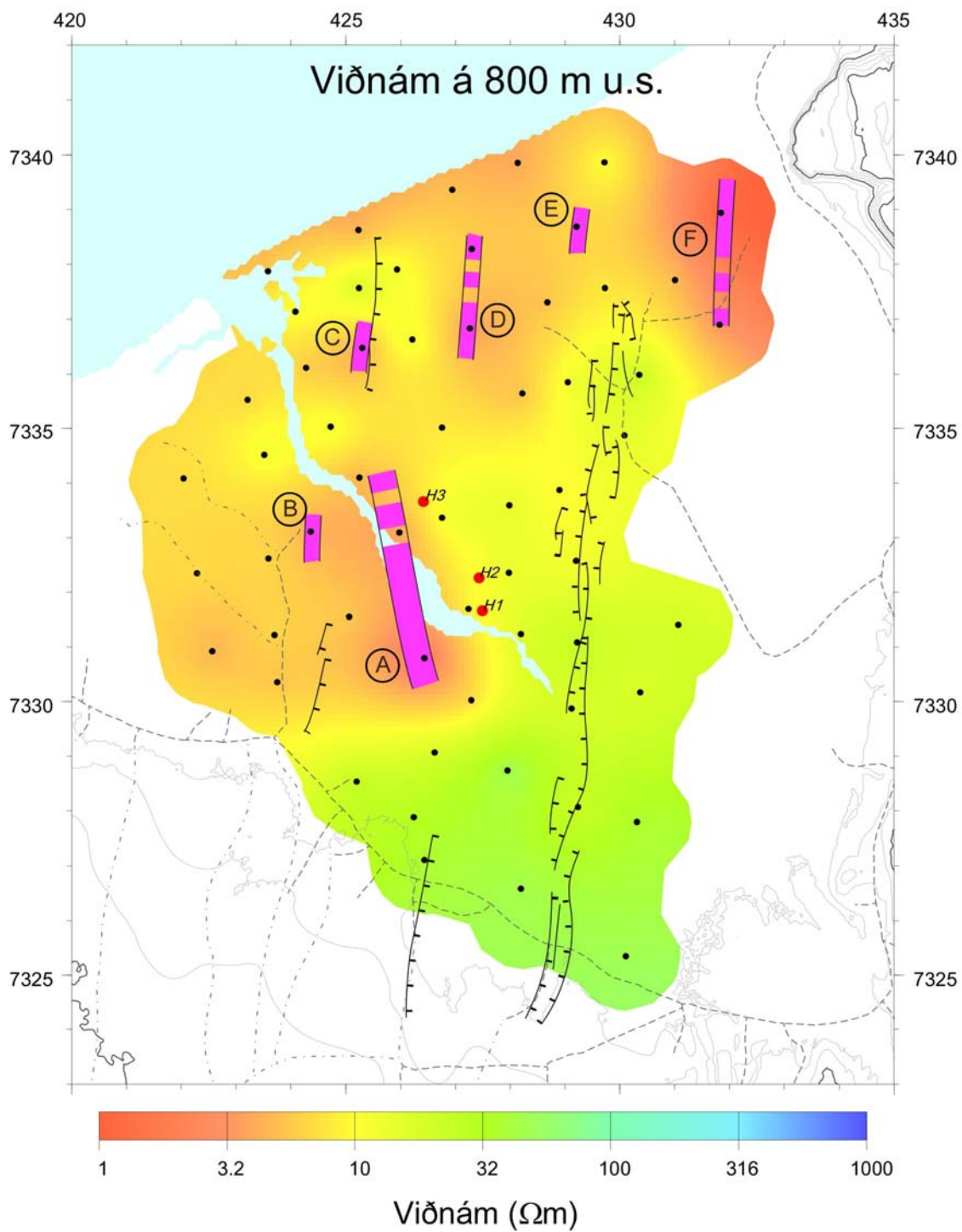
Á næstu kortum 550, 600, 650, 700 og 750 sést hvernig útbreiðsla lágviðnáms verður meiri með dýpi. Lágviðnámið teygir sig til vesturs eins og mælisvæðið nær svo og sést mjög lágt og ákveðið lágviðnám norðaustast á mælisvæðinu (Ærlækjarsel). Þetta lágviðnám er í austustu mælingu og því ekki víst um mörkin þar fyrir austan.

4.3 Hvað sýnir viðnámsmyndin ?

Í umfjölluninni um viðnámsniðin hefur verið minnst á jarðhitauppstreymi hér og þar. Verður nú reynt að gera þá mynd ljósari og skýra frá hvar líklegustu uppstreymissvæðin eða sprungurnar eru. Jarðfræðilegar aðstæður við jarðhitakerfin í Öxarfirði eru óvenjulegar á íslenska vísu. Berggrunnurinn er hulinn 300–500m þykkum setlögum og í þeim er sumstaðar sjór eða mjög sjávarblandað vatn. Jarðhitinn kemur upp um sprungur og misgengi í sprungusveimi, sem tilheyrir eldstöðvakerfi Kröflu. Setlögin gefa heita vatninu færi á að renna lárétt út í setið út frá uppstreymisrásunum. Nokkur brot ná til yfirborðs upp í gegnum setið en eins er víst að setin hylja mörg brot og sprungur. Til að gera myndina enn líflegri og flóknari gera setin sjónum fært að flæða alllangt inn undir land. Af umfjölluninni um viðnámsniðin hér að framan í kafla 4.2 eru dregnar eftirfarandi ályktanir um líklega uppstreymisstaði jarðhita og þeir merktir inn á mynd 7:

- **A** Umfangsmesta uppstreymið er við Bakkahlaup vestan við borholurnar sem við það eru kenndar. Þær mælingar sem best sjá uppstreymið eru 260331, 272317 og 263308. Þarna streymir upp jarðhitavatn og út í setin eins og sést af lágviðnámslinsunni á þessum slóðum.
- **B** Vísbending er um uppstreymi í mælingu 244331 og ekki er ljóst hvort þetta tengist uppstreyminu sem fjallað er um hér næst á undan.
- **C** Í mælingu 251365 sem er við þekkt misgengi á yfirborði er vísbending um uppstreymi.
- **D** Vísbending er um uppstreymissprungu með NS stefnu og markast af mælingunum 276369 sérstaklega og styðst af mælingu 273364. Þetta uppstreymi sést best í sniði S18.
- **E** Vísbending er um uppstreymi í mælingu 291387 við Skógalón. Þetta uppstreymi styðst af jarðhita á yfirborði.
- **F** Austasta uppstreymissprungan sem sést á mælisvæðinu er norð-austan við Ærlækjarsel. Hún hefur NS-stefnu og markast af mælingu 319390 sérstaklega og styðst af mælingu 317369.
- Lágviðnám neðan 800 metra dýpis er vestast á mælisvæðinu og sést ekki afmörkun þess til vesturs. Líklegt er að jarðhiti sé hér á allmiklu dýpi og hugsanlega afrennsli frá A og B.

Á kortið sem sýnir viðnám á **800** metra dýpi (mynd 7) eru settar inn þessar tilgátur um uppstreymisrásir eins og ráða má af skoðun viðnámsniðanna. Þarna sést greinilega austurjaðar sprungusveimsins og hátt viðnám sem fylgir honum.



Mynd 7. Viðnám á 800 m u.s. og uppstreymisrásir samkvæmt túlkun TEM-viðnámsmælinganna.

5 SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

Jarðhitinn í Öxarfirði er ólíkur öllum öðrum jarðhitakerfum á landinu. Hann er greinilega tengdur sprungukerfi Kröflueldstöðvarinnar og fær líklega varma sinn að einhverju leyti úr kólnandi innskotum þar. Þau eru þó trúlega bæði fá og staðbundin enda sjást þau lítt í borholunum.

Viðnámsmælingar sýna mjög flókna mynd af eðlisviðnámi jarðarinnar þar sem margir þættir valda breytingum í viðnámi frá einum stað til annars og er erfitt að greina hvað veldur í hverju tilviki. Þannig koma mörk setlaga og basalts fram sem hækkun í viðnámi. Um setlögina í berggruninum leikur vatn, sem ýmist er heitt vatn með lágu viðnámi eða kalt með háu. Jafnframt er það sumstaðar sjávarblandað og því hærri sem seltan er því lægra verður viðnámið. Það er því erfitt að greina að hvort viðnámslægd innan setlaganna stafar af aukinni seltu eða hærri hita. Jafnvel mætti búast við því að sjá hækkun viðnáms í setunum við uppstreymisstaði úr berggrunni ef heita uppstreymið er ferskvatn.

Í berggruninum neðan setlaganna má ætla að viðnám stjórnist fyrst og fremst af hita, seltu og ummyndunarstigi. Telja verður að viðnámskortíð á mynd 7 af viðnámi á 800m dýpi endurspegli vel ástandið í berggruninum neðan setlaganna. Seltuáhrifin sjást vel í öllum mælingum alveg úti við sjó en minnka væntanlega verulega inn til landsins. Dæmigerður háviðnámskjarni sést hvergi öndvert því sem túlkun eldri mælinga gaf til kynna. Það bendir til þess að ofan 800 m dýpis sé hvergi að finna verulega útbreitt svæði þar sem hiti hafi náð yfir 240°C. Ætla má að viðnámsbreytingar á 800m dýpi endurspegli fyrst og fremst breytingar í hita og sýni þar með best hvar helstu uppstreymisstaðir jarðhitavatns eru og það vatn er undir 240°C.

Ljóst er að jarðhitinn í Öxarfirði getur ekki talist til hefðbundinna háhitakerfa en hefur heldur ekki helstu einkenni lághitakerfa. Hann er því eins konar millstig milli kerfa, sem best má lýsa sem litlum staðbundum háhitablettum þar sem hiti nær e.t.v. 200°C en er vart mikið þar yfir. Kringum þessa háhitabletti eru síðan svæði sem bera ýmis einkenni vatnsmikilla lághitasvæða.

Af mynd 7 má ráða að það séu einkum þrír staðir þar sem jarðhita er að finna og þá líkast til í tengslum við virk brot:

1. Jarðhitinn við Ærlækjarsel og Skógalón kemur vel fram og benda líkur til þess að meginuppstreymi hans sé til suðausturs frá Skógalóni með afrennsli til norðurs í setlögum. (F á mynd 7).
2. Jarðhitinn við Bakkahlaup virðist koma upp vestar og sunnar en áður var talið og líkast til er megin uppstreymið á afmörkuðum stað rétt vestan og sunnan Bakkahlaups til móts við holu BA-1. (A á mynd 7)
3. Það virðist vera uppstreymi undir söndunum u.þ.b. 5 km norðan holu BA-2. (D á mynd 7).
4. Vísbendingar finnast um staðbundin uppstreymi á þremur öðrum stöðum á rannsóknasvæðinu. (B, C og E á mynd 7).

Þá kemur vel fram að hátt viðnám fylgir brotakerfinu sem er austan jarðhitasvæðisins við Bakkahlaup sem þýðir að efri hluti þess er kaldur. Ennfremur eru suðurmörk jarðhitakerfisins við Bakkahlaup mjög skýr og greinilegt að það nær ekki lengra en u.þ.b. 1

km til suðurs frá holu BA-1. Þar fyrir sunnan er engu vísbendingu að sjá um jarðhita ofan 800 metra dýpis.

Í heildina tekið fæst gott samræmi milli niðurstöðu TEM-viðnámsmælinganna og mælinga í borholum BA-1, BA-2, ÆR-4 og LI-1. Hiti í holu BA-3 er hins vegar lægri í setlögnum en búast hefði mátt við út frá næstliggjandi viðnámsmælingu sem er í um 400 m fjarlægð. Skýringin er að hluta súa að selta vatnsins í grennd við BA-3 er mun meiri en í BA-2. Einnig getur skýringin legið í því að það kólni í átt að holunni frá mælistaðnum. Svo má geta þess að hitamælingin í holunni BA-3 var gerð tveimur dögum eftir borlok og því trúlegt að hún sýni ekki alveg rétt hitaástand.

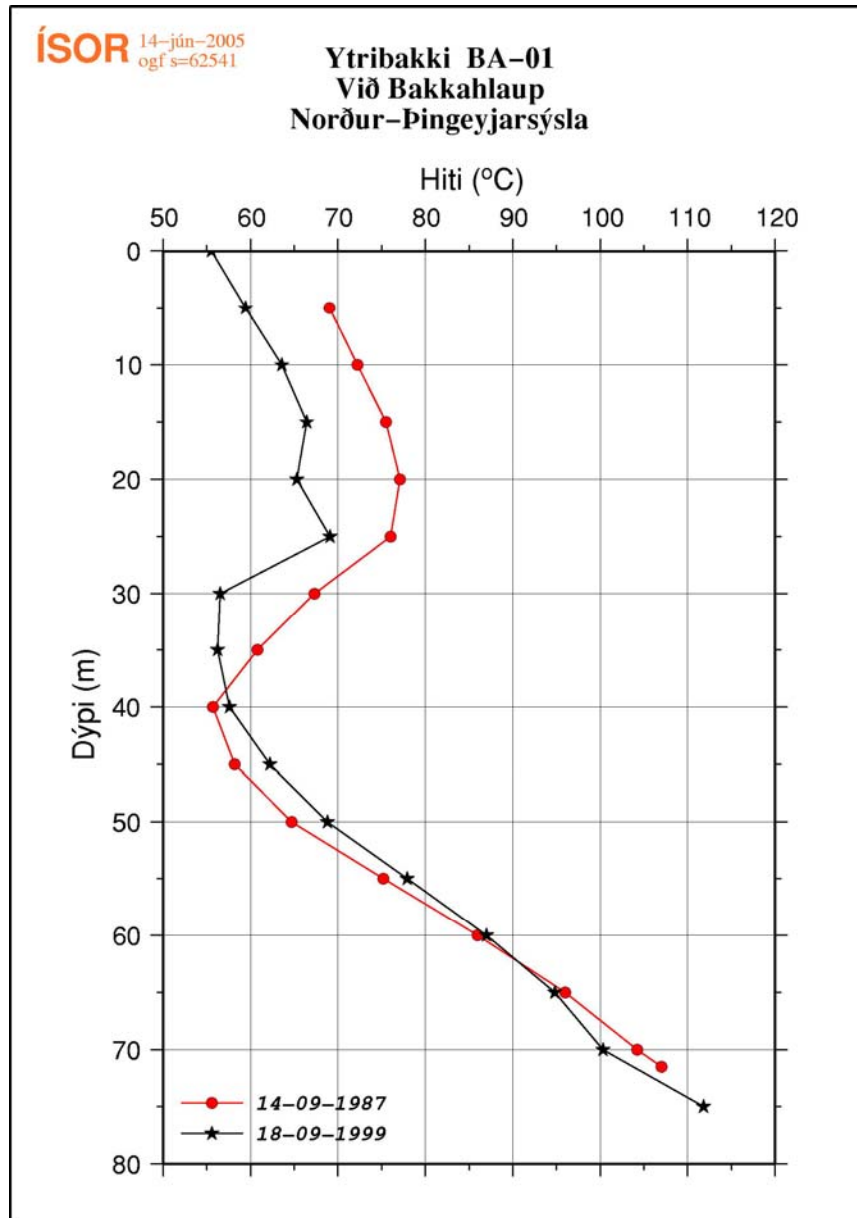
6 FRAMHALD

Í framhaldi af þessari skýrslu mun Íslensk orka væntanlega meta stöðu sína og ákveða hvort og hvaða framhald verður á áformum hennar í Öxarfirði. Telja má nær öruggt að jarðhitasvæðið við Bakkahlaup sé fremur kalt af háhitasvæði að vera og lítið að flatarmáli. Hins vegar má eflaust vinna þar talsvert magn af allt að 200°C vökva. Ef túlkun TEM viðnámsmælinganna er rétt, virðist vænlegast að ná þeirri orku vestan Bakkahlaups, suðvestur af holu BA-01. Hafa ber í huga að enn er alllangt milli mælinga á þessum slóðum. Því er mælt með því að bætt verði við 6–8 TEM-mælingum við fyrirhugaðan borstað til að fá nákvæmari upplýsingar fyrir staðsetningu borholu þar.

7 HEIMILDIR

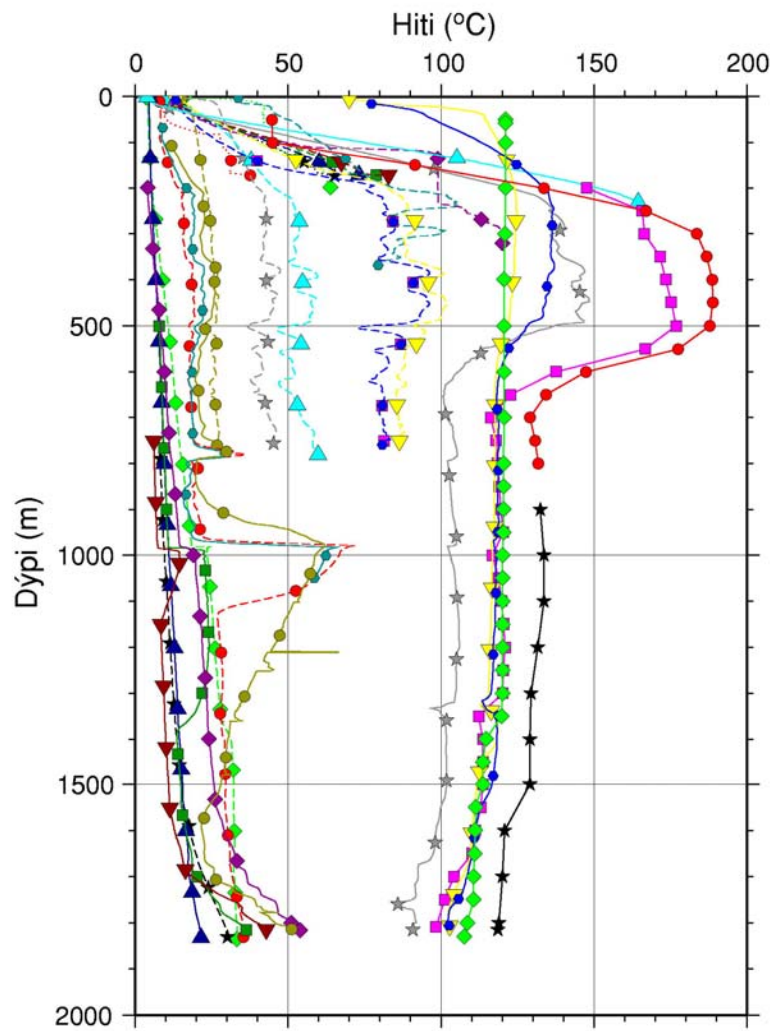
- Bjarni Richter, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Guðlaugur Hermannsson, Kjartan Birgisson, Sigvaldi Thordarson, Sverrir Þórhallsson og Sveinbjörn Þórisson, 1999: *Bakkahlaup Öxarfirði. Hóla BA-02. Áfangaskýrsla 2. Borun 4. áfanga*. Orkustofnun-Rannsóknasvið, OS-99074 21. s.
- Guðmundur Ómar Friðleifsson, Grímur Björnsson, Bjarni Richter, Kjartan Birgisson, Sverrir Þórhallsson og Sveinbjörn Þórisson, 1999. *Bakkahlaup Öxarfirði. Hóla BA-02. Áfangaskýrsla 3. Borun vinnsluáfanga holunnar*. Orkustofnun-Rannsóknasvið, OS-99079. 24 s.
- Guðmundur Ómar Friðleifsson, Bjarni Richter, Guðlaugur Hermannsson, Kjartan Birgisson, Ómar Sigurðsson, Sigvaldi Thordarson, Sverrir Þórhallsson og Sveinbjörn Þórisson, 1999: *Bakkahlaup Öxarfirði. Hóla BA-02. Áfangaskýrsla 1. Borun 1., 2. og 3. áfanga*. Orkustofnun-Rannsóknasvið: OS-99064. 28 s.
- Guðmundur Ómar Friðleifsson ROS, Bjarni Richter ROS, Kjartan Birgisson ROS, Arnar Hjartarson ROS, Steinar Þór Guðlaugsson ROS, Grímur Björnsson, ROS, Sverrir Þórhallsson ROS og Sveinbjörn Þórisson JB hf.; 2000. *Bakkahlaup Öxarfirði. Hóla BA-03. Borun jarðlög og mælingar*. Orkustofnun-Rannsóknasvið: OS-2000/058. 20 s.
- Guðmundur Ómar Friðleifsson, 2001. Framhald rannsókna við Bakkahlaup. Orkustofnun-Rannsóknasvið, greinargerð GÓF-2001-03. 4 s.
- Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ólafur G. Flóvenz, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen, 1993. *Rannsóknir á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduhverfi*. Orkustofnunar, OS-93063/JHD-15. 63 s.
- 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.
- Kulenkampff, J., E. Spangenberg, Ólafur Flóvenz, S. Raab og E. Huenges, 2005. *Petrophysical parameters of rocks saturated with liquid water at high temperature geothermal reservoir conditions*. Proceedings World Geothermal Congress; Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Viðauki I: Hitamælingar í borholu BA-1, BA-2, BA-3, ÆR-4 og LI-1

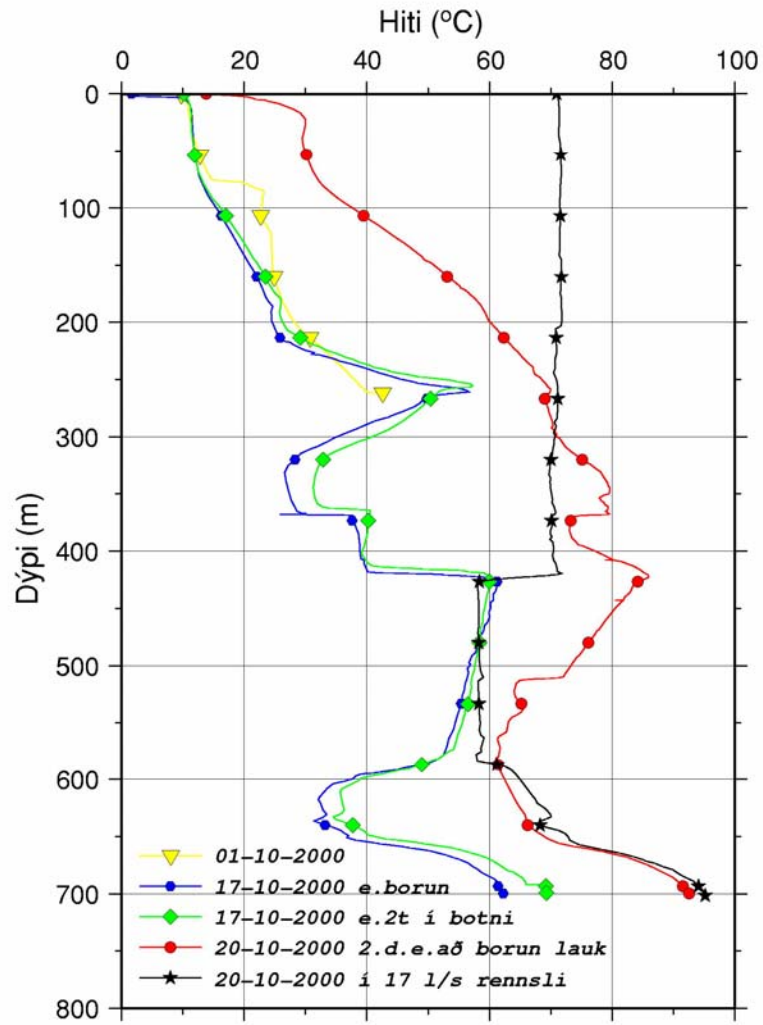


ÍSOR 14-jún-2005
ogf s=62542

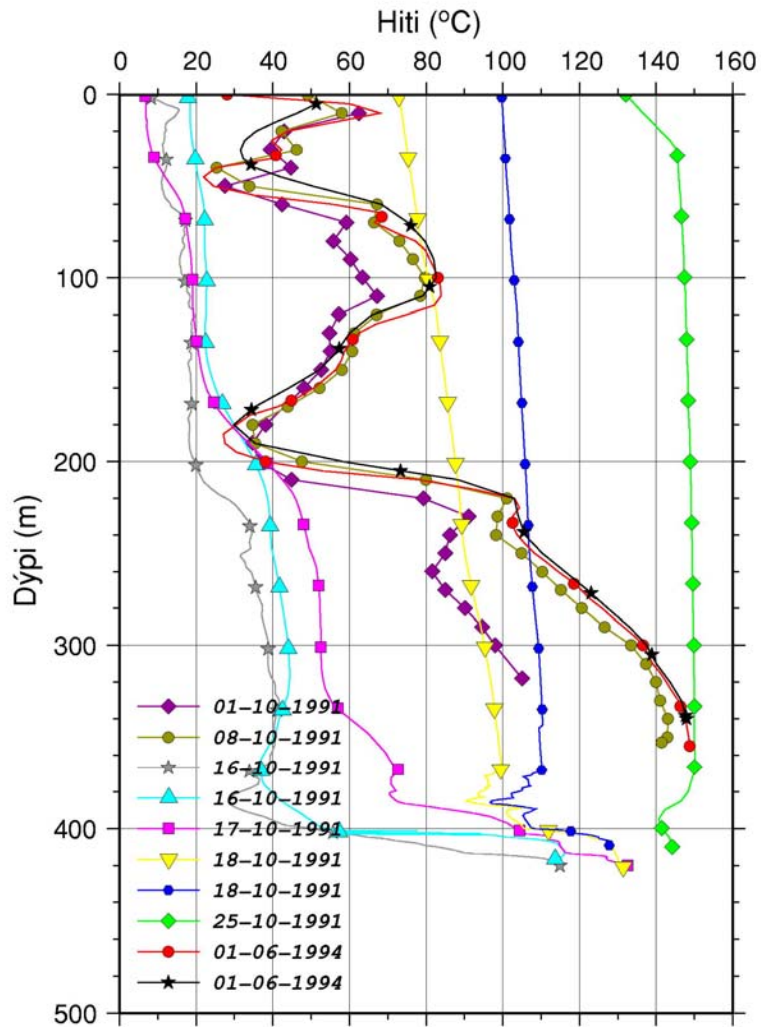
Ytribakki BA-02
Við Bakkahlaup
Norður-Þingeyjarsýsla



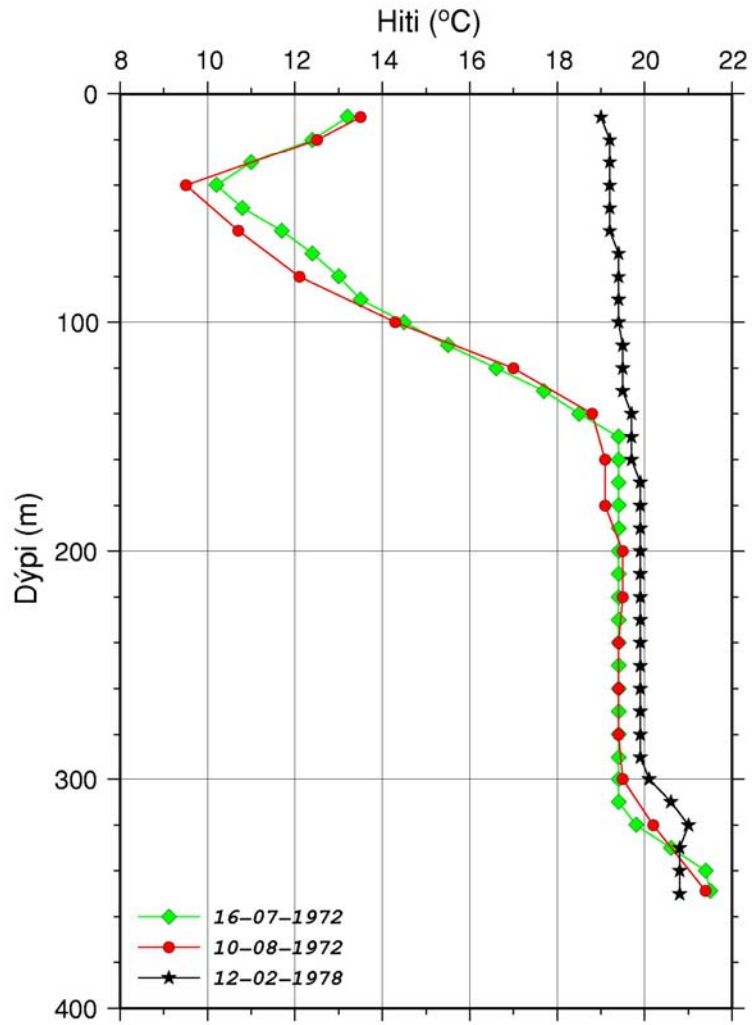
Ytribakki BA-03
Við Bakkahlaup
Norður-Þingeyjarsýsla



Ærlækjarsel ÆR-04
Við Skógalón
Norður-Þingeyjarsýsla

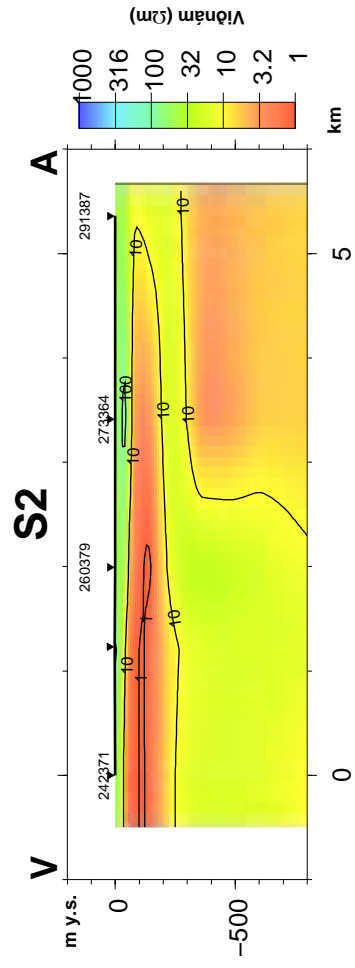
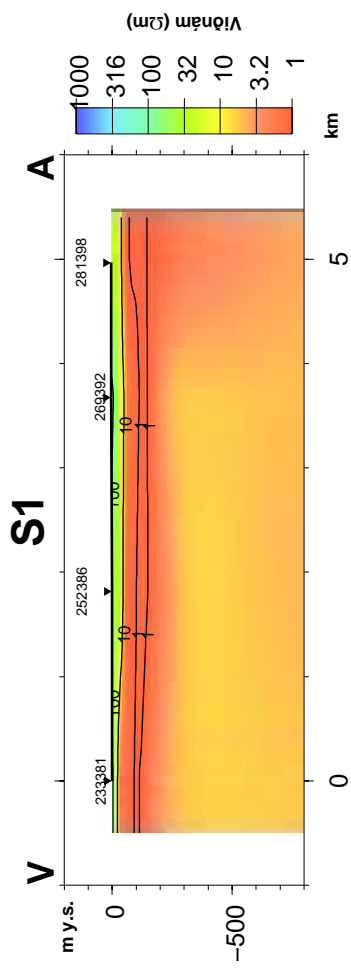


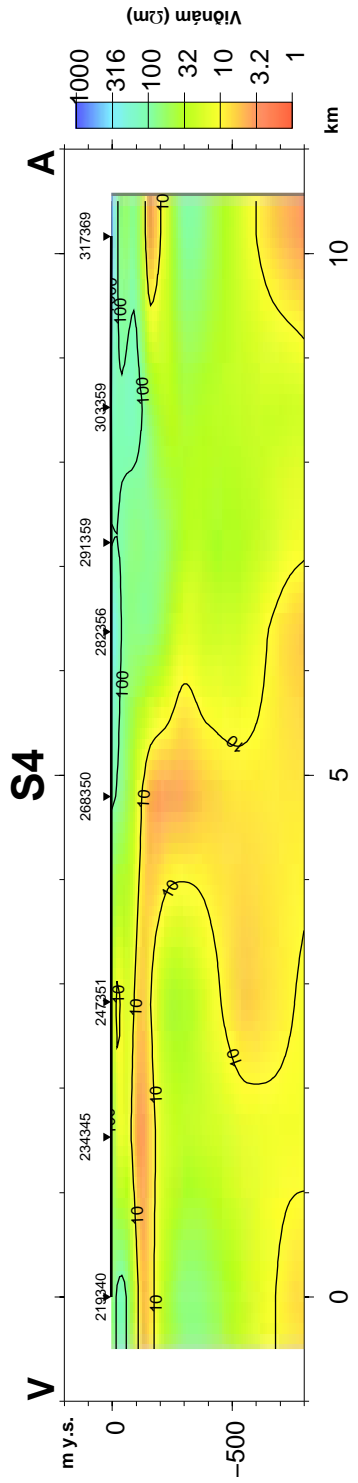
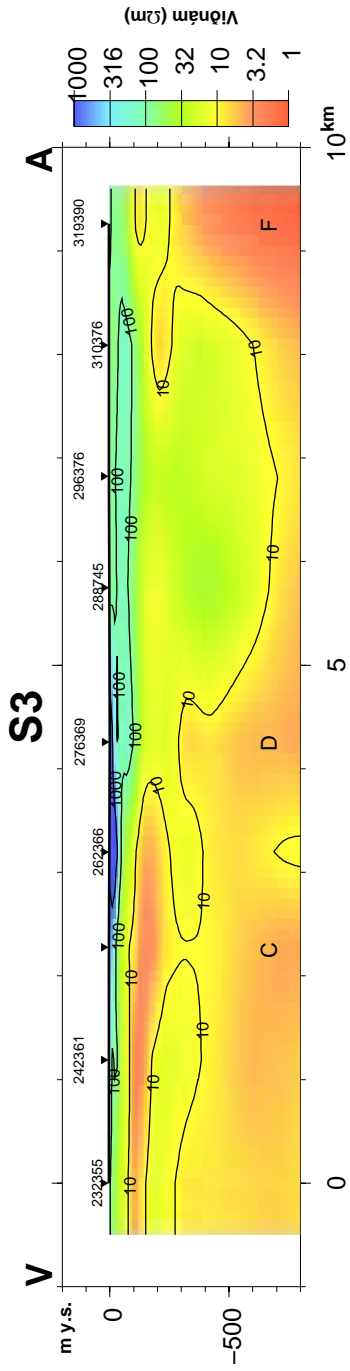
Kelduneskot LI-01
Lindarbrekka
Norður-Þingeyjarsýsla

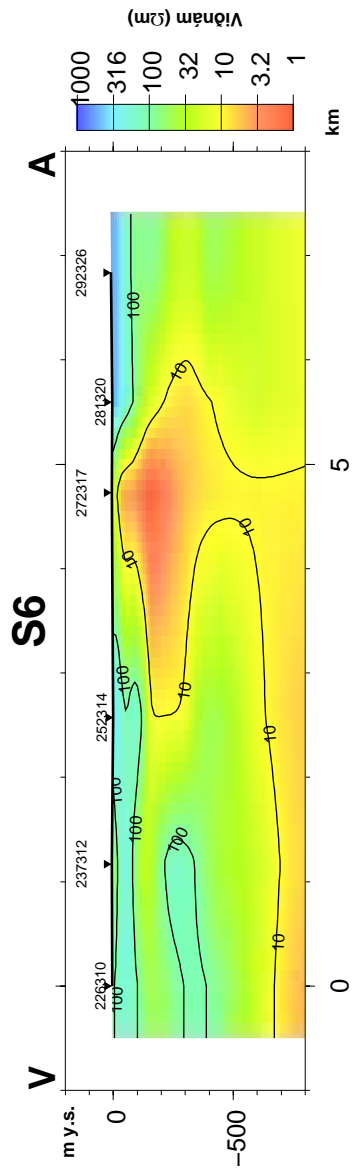
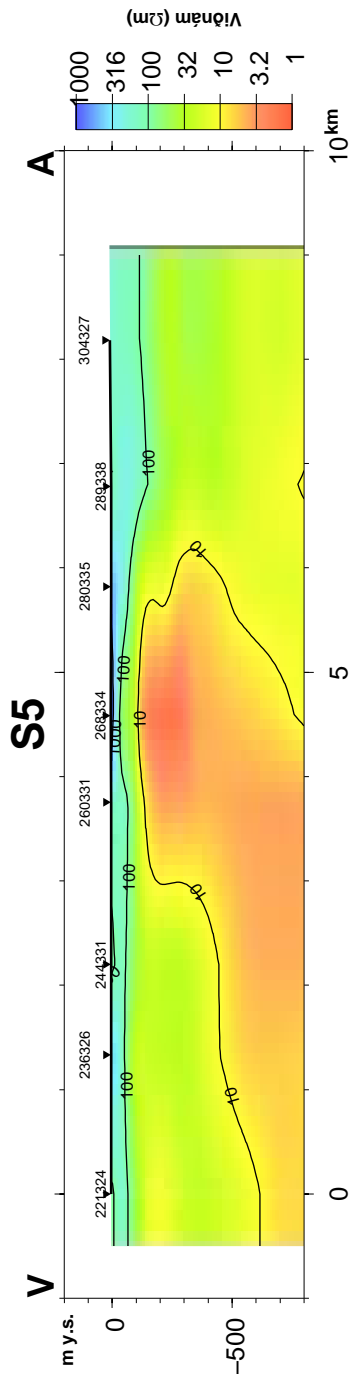


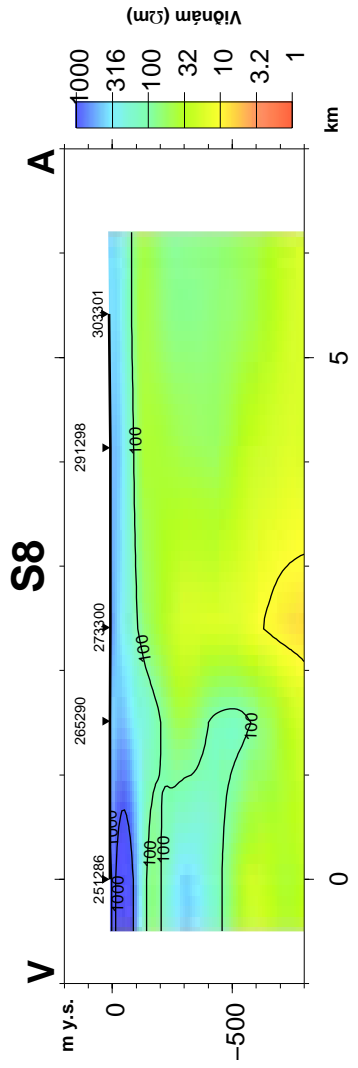
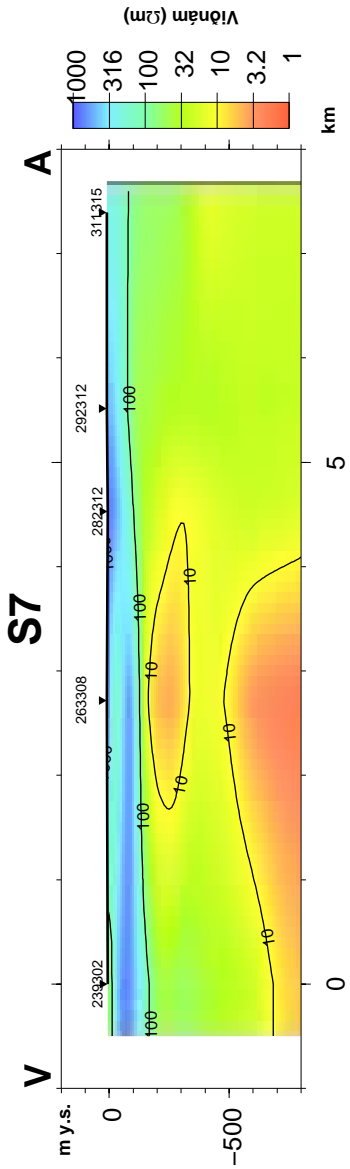
VĪDAUKI II:

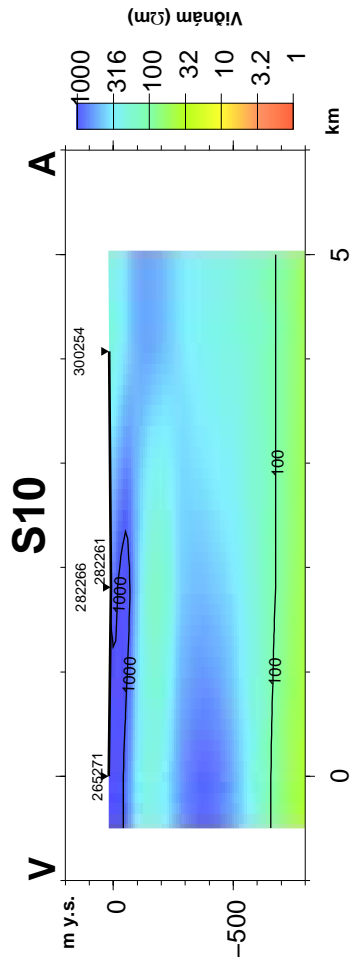
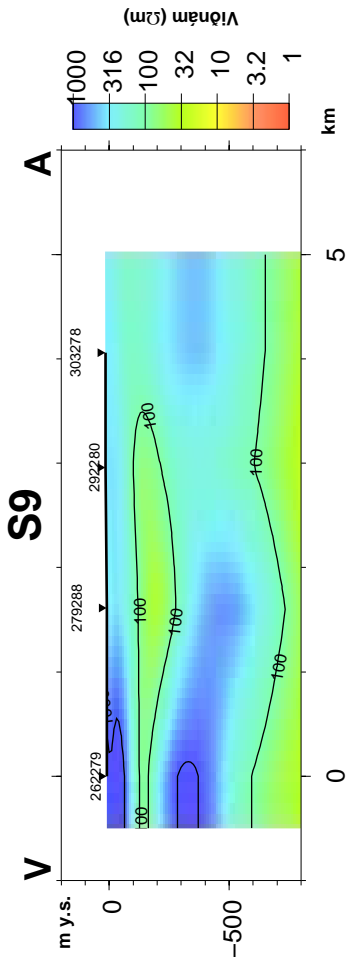
Viðnámssnið S1-S21

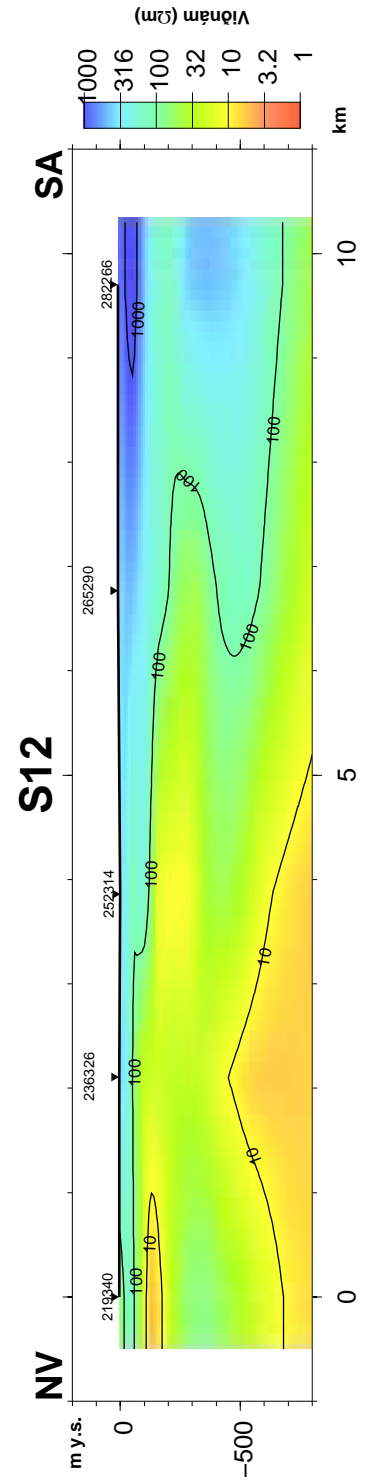
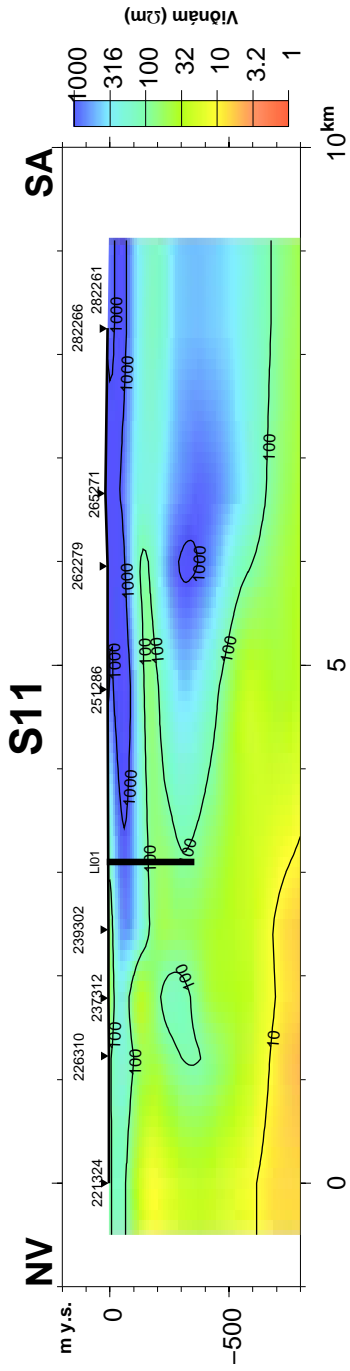


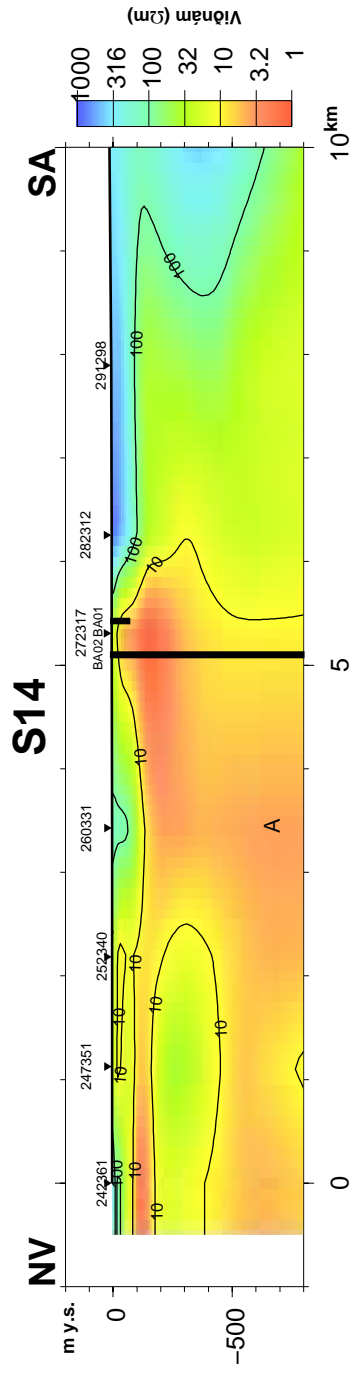
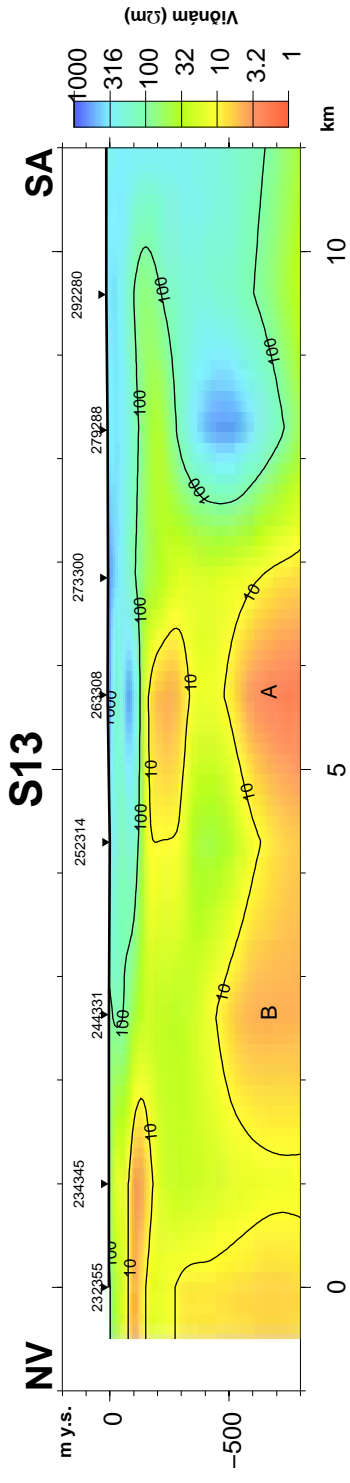


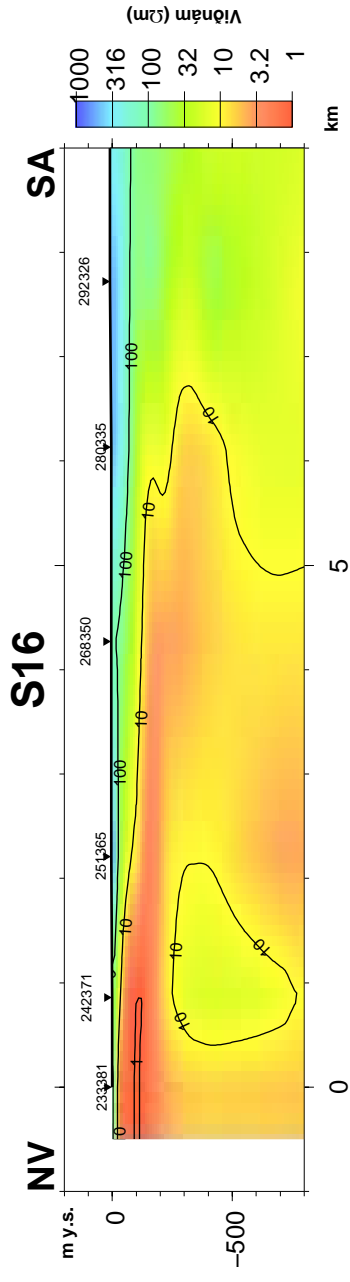
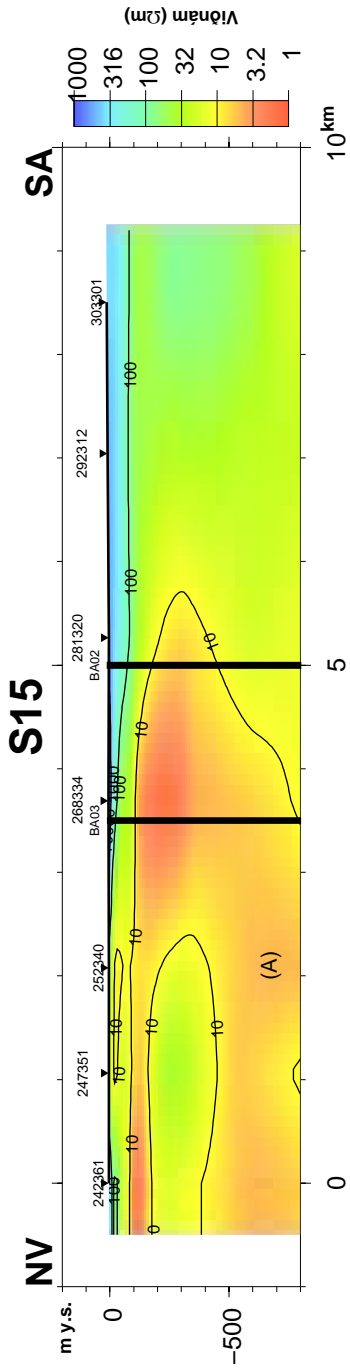


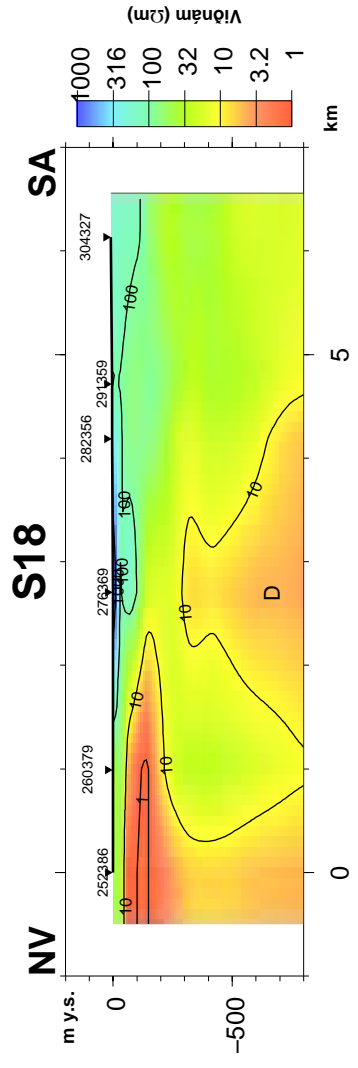
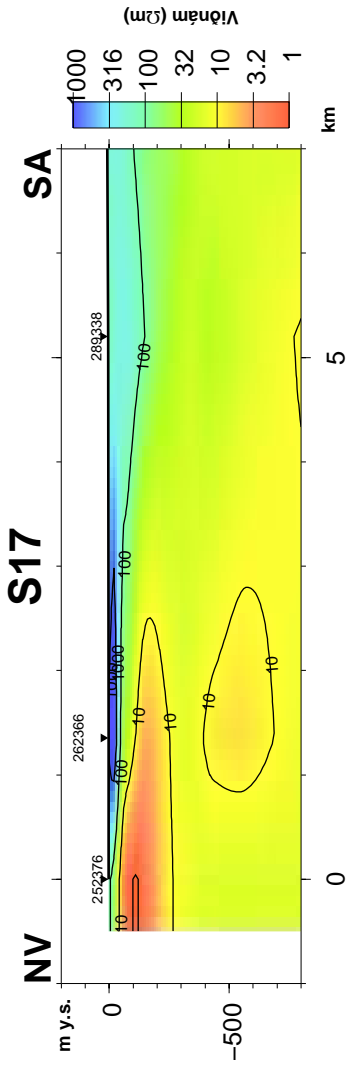


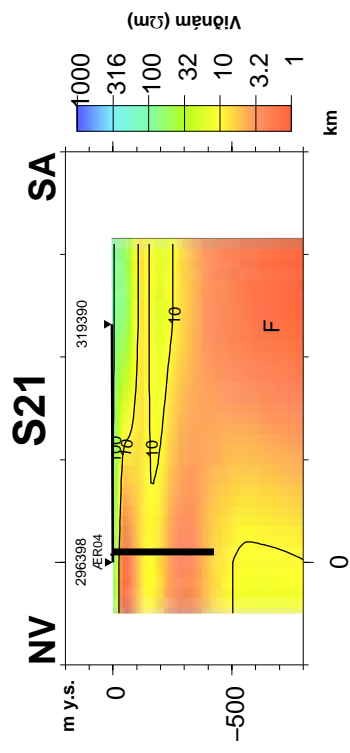
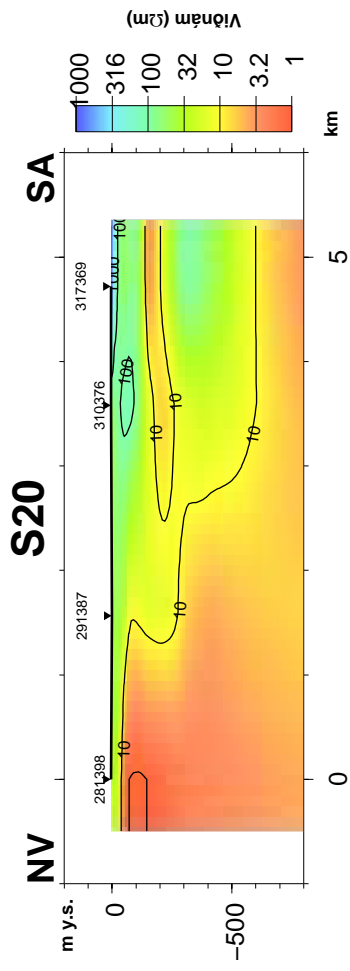
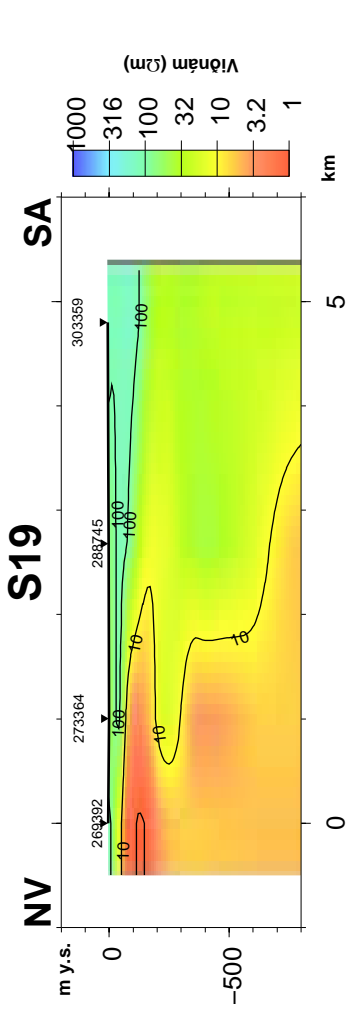




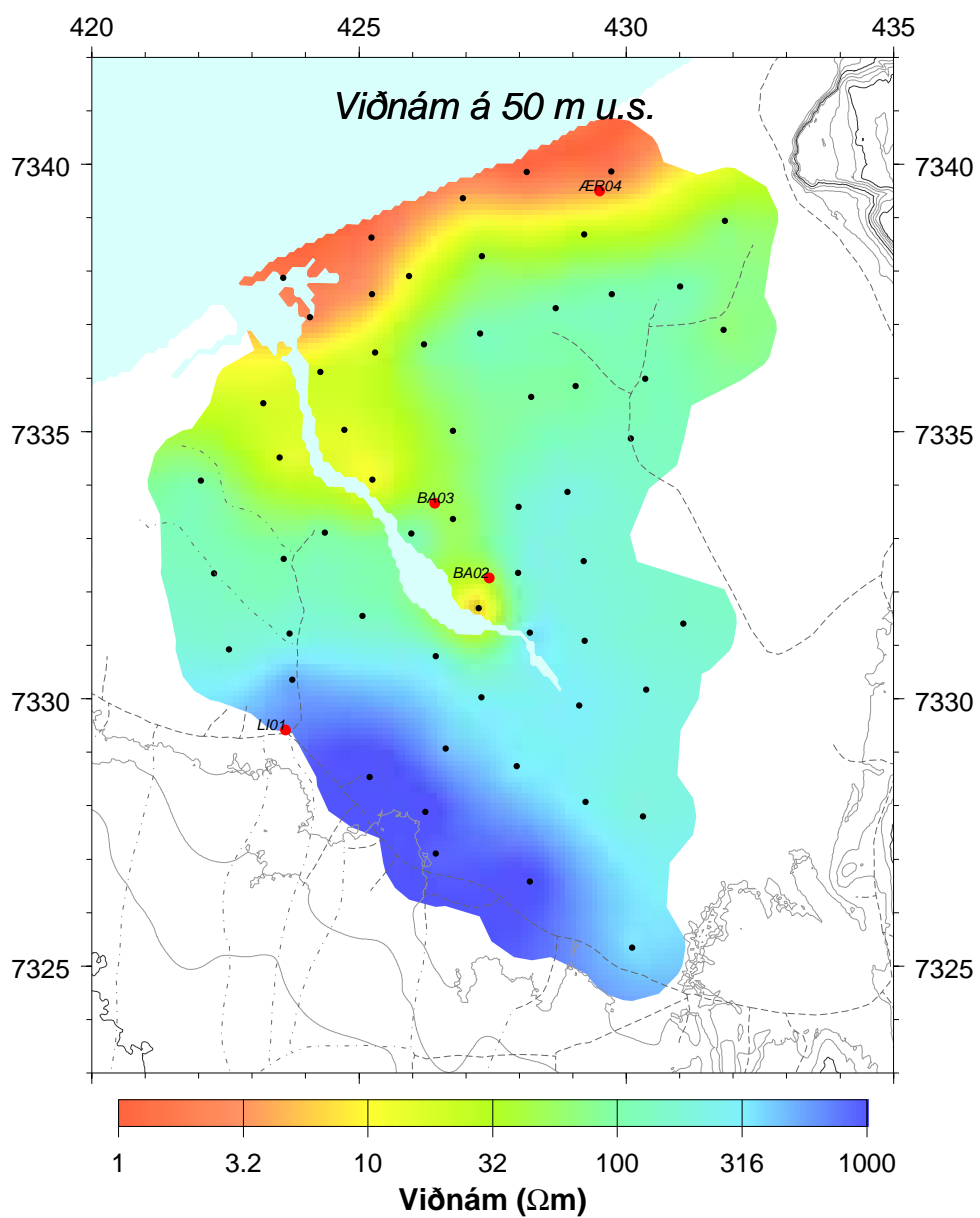


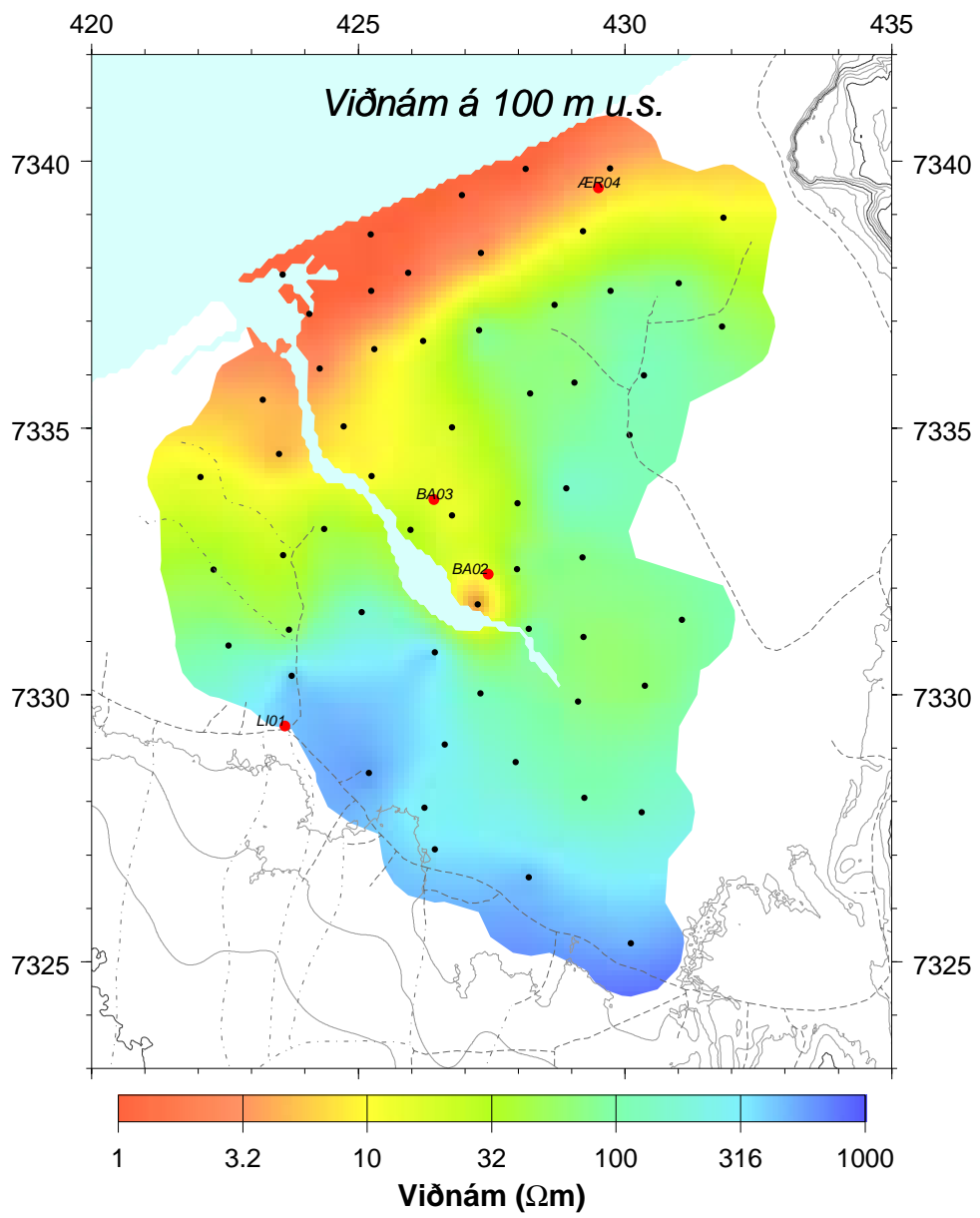


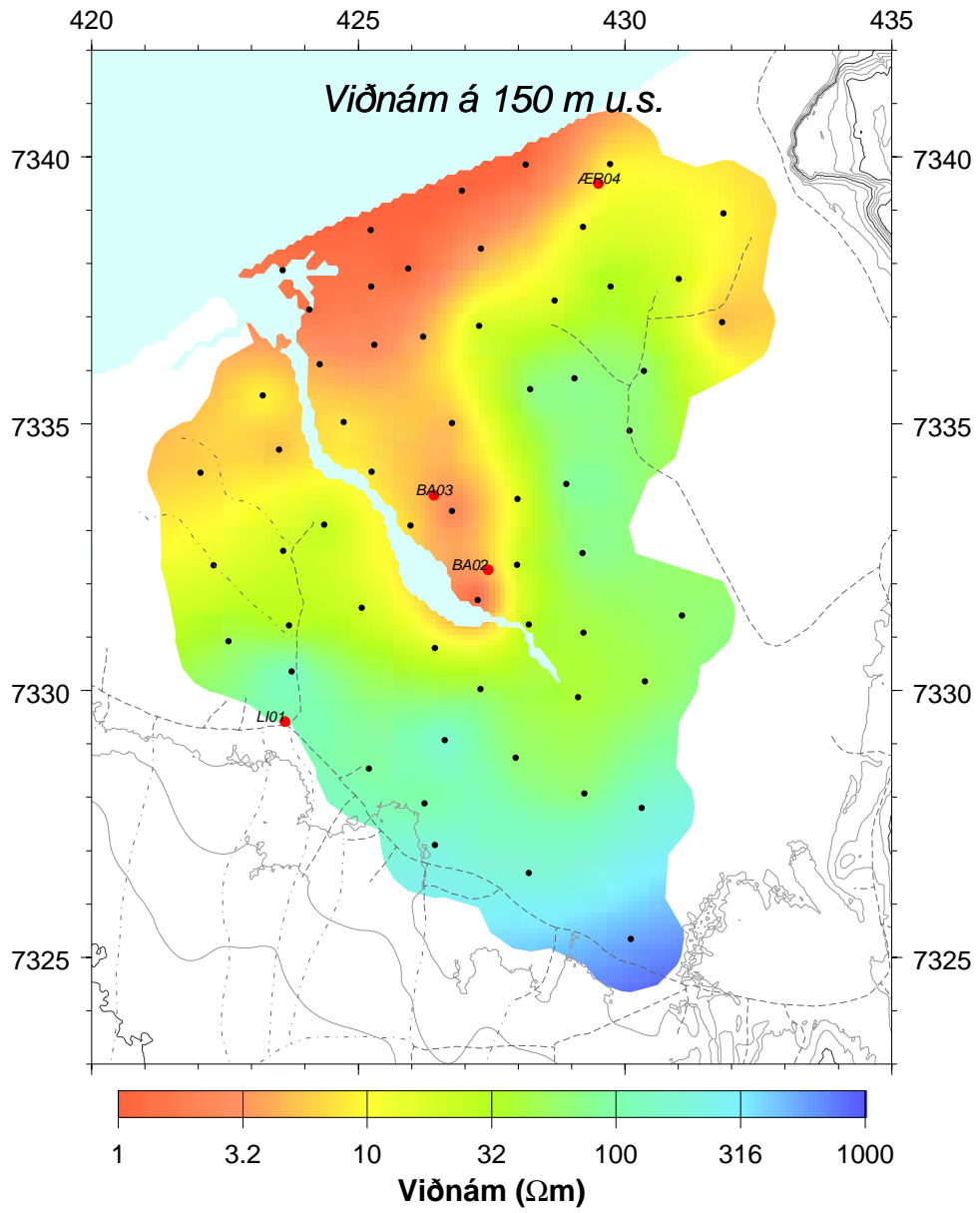


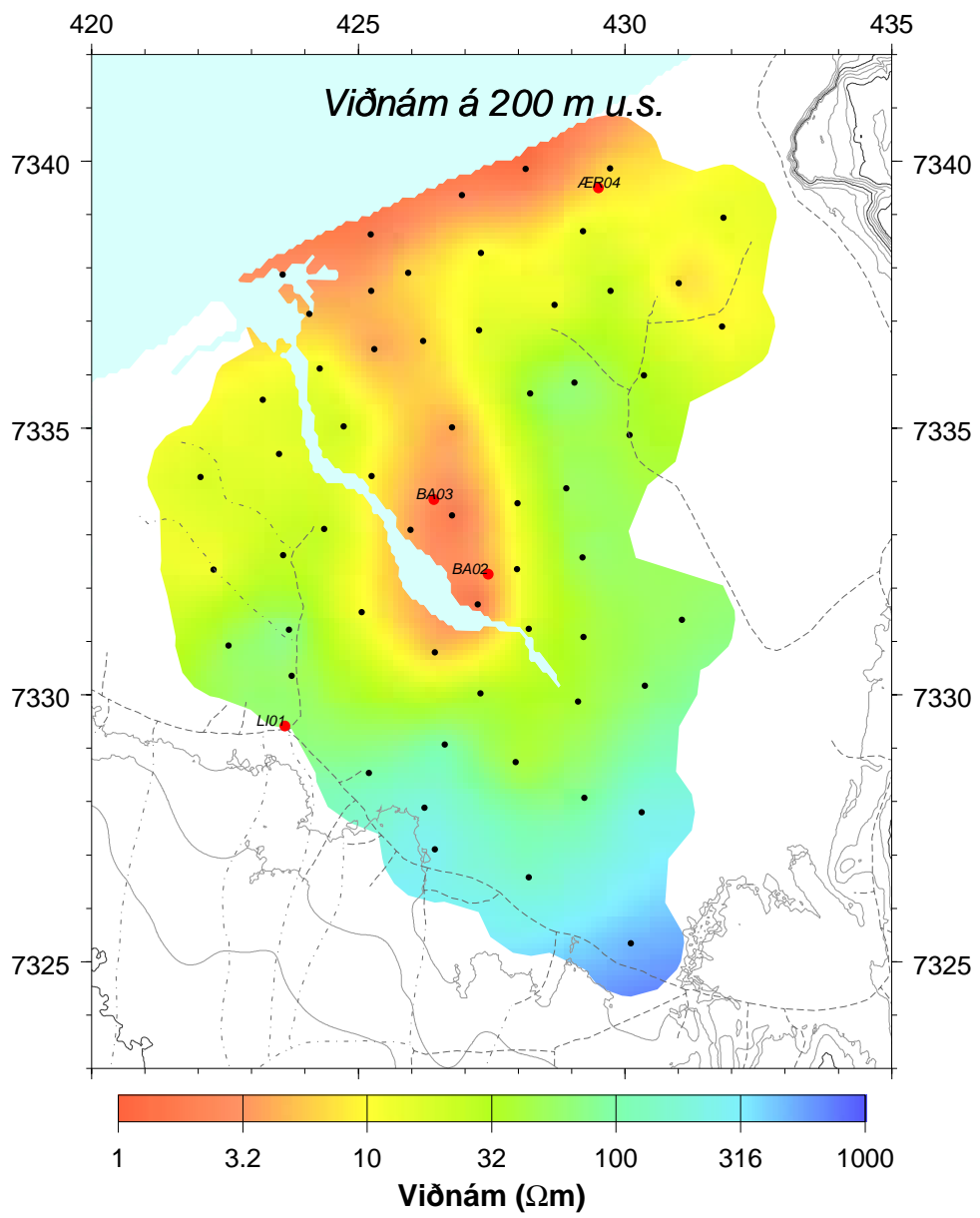


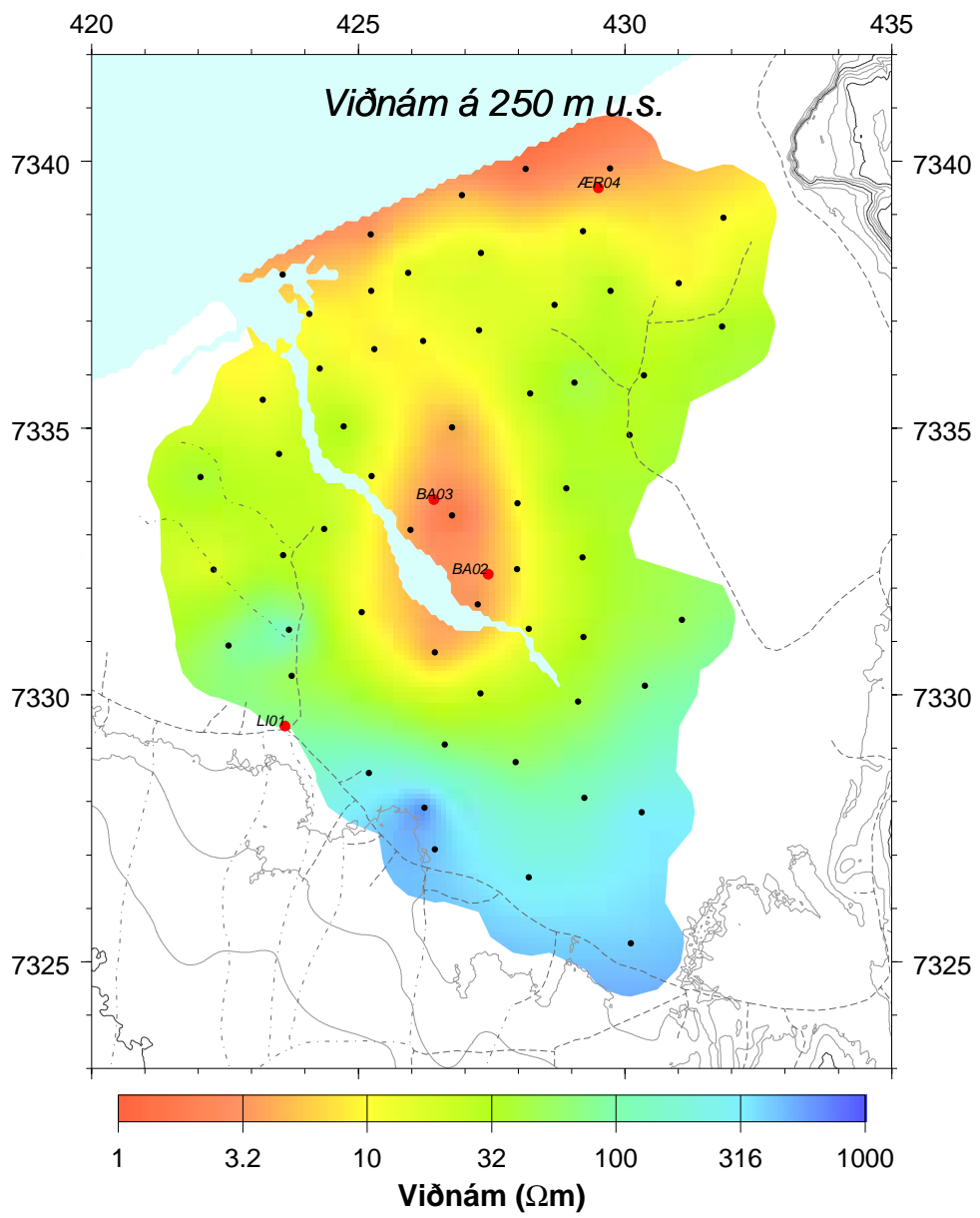
VIÐAUKI III: Viðnámskort

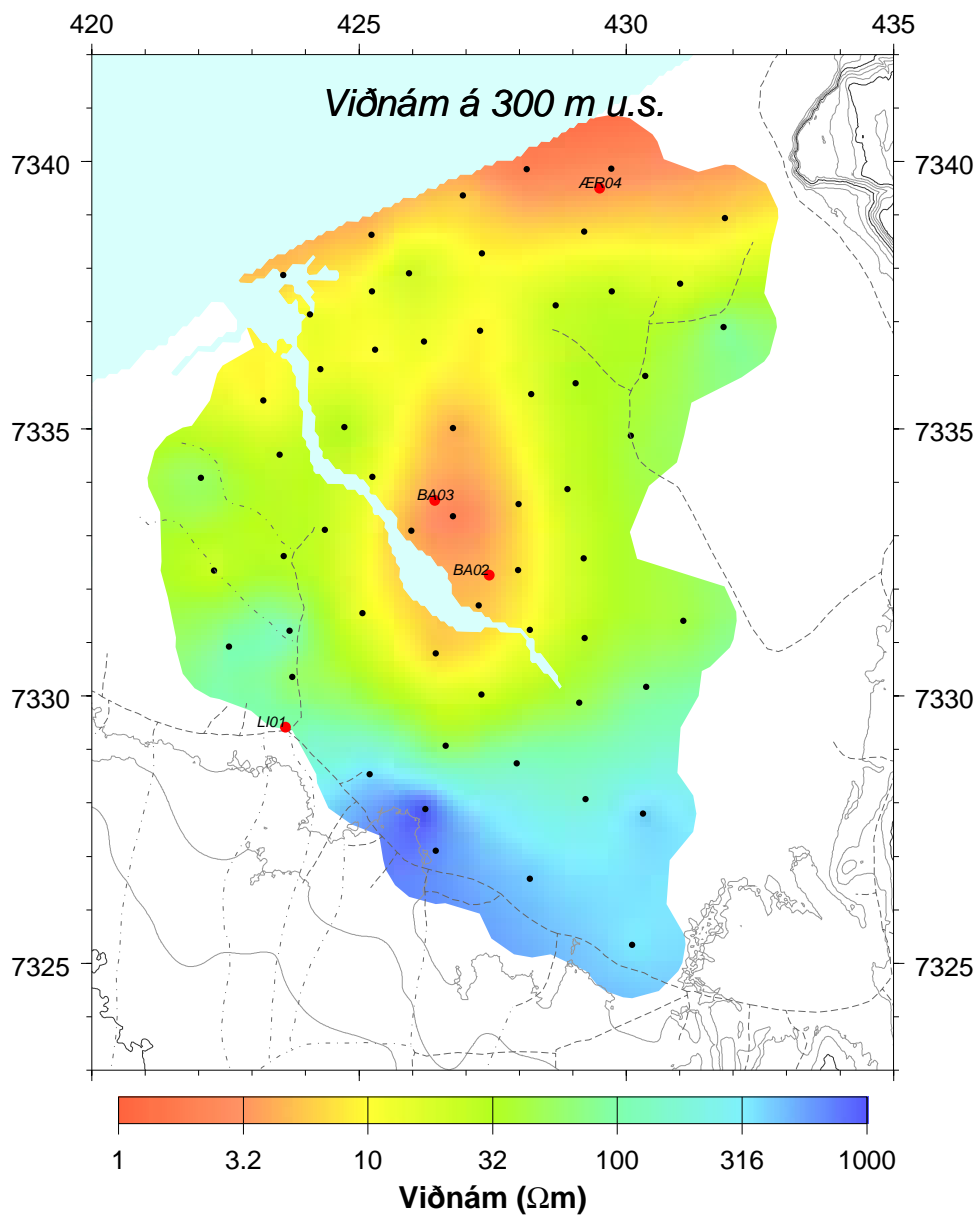


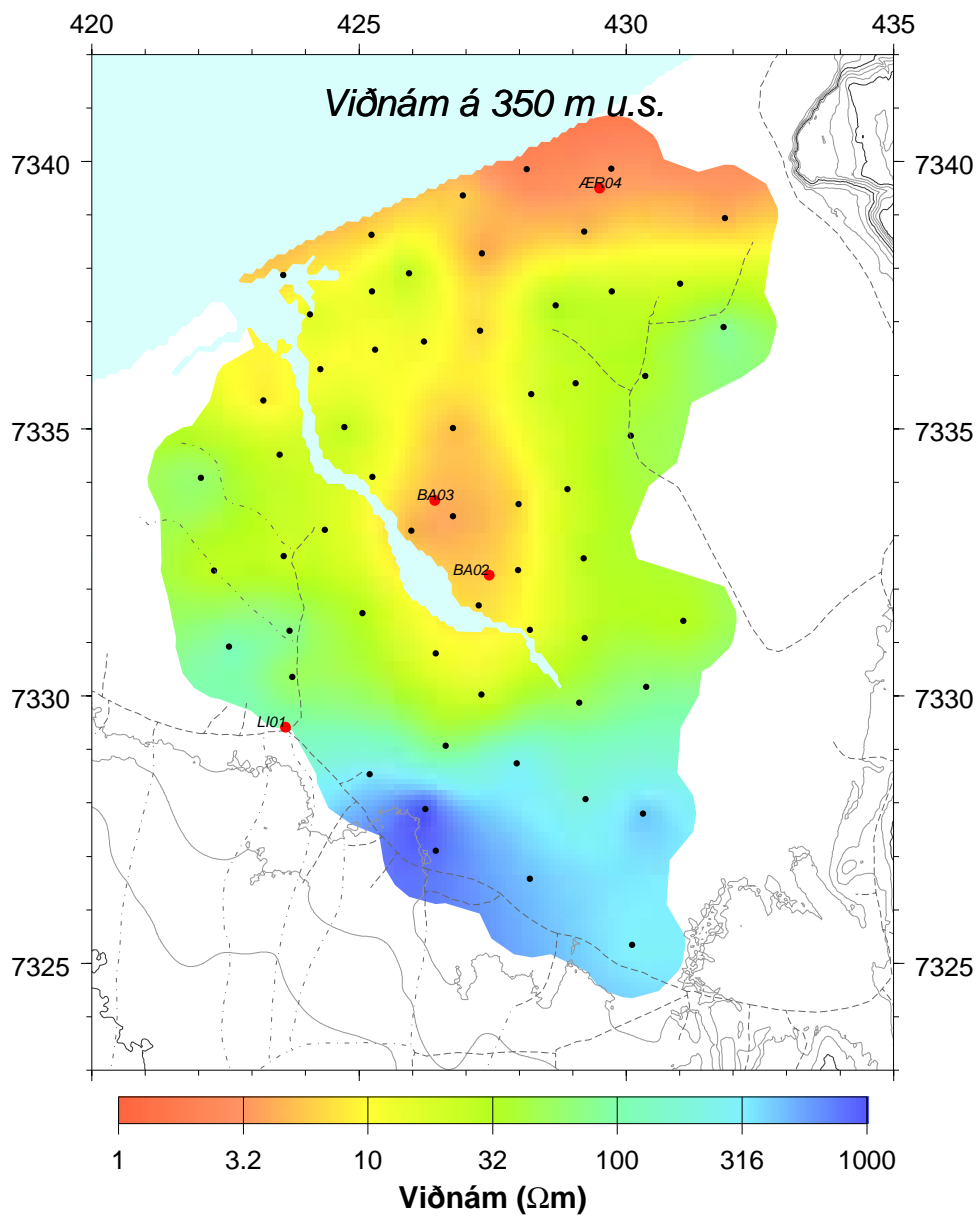


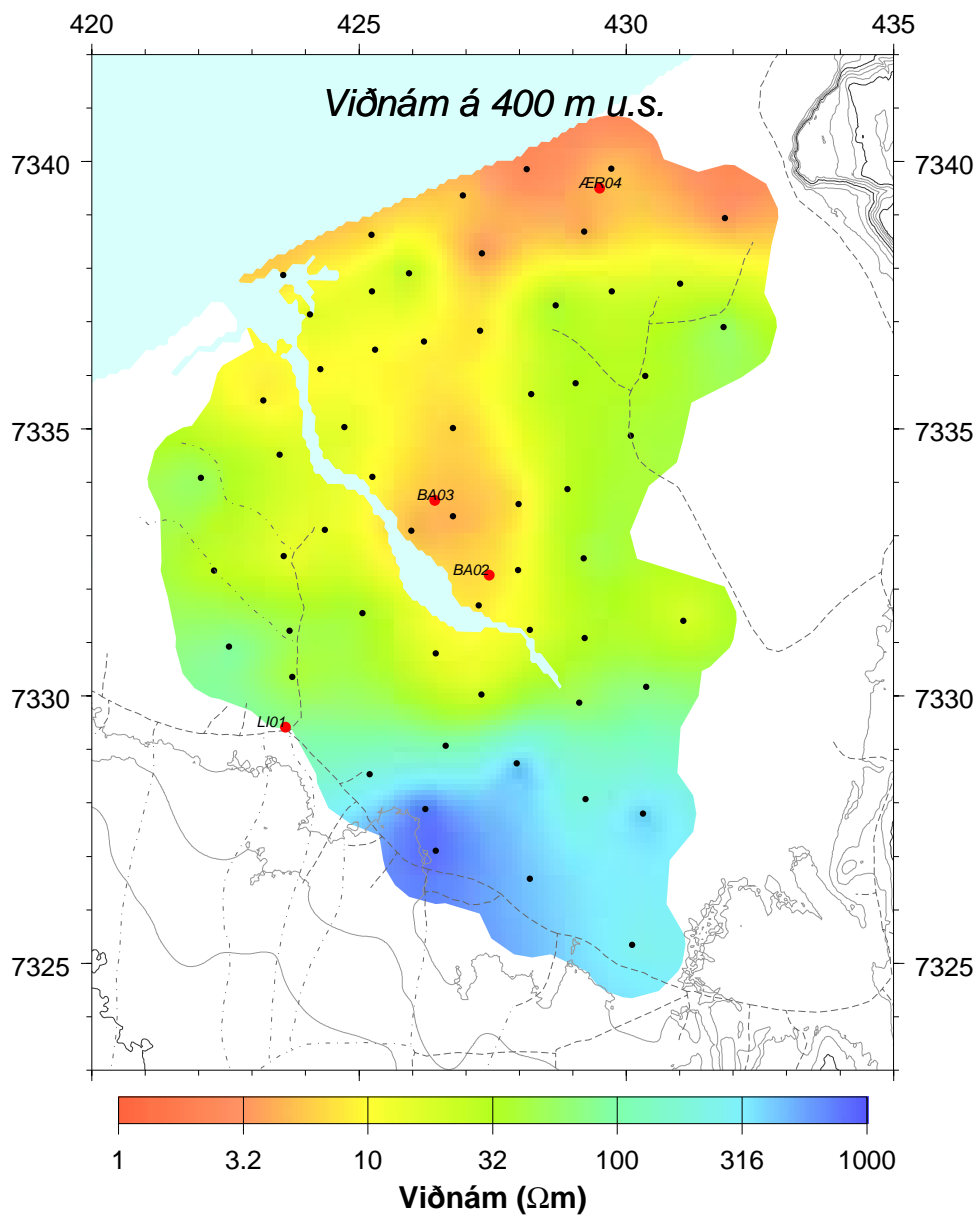


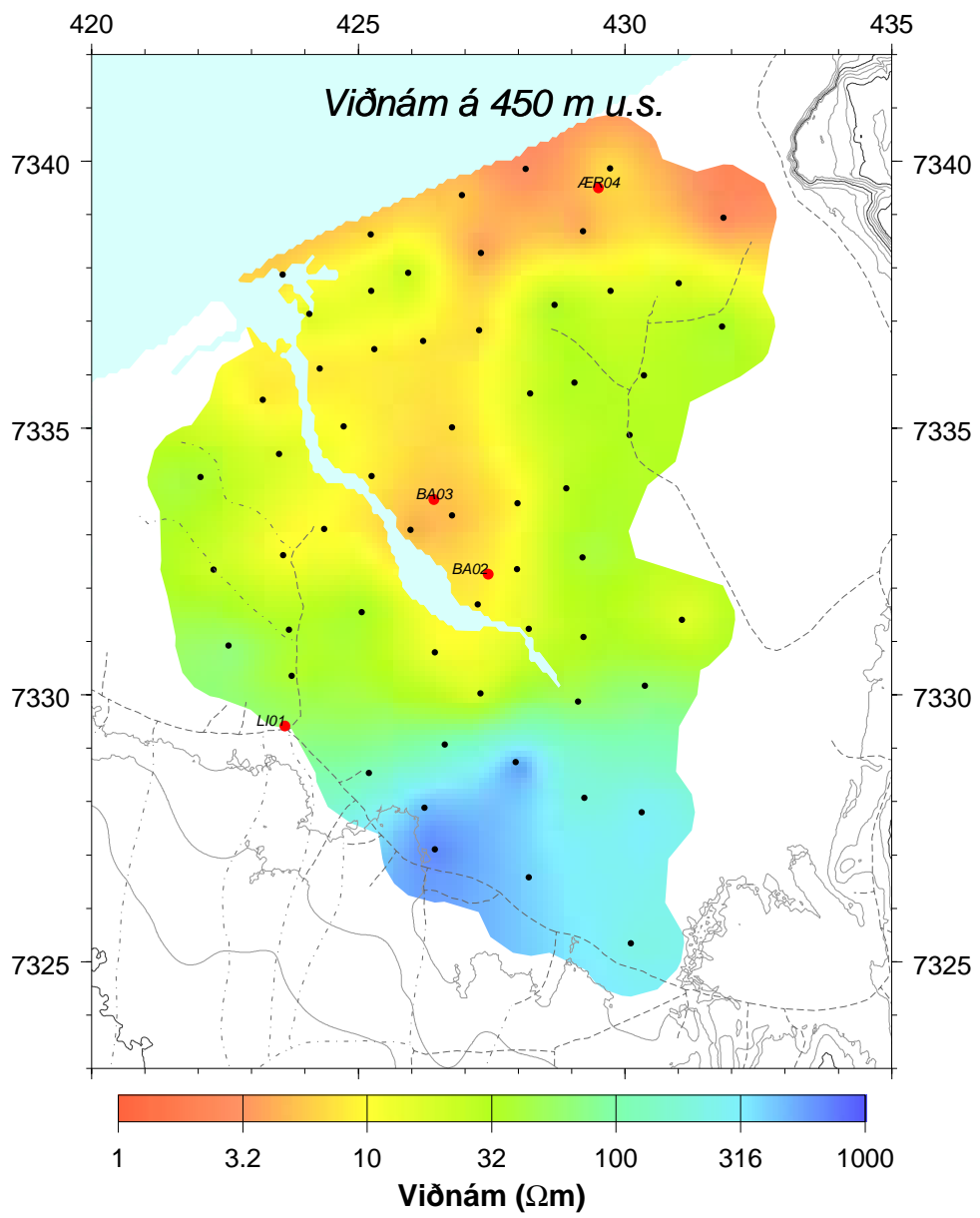


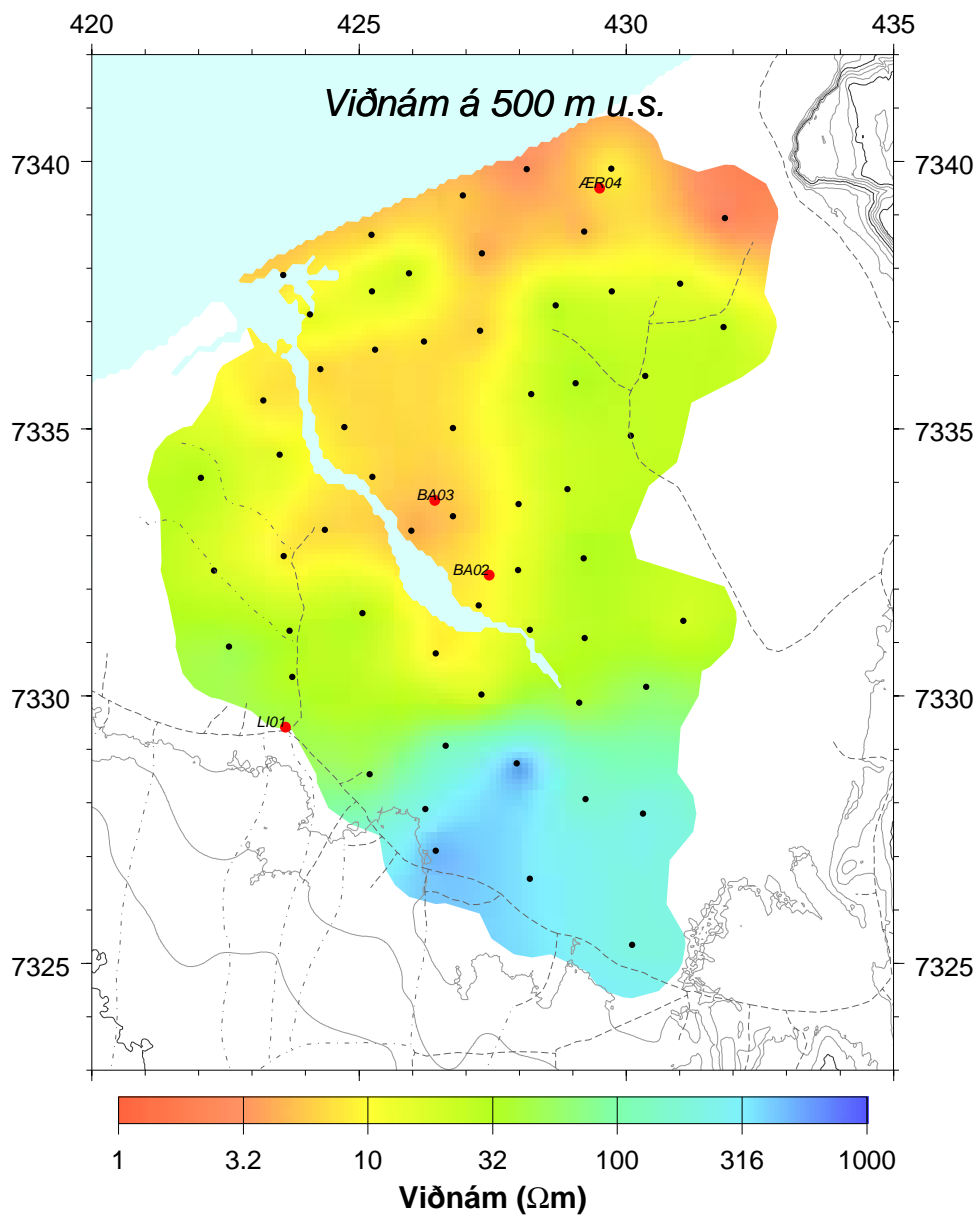


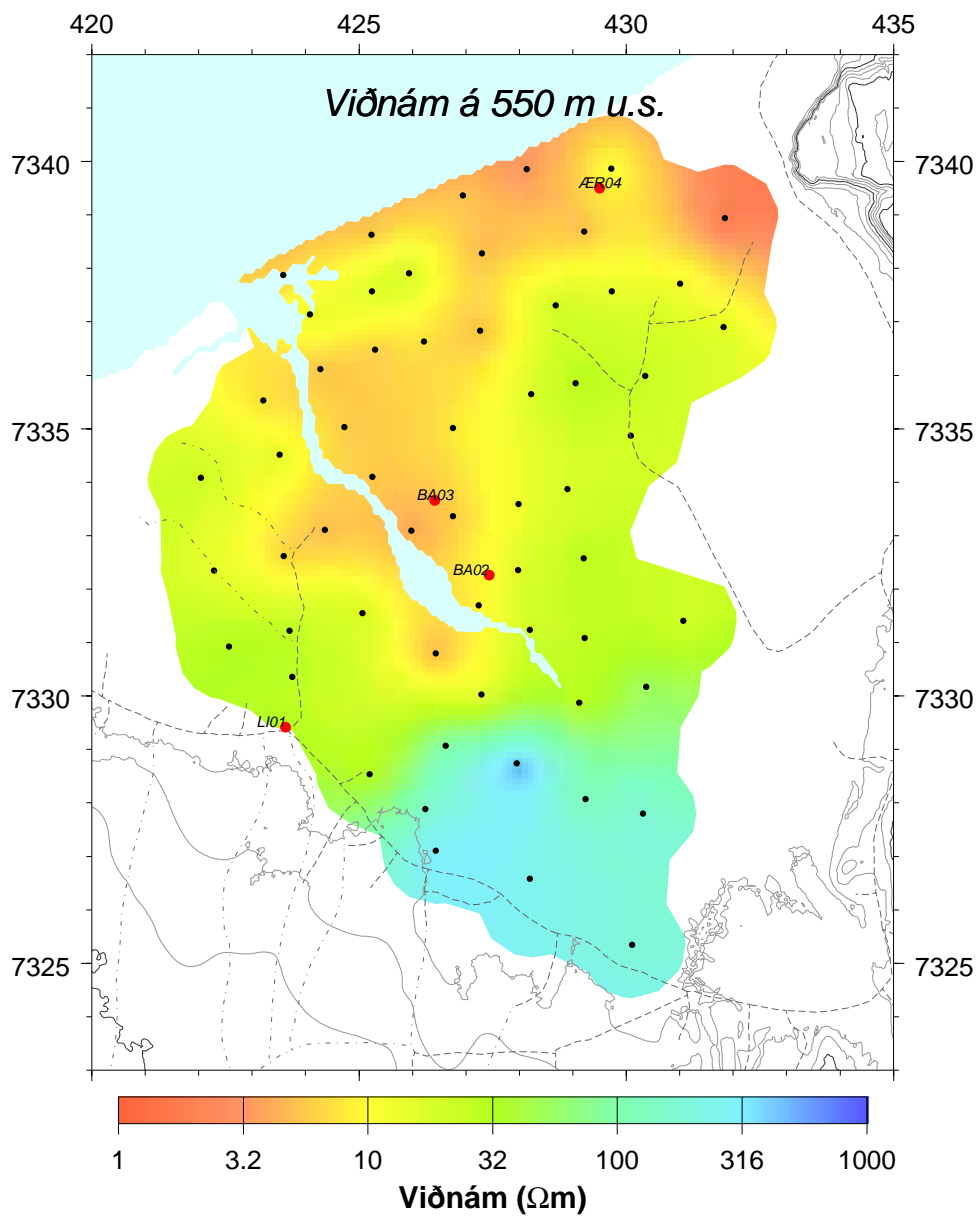


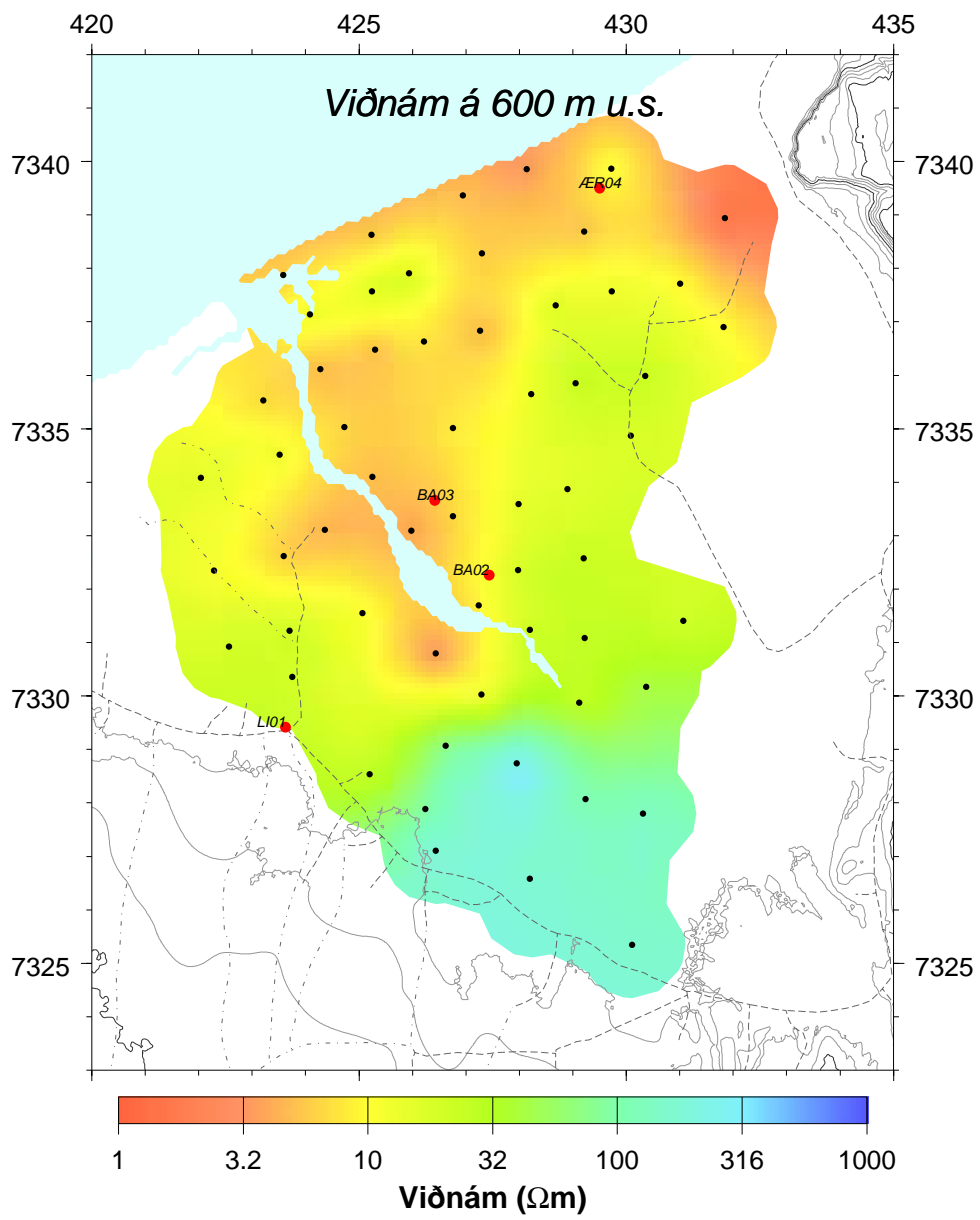


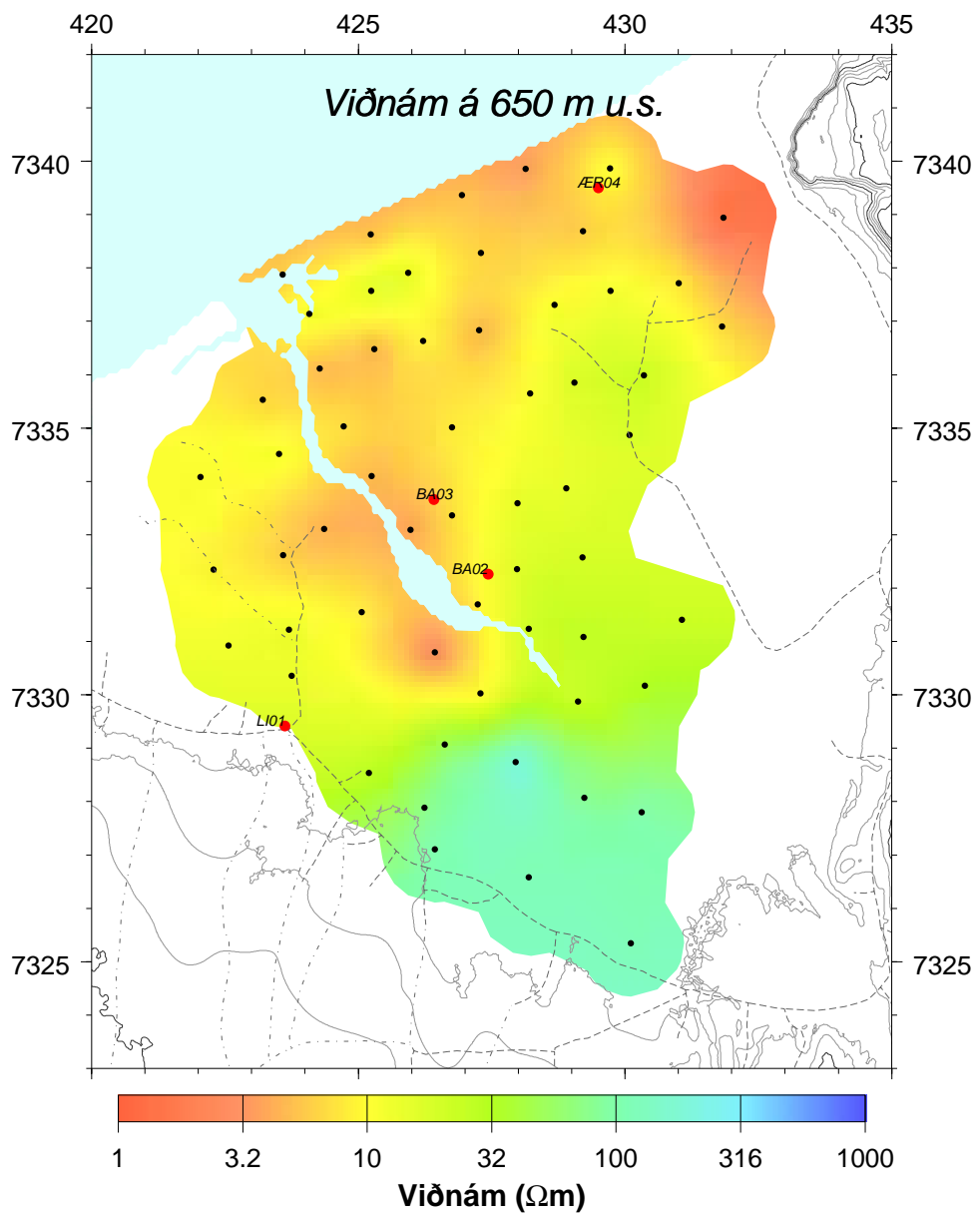


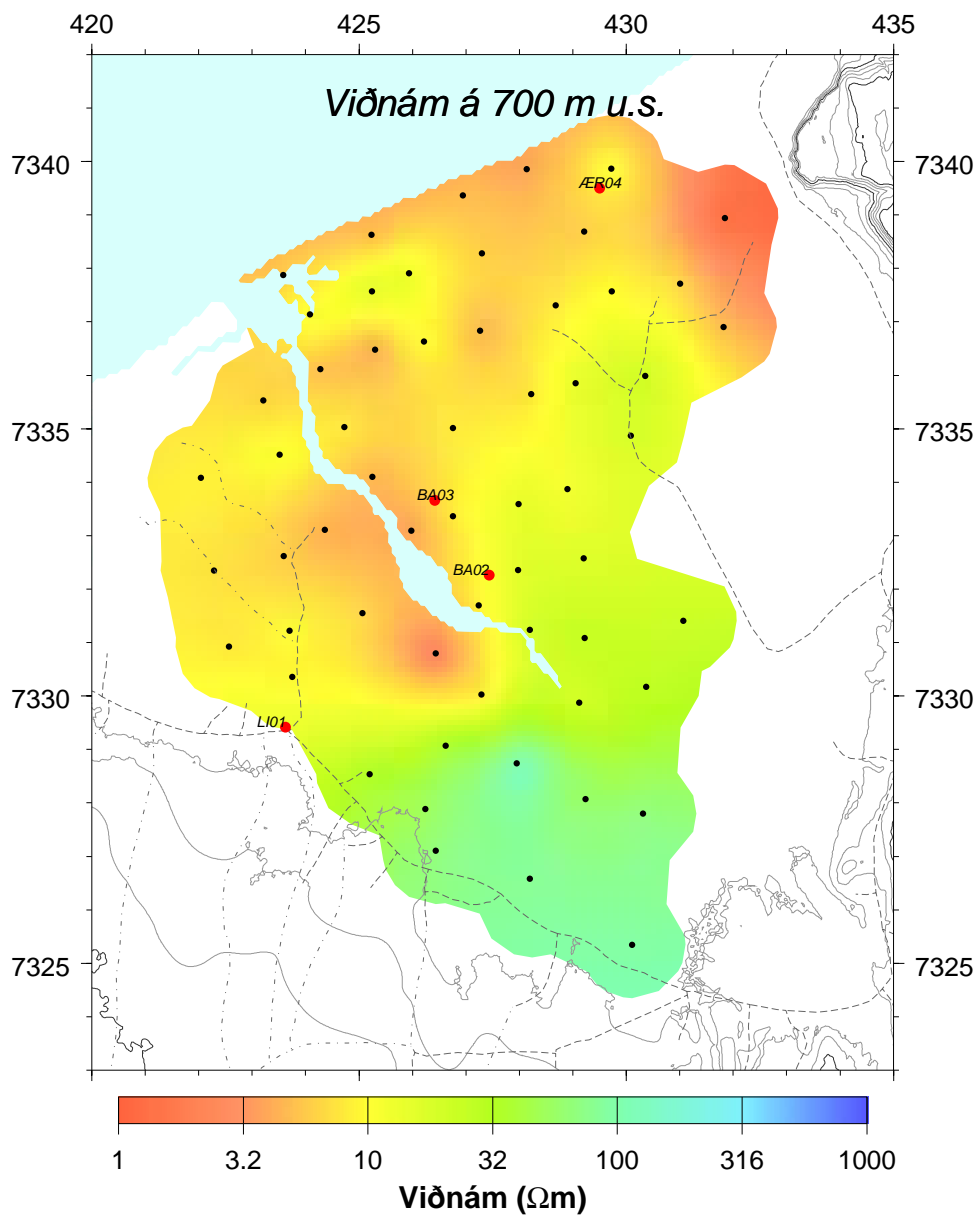


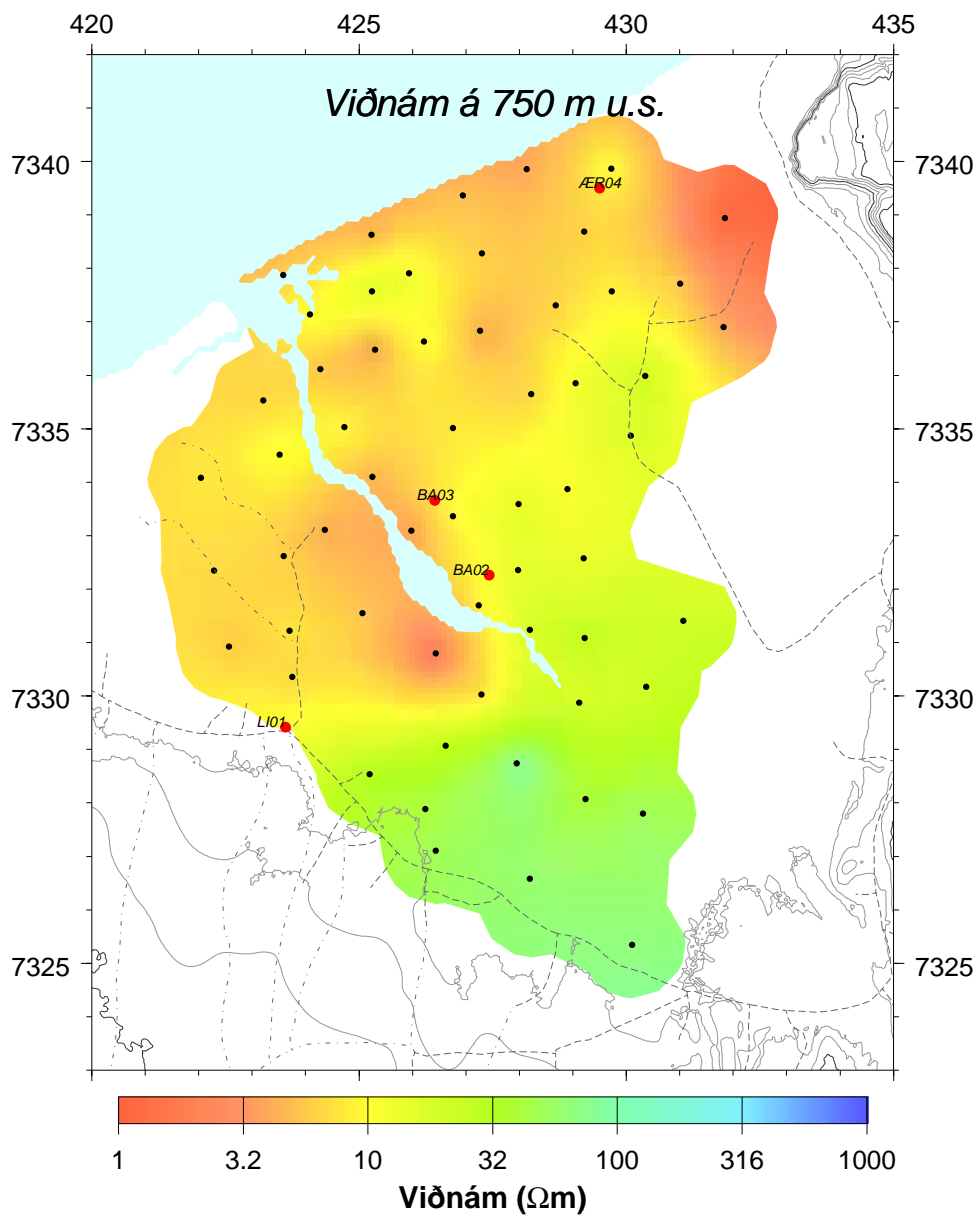


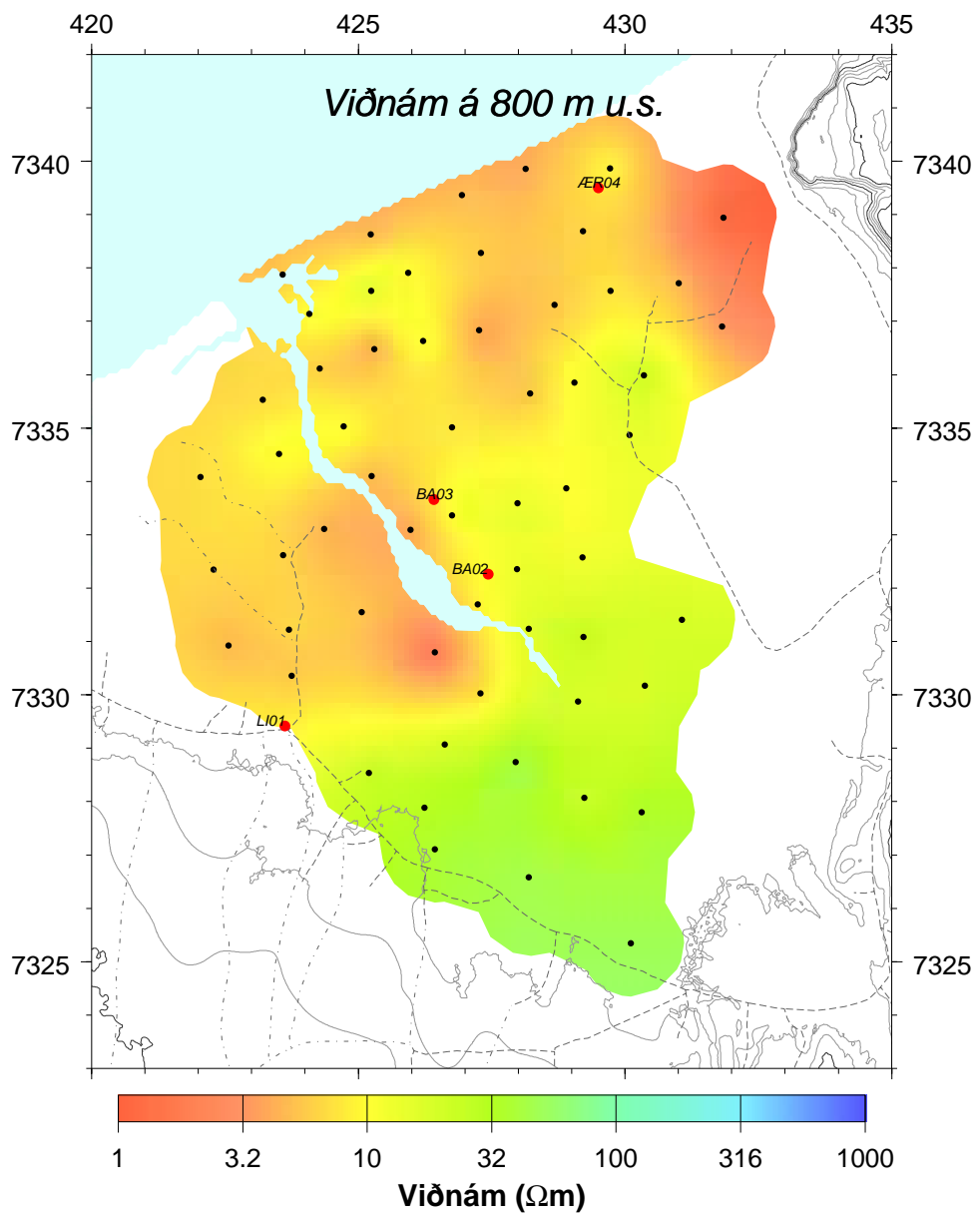












VIÐAUKI IV: Mæliferlar og túlkun þeirra

