



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

ÚTLÁN
Bókasafn Orkustofnunar

ÚTLÁN
Bókasafn Orkustofnunar

Niðurstöður viðnámsmælinga í Kröflu

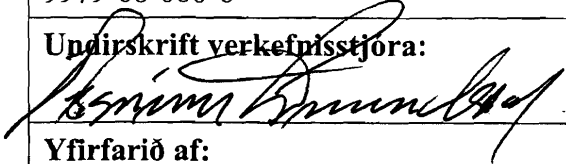
**Knútur Árnason
Ingvar Þór Magnússon**

Unnið fyrir Landsvirkjun

2001

OS-2001/062

OS-2001/062

Skýrsla nr.: OS-2001/062	Dags.: Október 2001	Dreifing: ☒ Opin ☐ Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGA Í KRÖFLU		Upplag: 30 Fjöldi síðna: 72 + viðauki
Höfundar: Knútur Árnason Ingvar þór Magnússon		Verkefnisstjóri: Ásgrímur Guðmundsson
Gerð skýrslu / Verkstig: Rannsókn háhitasvæðis, niðurstöður viðnámsmælinga		Verknúmer: 8-630664
Unnið fyrir: Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Í skýrslunni er gerð grein fyrir niðurstöðum viðnámsmælinga á Kröflusvæðinu árið 1999 og samtúlkun þeirra og eldri viðnámsmælinga á svæðinu. Verkið er unnið fyrir Landsvirkjun og er liður í könnun á umfangi jarðhitans við Kröflu. Gefin er heildarmynd af viðnámsskipan í efsta kílómetra jarðskorpunnar innan Kröfluöskjunnar og allra næsta nágrennis. Niðurstöður mælinganna benda til að á Kröflusvæðinu séu fjögur, að einhverju leyti aðskilin, meginviðnámsfrávik - lágt viðnám með hærra fyrir neðan - tengd jarðhitavirkni. Líklegt er að viðnámsfrávikin endurspegli að einhverju leyti sjálfstæð uppstreymis-svæði með eigin varmagjöfum, og er gerð grein fyrir sérkennum hvers svæðis. Nokkuð kemur á óvart að mælingarnar sýna ekki viðnámsfrávik sem benda til virks jarðhita um og suðvestur af Hvannstöði, en þar gæti verið um að ræða gamalt jarðhitakerfi. Einnig kom á óvart að undir Hágöngum kom fram afgerandi, víðáttumikið viðnámsfrávik, sem gefur til kynna virkt háhitakerfi, en þar sjást engin jarðhitaummerki á yfirborði.		
Lykilorð: Háhitasvæði, jarðhiti, viðnámsmælingar, eðlisviðnám, viðnámsennið, jafnviðnámskort, Krafla	ISBN-númer: 9979-68-080-6 Undirskrift verkefnisstjóra:  Yfirfarið af: ÁsG, Guðm. Böðvarsson	



ORKUSTOFNUN
Rannsóknasvið

Verknr. 8-630664

Knútur Árnason
Ingvar Þór Magnússon

Niðurstöður viðnámsmælinga í Kröflu

Unnið fyrir Landsvirkjun

OS-2001/062

Október 2001

ISBN 9979-68-080-6

ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ

Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. - Sími 569 6000 - Fax 568 8896

Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0999

Netfang os@os.is - Veffang <http://www.os.is>

ÁGRIP

Í þessari skýrslu eru birtar niðurstöður viðnámsmælinga Orkustofnunar á Kröflusvæðinu og gefin heildarmynd að viðnámsskipan í efsta kílómetra jarðskorpunnar innan öskjunnar og allra næsta nágrennis. Niðurstöðurnar byggja einkum á einvíðri túlkun TEM-mælinga frá árunum 1991, 1993 og 1999, en á nokkrum stöðum er stuðst við niðurstöður eldri Schlumberger- og viðnámsniðsmælinga.

Ofan sjávarmáls sýna mælingarnar þrjú, að mestu aðskilin, viðnámsfrávik með lágu viðnámi og hærra undir. Það stærsta þeirra teygir sig frá Kröflu og suðurhlíðum hennar og Kröfluhálsi í suðaustri og norðvestur yfir Leirhnúk og langleiðina að Hvannstóði. Austurmörk þess, norðan Kröflu, eru mjög skörp og breytast lítið með dýpi. Eins breytast suðvestur-mörkin, um Grænagil, Leirbotna og sunnanverðan Leirhnúk, lítið með dýpi niður undir sjávarmál. Annað viðnámsfrávik er undir Leirhnúkshrauni, vestur af Þríhyrningum og þaðan til suðurs undir Dalfjalli, eins langt og mælingar ná. Þriðja frávikið er undir sunnanverðum Hágöngum og undir Sandabotnum. Þetta frávik tengist reyndar suðurhlíðum Kröflu, um 200 m ofan sjávarmáls, en þó er greinilegt hik austan Kröflu. Frávikið hefur ekki verið afmarkað til norðausturs, til þess þarf frekari mælingar.

Um sjávarmál kemur fram fjórða viðnámsfrávikið undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og Sandabotnaskraði, sem virðist að einhverju leyti aðskilið frá öðrum frávikum. Þegar dýpra kemur, fara frávikin að tengjast saman og 400 m neðan sjávarmáls kemur fram samfelt, en nokkuð óreglulegt frávik sem er um 48 km² að flatarmáli. Frá Hlíðardal og norðauastur undir vestanvert Sandabotnafjall er vik inn í viðnámsfrávikið, þar sem viðnámsmælingar sýna ekki merki um háhitavirkni. Ofantalin viðnámsfrávik eru talin geta endurspeglað, að einhverju leyti, aðskilin uppstreymissvæði jarðhitavökva. Þegar dýpra kemur sjá viðnámsmælingar hinsvegar umfangsmikið og samhangandi jarðhitakerfi.

Nokkuð kom á óvart að viðnámsmælingarnar sýndu ekki lágt viðnám í vestasta hluta öskjunnar, við og suðvestur af Hvannstóði. Almennt er talið að þar hafi verið háhitakerfi, en viðnámsmælingarnar sjá ekki merki um virkan jarðhita þar nú. Hið afgerandi og víðáttumikla viðnámsfrávik undir Hágöngum kom einnig verulega á óvart. Þar sjást eingin merki jarðhita á yfirborði, en frávikið ber öll einkenni virks háhita og í ljósi þess að ekki sást lágvíðnám vestast í öskjunni, verður að telja líklegt að þarna sé nú að finna jarðhita. Hvort svo er verður hinsvegar ekki sannreynt nema með rannsóknarborunum.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. FRAMKVÆMD MÆLINGA 1999	6
3. ÚRVINNSLA OG TÚLKUN MÆLINGA	11
3.1 Þrívíð áhrif	11
4. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA	13
5. VIÐNÁMSSKIPAN Á KRÖFLUSVÆÐINU	15
5.1 Viðnámssnið	15
5.1.1 Umræða um viðnámssnið	16
5.2 Viðnámskort	44
5.2.1 Umræða um viðnámskort	44
6. UMRÆÐA UM VIÐNÁMSSKIPANINA	59
6.1 Samband viðnáms, ummyndunar og hitastigs	59
6.2 Útbreiðsla jarðhitavirkinnar	61
7. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR OG ALMENN UMRÆÐA	65
8. HEIMILDIR	69
ENGLISH SUMMARY	71
VIÐAUKI: TEM-mælingar og einvíð túlkun þeirra	73

TÖFLUR

Tafla 1. TEM-mælingar við Kröflu 1999	8
---------------------------------------	---

MYNDIR

Mynd 1. Staðsetning viðnámsmælinga á Kröflusvæði	10
Mynd 2. Lega viðnámssniða	20
Mynd 3. Norður-suður snið NS13	21
Mynd 4. Norður-suður snið NS14	22
Mynd 5. Norður-suður snið NS15	23
Mynd 6. Norður-suður snið NS16	24
Mynd 7. Norður-suður snið NS17	25
Mynd 8. Norður-suður snið NS18	26
Mynd 9. Norður-suður snið NS19	27

Mynd 10. Norður-suður snið NS20	28
Mynd 11. Norður-suður snið NS21	29
Mynd 12. Norður-suður snið NS22	30
Mynd 13. Norður-suður snið NS23	31
Mynd 14. Norður-suður snið NS24	32
Mynd 15. Norður-suður snið NS25	33
Mynd 16. Austur-vestur snið AV85	34
Mynd 17. Austur-vestur snið AV86	35
Mynd 18. Austur-vestur snið AV87	36
Mynd 19. Austur-vestur snið AV88	37
Mynd 20. Austur-vestur snið AV89	38
Mynd 21. Austur-vestur snið AV90	39
Mynd 22. Austur-vestur snið AV91	40
Mynd 23. Austur-vestur snið AV92	41
Mynd 24. Austur-vestur snið AV93	42
Mynd 25. Austur-vestur snið AV94	43
Mynd 26. Eðlisviðnam 500 m ofan sjávarmáls	47
Mynd 27. Eðlisviðnam 400 m ofan sjávarmáls	48
Mynd 28. Eðlisviðnam 300 m ofan sjávarmáls	49
Mynd 29. Eðlisviðnam 200 m ofan sjávarmáls	50
Mynd 30. Eðlisviðnam 100 m ofan sjávarmáls	51
Mynd 31. Eðlisviðnam við sjávarmál	52
Mynd 32. Eðlisviðnam 100 m neðan sjávarmáls	53
Mynd 33. Eðlisviðnam 200 m neðan sjávarmáls	54
Mynd 34. Eðlisviðnam 300 m neðan sjávarmáls	55
Mynd 35. Eðlisviðnam 400 m neðan sjávarmáls	56
Mynd 36. Eðlisviðnam 500 m neðan sjávarmáls	57

1. INNGANGUR

Sögu viðnámsmælinga á Kröflusvæðinu má rekja aftur til ársins 1970. Á árunum 1970 til 1977 voru gerðar allmargar Schlumbergermælingar þar og voru niðurstöður þeirra teknar saman í skýrslu árið 1978 (Ragna Karlsdóttir o.fl., 1978). Dreifing mælinganna var nokkuð ójöfn vegna hrauna á yfirborði og erfiðs aðgengis og gáfu þær því einungis gróft yfirlit um jarðhitavirknina. Árið 1983 voru gerðar all ýtarlegar jafnstraumsmælingar (Schlumberger- og viðnámsniðsmælingar) til könnunar á Hvíthólasvæðinu (Knútur Árnason o.fl., 1984).

Með tilkomu TEM-mælinga var þráðurinn tekinn upp að nýju og árin 1991 og 1993 voru gerðar 49 TEM-mælingar í austurhluta Kröfluöskjunnar. TEM-mælingar er auðveldast að gera á vélsleðum að vetrarlagi og hægt er að dreifa mælingum mun reglulegar um mælisvæðið þegar jörð er þakin snjó. Árið 1996 voru niðurstöður allra viðnámsmælinga, sem gerðar höfðu verið í austurhluta Kröfluöskjunnar, teknar saman í skýrslu (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996). Í þeirri samantekt kom fram mun skýrari mynd af háhitavirkninni í efsta kílómetranum í austurhluta öskjunnar en áður hafði sést, og var unnt að greina þar ýmis smáatriði sem tengja mátti við eldvirkni og innra ástand jarðhitakerfisins. Vesturhluti öskjunnar var hinsvegar nánast ókannaðður, að öðru leyti en því að til voru nokkrar stakar Schlumbergermælingar við Hvannstöð og vesturjaðar öskjunnar. Bæði var að áhuginn hafði einkum beinst að austurhlutanum þar sem jarðhitavirkni er á yfirborði, og eins var erfitt að beita eldri aðferðum í vesturhluta öskjunnar þar sem hann er þakinn ungum hraunum sem eru mjög ógreiðfær að sumarlagi.

Vegna vaxandi orkumarkaðar og góðs árangurs af borunum til gufuöflunar fyrir seinni vél Kröfluvirkjunar komu fram hugmyndir um hugsanlega stækkun núverandi virkjunar, eða nýja virkjun á Kröflusvæðinu. Nauðsynleg forsenda þess að hægt sé að leggja mat á slíka möguleika er að fá heildaryfirlit yfir jarðhitavirknina og hugsanleg ný vinnslusvæði. Því var ákveðið að gera frekari viðnámsmælingar á Kröflusvæðinu til að fá slíkt heildaryfirlit. Árið 1999 voru því gerðar 89 TEM-mælingar, þar sem athyglinni var einkum beint að vesturhluta öskjunnar, sem fram til þessa hafði verið lítið sem ekki kortlagður með viðnámsmælingum. Einnig var mælinganetið þétt nokkuð í austurhluta öskjunnar og aukið til austurs. Úrvinnslu mælinganna er nú lokið og eru niðurstöðurnar birtar í þessari skýrslu, ásamt niðurstöðum eldri mælinga. Hér er því reynt að gefa yfirlit yfir jarðhitavirknina á Kröflusvæðinu, eins og hún kemur fram í viðnámsmælingum.

2. FRAMKVÆMD MÆLINGA 1999

Mælingarnar fóru fram á tímabilinu frá 23. mars til 23. apríl. Þær voru gerðar af tveimur starfsmönnum Orkustofnunar á tveimur vélsleðum. Í fyrstu voru nokkrir örðugleikar vegna bilana í straumsendi mælitækjanna. Var þá brugðið á það ráð að fá annan straumsendi erlendis frá og varð um viku töf á mælingum meðan beðið var eftir að tækið kæmi til landsins. Eftir það gengu mælingarnar vel, en þó urðu nokkrar frátafir vegna veðurs. Virkir mælingadagar voru um 22 og alls voru gerðar 89 mælingar þannig að meðalafköst voru rúmlega 4 mælingar á dag.

Meðan á mælingum stóð voru mæligögn send til Orkustofnunar með tölvupósti að loknum hverjum mælidegi. Þar voru gögnin yfirfarin og gróftúlkuð jafnóðum til að tryggja að þau væru á engan hátt gölluð, og eins til þess að hægt væri að taka ákvarðanir um hvort ástæða væri til að breyta út af upphaflegri áætlun um staðsetningu mælinga, svo sem hvort ástæða væri til að þétta mælinetið eða útvíkka það á einstökum stöðum.

Á mynd 1 eru sýnd staðsetning mælinganna frá 1999 og í töflu 1 er staðsetningarnar gefnar í UTM-hnitum ásamt hæð yfir sjó. Mælingarnar frá 1999 eru auðkenndar með sex tölustöfum. Í seinni tíð hefur skapast sú hefð að láta TEM-mælingar taka nafn eftir staðsetningu þeirra. Fyrstu þrír tölustafirnar í nafni mælinganna gefa austur UTM-hnit mælingarinnar í hundruðum metra (þ.e. upp á 100 m) og seinustu þrír stafirnir norður UTM-hnit í hundruðum metra. Mæling sem hefur austur UTM-hnitin 8419279 og norður hnitin 7289821 fær nafnið 192898, þ.e. fyrstu tveimur tölustöfunum í UTM-hnitunum er sleppt og eins er tveimur síðustu tölustöfunum, sem gefa staðsetninguna innan hundrað metra, sleppt.

Á mynd 1 er einnig sýnd staðsetning eldri mælinga sem notaðar voru í skýrslunni frá 1996 og eru þær einnig notaðar í þessari samantekt. Þar er bæði um að ræða TEM-mælingar frá 1991 og 1993 og eins nokkrar eldri jafnstraumsmælingar. Hnit og hæðir þessara eldri mælinga er að finna í töflum í skýrslunni frá 1996 (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996).

Tafla 1. TEM-mælingar við Kröflu 1999.

Heiti	Dagsetning	A-hnit	N-hnit	Hæð (m y.s.)
160910	23.03.1999	8415959	7290999	520
160900	23.03.1999	8415976	7289935	505
160890	23.03.1999	8416109	7288990	505
160930	24.03.1999	8416050	7292996	520
160920	24.03.1999	8416054	7291989	530
160880	25.03.1999	8416054	7287911	490
160940	26.03.1999	8415986	7293957	510
160860	26.03.1999	8416029	7286086	460
160870	26.03.1999	8416042	7287043	475
167900	27.03.1999	8416678	7290046	520
150900	28.03.1999	8415044	7289996	505
173900	28.03.1999	8417340	7289954	530
142902	30.03.1999	8414252	7290027	520
130900	31.03.1999	8413036	7289959	545
150890	31.03.1999	8415020	7289030	495
170890	06.04.1999	8417030	7289000	531
129890	07.04.1999	8412829	7289084	577
128882	07.04.1999	8412832	7288164	580
130920	07.04.1999	8413082	7292032	517
141879	07.04.1999	8414069	7287844	547
150920	07.04.1999	8414938	7292005	515
150880	07.04.1999	8415021	7288028	494
176887	07.04.1999	8417591	7288718	529
140910	08.04.1999	8414050	7291016	545
145932	08.04.1999	8414522	7293204	519
170920	08.04.1999	8416906	7291996	540
170940	08.04.1999	8417056	7294013	521
175908	08.04.1999	8417466	7290804	548
180940	08.04.1999	8417994	7293985	527
180920	08.04.1999	8418013	7292009	555
152870	09.04.1999	8415141	7286943	490
152859	09.04.1999	8415142	7285931	487
157852	09.04.1999	8415331	7285163	458
165850	09.04.1999	8416546	7284977	461

Tafla 1. framhald. TEM-mælingar við Kröflu 1999.

Heiti	Dagsetning	A-hnit	N-hnit	Hæð (m y.s.)
166865	10.04.1999	8416614	7286632	470
170857	10.04.1999	8416938	7285775	460
172852	10.04.1999	8417280	7285153	493
174860	10.04.1999	8417464	7285977	495
175864	10.04.1999	8417739	7286479	457
171870	11.04.1999	8417149	7287004	470
177914	12.04.1999	8417746	7291380	556
182915	12.04.1999	8418234	7291480	551
130910	14.04.1999	8413037	7291026	545
140920	14.04.1999	8414084	7292000	525
151928	14.04.1999	8415149	7292846	525
154938	14.04.1999	8415402	7293874	513
170930	14.04.1999	8417004	7292961	530
180929	14.04.1999	8418057	7292897	560
149909	18.04.1999	8414905	7290928	495
169901	18.04.1999	8416935	7291059	495
130858	19.04.1999	8412935	7285852	465
131869	19.04.1999	8413085	7286876	503
138856	19.04.1999	8413768	7285619	450
140869	19.04.1999	8414007	7286918	485
140891	19.04.1999	8414007	7289159	568
146848	19.04.1999	8414607	7284781	435
201833	20.04.1999	8420066	7283298	437
229853	20.04.1999	8422895	7285302	500
229864	20.04.1999	8422907	7286383	520
235891	20.04.1999	8423561	7289081	575
236866	20.04.1999	8423600	7286600	550
240878	20.04.1999	8423868	7287771	570
241886	20.04.1999	8424031	7288582	446
195855	21.04.1999	8419505	7285524	515
200853	21.04.1999	8420179	7285296	497
206858	21.04.1999	8420578	7285918	500
211851	21.04.1999	8420943	7285174	505
211857	21.04.1999	8421162	7285793	520
217859	21.04.1999	8421690	7285984	500
217869	21.04.1999	8421825	7286877	508

Tafla 1. framhal. TEM-mælingar við Kröflu 1999.

Heiti	Dagsetning	A-hnit	N-hnit	Hæð (m y.s.)
231882	21.04.1999	8423079	7288247	585
237872	21.04.1999	8423667	7287294	535
188855	22.04.1999	8418741	7285622	435
202862	22.04.1999	8420200	7286226	480
221876	22.04.1999	8422070	7287687	548
230889	22.04.1999	8423010	7288922	578
235857	22.04.1999	8423512	7285667	505
242899	22.04.1999	8424226	7289793	622
247885	22.04.1999	8424660	7288525	500
246893	22.04.1999	8424679	7289296	477
249876	22.04.1999	8424850	7287629	480
183904	23.04.1999	8418333	7290379	545
188901	23.04.1999	8418790	7290117	546
192898	23.04.1999	8419279	7289821	560
196906	23.04.1999	8419638	7290583	572
201903	23.04.1999	8420083	7290307	590
200891	23.04.1999	8420217	7289035	665
225902	23.04.1999	8422459	7290113	603
234898	23.04.1999	8423320	7289800	700

Mynd 1. Staðsetning viðnámsmælinga á Kröflusvæði.

3. ÚRVINNSLA OG TÚLKUN MÆLINGA

Við túlkun TEM-viðnámsmælinganna frá 1999 var beitt einvíðri túlkun þar sem gert er ráð fyrir að viðnám í næsta nágrenni undir mælistað breytist einungis með dýpi, en ekki í láréttar stefnur. Bæði var beitt hefðbundinni túlkun með lárétt lagskiptum líkönum með sem fæstum viðnámslögum og eins túlkun með mörgum þunnum viðnámslögum með sem minnstri viðnámsbreytingu milli laga. Í fyrra tilfellinu er verið að leita að einföldustu viðnámslíkönum sem skýrt geta sýndarviðnámsferla mælinganna og verða slík líkön hér eftir kölluð lagskipt líkön. Í seinna tilfellinu er verið að túlka sýndarviðnámsferlana með sem samfelldustum líkönum og verða þau hér eftir kölluð "samfelld" líkön.

Túlkun eldri TEM-mælinga, frá 1991 og 1993, var endurskoðuð með hliðsjón af niðurstöðum mælinganna frá 1999 og voru sumar þeirra endurtúlkaðar með lagskiptum líkönum og eins voru þær allar túlkaðar með samfelldum líkönum. Mæliferlar allra TEM-mælinga og einvíð túlkun þeirra, bæði með lagskiptum og samfelldum líkönum, eru sýnd í viðauka. Gamla jafnstraumsmælingar sem notaðar eru í þessari skýrslu eru þær sömu og í skýrslunni frá 1996 og notuð er sama túlkun og þá. Hér er um að ræða nokkrar Schlumbergermælingar á útjöðrum mælisvæðisins sem eru túlkaðar einvitt með lagskiptum líkönum og Schlumberger- og viðnáms-sniðsmælingar við Hvíthóla og í Hlíðardal, sem túlkaðar voru með tvívíðum líkanreikningum (Kútur Árnason o.fl., 1984).

3.1 Þrívíð áhrif

Við túlkun TEM-mælinganna í Kröflu og víðar hefur á stundum komið í ljós að einvíð túlkun þeirra er varla fullnægjandi. Í sumum tilfellum eru ekki til lárétt lagskipt líkön sem gefa sömu svörun og mældur ferillinn. Oft gefur einvíð túlkun nærliggjandi mælinga verulega mismunandi líkön sem þýðir að um er að ræða skarpar viðnámsbreytingar í láréttar stefnu. Tví- eða þrívíð túlkun TEM-mælinga, þar sem viðnám getur breyst bæði með dýpi og í láréttar stefnur, er það flókin og reiknifrek, að hún er ekki möguleg enn sem komið er.

Á Orkustofnun er hinsvegar til hugbúnaður til líkanreikninga, sem getur reiknað mæliferla TEM-mælinga fyrir hvaða viðnámsdreifingu í jörðinni sem vera skal. Til að fá nokkurt innsæi í hvernig niðurstöðum búast má við var þessi hugbúnaður notaður til að reikna svörun TEM-mælinga á yfirborði fyrir líkön þar sem viðnám breytist verulega í láréttar stefnur (Knútur Árnason, 2001). Reiknuðu sýndarviðnámsferlarnir voru síðan túlkaðir með einvíðri túlkun og snið byggð á einvíðu líkönunum borin saman við snið með raunverulegum viðnámsgildum líkananna. Líkönin voru valin þannig að þau gefi sæmlega hugmynd um við hverju má búast á og í næsta nágrenni háhitasvæða.

Í kafla 5 er gerð grein fyrir hvernig háhitavirkni endurspeglast í eðlisviðnám jarðlaga. Eðlisviðnám í efsta kílómetranum í basaltskorpu landsins er yfirleitt frekar hátt utan jarðhitasvæða (um eða yfir 100 Ωm). Dæmigert háhitakerfi kemur fram sem lágvíðnámskápa með eðlisviðnám lægra en 10 Ωm á ytri mörkum þess, en þegar innar kemur í háhitakerfið hækkar viðnámið aftur.

Tilgangur líkanreikninganna var meðal annars að kanna hvort þrívíð áhrif geti, þegar beitt er einvíðri túlkun, í einhverjum tilfellum og að einhverju leyti framkallað viðnámsmynd svipaða þeirri sem lýst er hér að framan, einkum hátt viðnám neðan lágviðnáms, sem ekki á sér stoð í raunveruleikanum.

Meginniðurstöðurnar eru í stuttu máli þær (sjá Knútur Árnason, 2001) að við bratta jaðra stórra lágviðnámsfrávika valda láréttar breytingar því að í lágviðnámssvæðinu við jaðrana kemur fram nokkuð hærra viðnám en raunveruleg gildi. Ekki er hinsvegar að sjá að við þessar aðstæður komi fram falskt háviðnám neðan lágviðnáms. Ef TEM-mælingin sér hinsvegar hækkandi viðnám í fleiri en eina átt, t.d. yfir tiltölulega þröngum lágviðnámsþrygg (innan við 5 km breiðum), getur komið fram falskt hátt viðnám neðan lágviðnáms. Einvíð túlkun á mælingum yfir tiltölulega litlum keilulaga lágviðnámsfrávikum (innan við 5 km í þvermál næst yfirborði) sýnir einnig falskt háviðnám neðan lágviðnáms. Dýpið á falsa háviðnámið fer minnkandi eftir því sem lágviðnámsfrávikin eru minni um sig, og hversu mikið of hátt viðnám kemur fram fer eftir eðlisviðnámsmuninum milli lágviðnámsfráviksins og umhverfisins.

Fyrir líkan með keilulaga lágviðnámskápu með hærra viðnámi undir, svipað og almennt sést í háhitakerfum hérlandis, gefur einvíð túlkun verulega hærra viðnám í háviðnámskjarnanum en raunverulega er til staðar í líkaninu. Lágviðnámskápan á hliðum keilunnar kemur fram sem lag með nokkuð hærra viðnámi en raunverulegt viðnám í kápunni og fer viðnámið hækkandi og þykkt lagsins vaxandi eftir því sem lengra kemur frá miðju keilunnar. Þetta kemur vel heim og saman við það sem yfirleitt sést í mælingum á háhitasvæðum. Þær sýna yfirleitt þykkari lágviðnámskápu og með hærra viðnámi þegar komið er út fyrir jaðra háhitasvæðanna, þar sem dýpkar á jarhitakerfin. Líkanreikningarnir sýndu hinsvegar að neðri mörk lágviðnámslagsins falla vel saman við raunveruleg neðri mörk lágviðnámskápunnar, þó að lagið sé þykkara og með hærra viðnámi en hið raunverulega lag líkansins.

Þessi könnun á þrívíðum áhrifum í einvíðri túlkun TEM-mælinga sýnir að við vissar aðstæður, þ.e. þegar um er að ræða tiltölulega lítil viðnámsfrávik með skörpum og bröttum útmörkum, geta þau leitt til falsks háviðnáms neðan lágviðnáms. Það er því full ástæða til að vera á varðbergi þegar draga á ályktanir um jarðhitafræðilegar aðstæður eins og ummyndun og líklegt hitastig út frá einvíðri túlkun TEM-mælinga. Þetta á einkum við þar sem um er að ræða lítil afmörkuð viðnámsfrávik. Sýni einvíð túlkun hinsvegar hátt viðnám neðan lágviðnáms á stórum háhitasvæðum með víðáttumiklu viðnámsfrávikum er ekki ástæða til að efast um að það endurspegli klórítummyndun. Líkanreikningarnir benda þó til þess að háviðnámið neðan lágviðnáms ætti að sýna hærri gildi við jaðrana en inni í miðjum frávikunum og oft virðist mega sjá dæmi þess. Hugsanlegt falskt háviðnám neðan lágviðnáms vegna þrívíðra áhrifa setur á engan hátt spurningamerki við þá hefðbundnu tengingu viðnáms og ummyndunar sem sem notuð hefur verið til að túlka niðurstöður viðnámsmælinga. Hún er rækilega studd af samanburði við ummyndun á stórum háhitasvæðum þar sem hátt viðnám kemur fram það nærri yfirborði að ekki getur verið um þrívíð áhrif að ræða, eins og t.d. í suðurhlíðum Kröflu.

Eins og áður segir sýna líkanreikningarnir að hallandi lágviðnámskápa á jöðrum háhitakerfanna kemur fram í einvíðri túlkun sem mun þykkara lag og með hærri viðnámsgildum. Slíkt lag sést undanteknigarlítið í raunveruleikanum. Þetta rennir stöðum undir ákveðna aðferðafræði við framsetningu á niðurstöðum viðnámsmælinga á jafnviðnámskortum. Hún er sú, að þegar fram kemur hallandi lágviðnámslag á jöðrum háhitakerfanna, sem oft er þykkara og með hærri viðnámi en innan jaðranna (oftast hærri en 10 Ω m), og með afgerandi hærri viðnám fyrir neðan, þá eru forritin sem draga viðnámsjafngildislínur látni haga sér eins og að lágt viðnám (lægra en 10 Ω m) sé til staðar milli lagsins og hærri viðnámsins undir. Með þessu móti afmarkast háhitakerfin mun skýrar af lágviðnámsbelti á jöðrunum. Þessari aðferðafræði er beitt í þessari skýrslu og jafnviðnámskortin sýna því alltaf mjög lágt viðnám á jöðrum, jafnvel þó að viðnám á samsvarandi stað geti verið nokkuð hærri í sniðunum.

4. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA

Áður en farið verður að ræða niðurstöður viðnámsmælinganna er rétt að fara nokkrum orðum um samband eðlisviðnáms jarðlaga og jarðhita. Í áranna rás hefur fengist allmikil reynsla af notkun viðnámsmælinga í jarðhitarannsóknum. Notagildi mælinganna byggist á því að berglög með jarðhitavatni hafa yfirleitt lægra eðlisviðnám en berg mettað köldu vatni. Þeir þættir sem einkum hafa áhrif á eðlisviðnám vatnsmettaðs bergs eru poruhluti bergsins, eðlisviðnám vatnsins, hitastig og ummyndunarsteindir. Ofangreindir þættir spila oft saman á flókinn hátt og vantar allmikið á að það samspil sé skilið að fullu. Settar hafa verið fram reynslujöfnur sem lýsa áhrifum hinna einstöku þátta. Slíkar reynslujöfnur byggja yfirleitt á mælingum eðlisviðnáms mismunandi bergsýna við mismunandi aðstæður.

Ólafur G. Flóvenz o.fl. (1985) gerðu tilraun til að kanna samband ofantalinna frumþátta og eðlisviðnáms bergs í efsta kílómetra jarðskorpu Íslands utan gosbeltanna. Meginniðurstaða þeirrar vinnu var sú, að fyrir berg mettað vatni með litla seltu (eðlisviðnám við stofuhita hærri en u.þ.b. 1 Ω m) er eðlisviðnám bergsins nánast óháð eðlisviðnámi vatnsins, en hins vegar háð poruhluta og hitastigi. Rafleiðnin virtist tengd ummyndunarsteindum, en utan gosbeltanna eru leirsteindir og zeolítar ráðandi ummyndunarsteindir í efsta kílómetranum. Líta má á rafleiðni í poruvökva og leirsteindum sem rafrás með samsíðatengdum viðnámmum og fer straumurinn þá einkum um það viðnámið sem leiðir betur.

Skilningur á sambandi eðlisviðnáms og innri eðlisþátta háhitakerfa jókst verulega við umfangsmiklar rannsóknir sem gerðar voru á Nesjavallasvæði árin 1985 og 1986 (Knútur Árnason o.fl. 1986, 1987, 1987a). Þar fékkst allítarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins sem hægt var að bera saman við umfangsmikil gögn úr borholum. Sá samburður leiddi í ljós góða fylgni milli hitastigs og ummyndunar annars vegar og eðlisviðnáms hins vegar.

Í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum er víðast jafnvægi milli ummyndunar og hitastigs nema á vesturjaðri kerfisins þar sem kólnun hefur átt sér stað (Hjalti Franzson 1988). Þar sem jafnvægi er milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir 1979). Við hitastig frá 50-100°C og upp að u.þ.b. 200°C er smektít og zeólítar ráðandi ummyndunarsteindir. Á bilinu 200°C til 230°C hverfa zeólítar að mestu og smektít þróast yfir í blandlagssteindir. Við 230°C hafa blandlagssteindir þróast yfir í klórít og um og ofanvið 250°C verða klórít og epídót ráðandi ummyndunarsteindir.

Samanburður á eðlisviðnámi við berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu sýndi að eðlisviðnámið er hátt í köldu og fersku bergi en lækkar mjög og er 1–5 Ωm þegar kemur í smektít-zeólítabeltið við hitastig á bilinu 50 til 200°C. Þegar kemur niður í klórít- og klórít-epídótbeltið og hitastig er komið yfir 230°C hækkar viðnámið aftur og verður allt að því stærðargráðu hærra en í smektít-zeólítabeltinu. Ekki sást afgerandi fylgni milli berggerðar (basalthrauna/móbergs) og eðlisviðnáms. Ekki verður þó af því dregin sú ályktun að viðnámið sé óháð poruhluta, heldur frekar hitt að áhrif ummyndunar yfirgnæfi áhrif poruhluta (í ummynduðu bergi er viðnám gjarnan lægra í móbergi en basalthraunum, en það er talið vera vegna þess að móberg ummyndast mun auðveldar en hraunlög). Reyndar er hugsanlegt að viðnámshækkunin í klórítbeltinu sé að hluta til vegna minnkandi poruhluta.

Út frá mælingum á eðlisviðnámi jarðhitavatnsins í Nesjavallakerfinu og áætluðum poruhluta bergsins má, með reynslujöfnum um samband þessara þátta og eðlisviðnáms, meta hvert eðlisviðnám jarðlaga væri ef leiðni eftir poruvökva er ráðandi. Slíkir reikningar gefa mun hærra eðlisviðnám en mælist í smektít-zeólítabeltinu. Því er ljóst að rafleiðni í smektít-zeólítabeltinu er einkum af völdum ummyndunarsteinda en ekki vegna leiðni í poruvökva. Viðnámið í klórítbeltinu getur hins vegar svarað til þess að þar sé leiðni í poruvökva ráðandi. Þennan mismun í leiðni í ummyndunarbeltunum má skilja í ljósi mismunandi uppbyggingar smektít- og klórítsteindanna. Smektítsteindirnar hafa lausbundnar jónir og mikla jónaskiptaeiginleika en í klóríti eru þessar jónir fastbundnar í kristalgrind (Deer o.fl., 1962).

Viðnámsmælingar á öðrum háhitasvæðum hérlandis sýna að sú viðnámsskipan sem í ljós kom á Nesjavöllum og lýst er hér að ofan virðist eiga almennt við um háhitakerfi með ósöltum jarðhitavökva. Neðan ferskra berglaga með háu viðnámi (> 50 Ωm) er lágviðnámskápa með eðlisviðnám 1–10 Ωm sem endurspeglar smektít-zeólítabelti. Neðan hennar hækkar viðnám aftur þar sem klórítummyndun tekur við. Ef ummyndun er í jafnvægi við hitastig endurspeglar lágviðnámskápan hitastig á bilinu 50-200°C en hækkandi viðnám þar fyrir neðan að hiti sé kominn um og yfir 230°C.

Þessari túlkun á sambandi viðnáms og hitaástands háhitakerfa má þó ekki beita í blindni. Ekki er hægt að slá því föstu að ummyndun sé í jafnvægi við hitastig og úr því fæst ekki skorið svo óyggjandi sé nema með borunum. Ef jarðhitakerfið hefur t.d. kólnað nýlega er líklegt að gamla ummyndunin ráði mestu um eðlisviðnám bergsins því að það tekur nokkurn tíma að yfirprenta ummyndunina þannig að viðnámið fari að endurspegla breytt hitaástand (klórít breytist t.d. ekki í blandlags- eða leirsteindir við kælingu). Sömuleiðis

má gera ráð fyrir því að það taki ummyndunarstig bergsins nokkurn tíma að bregðast við hækkandi hita. Trúlega má þó út frá viðnámsdreifingu sjá hvort orðið hefur kólnum frá því meginummyndun bergsins átti sér stað því að viðnám í hinum mismunandi ummynunarbeltum er háð hitastigi. Ef fram kemur t.d. lágviðnámskápa með tiltölulega háum viðnámsgildum (hvergi lægra en 5–10 Ωm) er líklegt að kæling hafi orðið því að ef ummyndun er í jafnvægi við hitastig má gera ráð fyrir að viðnámið sé lægra en 5 Ωm a.m.k. í hluta smektít-zeolítabeltisins. Hér vantar þó meinlega haldgóða þekkingu á sambandi viðnáms og hitastigs í hinum mismunandi ummyndunarbeltum. Önnur hugsanleg skýring á tiltölulega háu viðnámi í lágviðnámskápu getur verið sú að svæðið hafi hitnað nýlega og magn ummyndunar sé enn ekki nógu mikið til að gefa verulega lágt viðnám. Þann möguleika má oft styrkja frekari rökum eða dæma sem ólíklegan með jarðfræðithugun á t.d. sögu eldvirkni á viðkomandi svæði.

Hækkandi viðnám neðan lágviðnáms þarf ekki endilega að þýða að komið sé niður í klórítbelti. Hugsanlega er hitastig að lækka og ummyndun að minnka með dýpi t.d. ef um er að ræða lárétt rennsli í vel lekum jarðlögum grunnt í jörðu. Þessa má sjá merki í Hveragerði þar sem um er að ræða afrennsli frá jarðhitakerfinu í Grændal (Gylfi Páll Hersir o.fl. 1990). Í jarðhitakerfinu í Hvíthólum kemur fram hærra viðnám neðan lágviðnáms sem fellur saman við minni ummyndun í basalthraunum neðan móbergslaga (Knútur Árnason o.fl. 1984). Þetta ber að hafa í huga þegar túlka á niðurstöður þeirra viðnámsmælinga sem hér er fjallað um.

5. VIÐNÁMSSKIPAN Á KRÖFLUSVÆÐINU

Sú viðnámsmynd sem fram kemur við einvíða túlkun viðnámsmælinga á Kröflusvæðinu er sýnd hér á tvo vegu. Annarsvegar sem lóðrétt viðnámsnið í gegnum jarðhitakerfið og hinsvegar sem jafnviðnámskort á mismunandi dýpi.

5.1 Viðnámsnið

Á viðnámsniðunum eru sýnd bæði lagskipt líkön, þar sem mælingarnar eru túlkaðar með sem fæstum viðnámslögum, og samfeld líkön, þar sem þær eru túlkaðar með mörgum lögum og sem minnstum breytingum milli laga. Dýptarskinjun mælinganna er um 1 km, og þar sem landhæð er yfirleitt á bilinu 400–500 m yfir sjávarmáli eru viðnámsniðin dregin frá yfirborði og niður á 600 m undir sjávarmáli. Þá skal einnig bent á að lóðréttur skali sniðanna er verulega ýktur (5 sinnum) miðað við þann lárétta. Af þeim sökum virðast allar láréttar viðnámsbreytingar og hallandi viðnámslög mun brattari en í raunveruleikanum. Við framsetningu sniðanna er fylgt þeirri aðferðafræði sem reifuð er að framman, þ.e. að þar sem koma fram hallandi viðnámslög með til þes að gera lágu viðnámi (10–25 Ωm) á jöðrum jarðhitakerfisins og með afgerandi hærra viðnámi fyrir neðan, er

gengið út frá því að raunverulegt viðnám lagsins sé lægra og hærra viðnámið undir merkt sem hátt viðnám neðan lágviðnáms (rauð-skástrikað).

Alls eru dregin 26 viðnámssnið, 13 norður-suður snið með um það bil 1 km millibili, og 10 austur-vestur snið, einnig með um 1 km millibili, og er lega sniðanna synd á mynd 2. Norður-suður sniðin bera heitin NSxx, þar sem xx er hlaupandi tala frá 13 til 25 (frá vestri til austurs). Talan xx vísar til þess að sniðið liggur sem næst eftir norður-suður hnitalínu með UTM-austurnhit 84xx000. Austur-vestur sniðin bera heitin AVyy, þar sem yy er hlaupandi tala frá 85 til 94 (frá suðri til norðurs) og vísar til þess að sniðið liggur sem næst eftir austur-vestur hnitalínu með UTM-norðurhit 72yy000 (sjá mynd 2). Norður-suður sniðin, NS13 til NS25, eru sýnd í réttri röð, frá vestri til austurs á myndum 3 til 15 og austur-vestur sniðin, í réttri röð frá suðri til norðurs á myndum 16 til 25.

5.1.1 Umræða um viðnámssnið

Vestasta norður-suður sniðið (**NS13**, mynd 3) er rétt vestan við vesturbrún öskjunnar og sýnir tiltölulega reglulega lagskiptingu, en hvergi verulega lágt viðnám. Næstu tvö þar fyrir austan (**NS14** og **NS15**, myndir 4 og 5) sýna mun óreglulegri viðnámsdreifingu inn- an öskjunnar, en enn kemur ekki fram verulega lágt viðnám. Undir tveimur mælingum um miðbik NS15 kemur fram hærra viðnám neðan tiltölulega lágs viðnáms. Það er, í samhengi við næsta snið fyrir austan, túlkað sem hátt viðnám neðan lágviðnáms á bröttum útmörkum.

Verulega lágt viðnám ($\leq 10 \Omega m$) með afgerandi hærra viðnámi kemur fyrst fram í sniði **NS16** (mynd 6), sem liggur um 1 km austan við Hvanntóð og um 1 km austan við Hlíðarfjall. Norðurmörk lágviðnámsfráviksins eru mjög skörp norð-austan við Hvanntóð, en það teygir sig til suðurs eins langt og sniðið nær. Syðst kemur reyndar ekki fram afgerandi lágt viðnám, ($\leq 10 \Omega m$), en í næsta sniði fyrir austan er lágt viðnám á þessum slóðum og því er hækkandi viðnám flokkað sem hátt undir lágu með jaðaráhrifum.

Sniðum **NS17** og **NS18** (myndir 7 og 8), sem liggja um og rétt vestan við Leirhnúk, er samfelld frávik með láguviðnámi og hærra fyrir neðan, frá því um 1 km norðan Leirhnúks og alla götu, eins og sniðin ná, suður undir Dalfjall. Norðurmörkin eru mjög skörp, en í sniði NS17 má sjá hik í viðnámsfrávikinu (það er á meira dýpi) undir Leirhnúkshrauni vestan Þríhyrninga. Í þessum sniðum, og þeim næstu fyrir austan, er lágt viðnám næst yfirborði frá svæðinu kringum Leirhnúk og til austurs um suðurhlíðar Kröflu.

Snið **NS19** (mynd 9) liggur frá Hreindýrahól, suður um Vítismó, vestan Stöðvarhúss Kröfluvirkjunar, suður um Hvíthóla og undir Dalfjalli þar fyrir sunnan. Sniðið sýnir ákveðin norðurmörk viðnámsfráviks norðarlega á Vítismó. Þegar kemur suður á móts við Leirbotna dýpkar verulega á viðnámsfrávikinu og hefur það afgerandi suðurmörk skammt sunnan Hvíthóla.

Næstu tvö snið þar fyrir austan liggja annarsvegar (**SN20**, mynd 10) um Víti, Hveragil, vestanvert Sandabotnafjall og Halaskógarfjall og hinsvegar (**SN21**, mynd 11) um vesturhlíðar Kröflu, vinnslusvæðið í Suðurhlíðum, mitt Sandabotnafjall, rétt vestan Leirhóls í

Sandabotnaskarði og á suðurtagl Halaskógarfjalls. Í báðum sniðunum kemur fram ákveðið viðnámsfrávik sem er næst yfirborði um Víti, Hveragil og í suðurhlíðum Kröflu. Norður mörkin eru í báðum tilfellum mjög skörp en færast verulega til suðurs eftir því sem austar kemur, frá því að vera um 2 km norðan Vítis, í vestara sniðinu og suður í vesturhlíðar Kröflu í austara sniðinu. Í báðum sniðunum dýpkar verulega á lágt viðnám til suðurs, við Grænagil. Undir Sandabotnafjalli og Sandabotnaskarði er ákveðið viðnámsfrávik með lágviðnámskápu og hærra viðnámi undir, en á verulega meira dýpi en norðan Grænagils.

Í sniði **NS22** (mynd 12), sem liggur suður með Hrafninnuhrygg og um austurbrún Sandabotnafjalls, er verulega dýpra á lágviðnám en fyrir vestan. Í sniðinu kemur fram viðnámsfrávik með tveimur toppum og er sá nyrðri í ASA framhaldi af lágviðnámssvæðinu undir suðurhlíðum Kröflu, en sá syðri er í austurkjafti Sandabotnaskarðs. Í næsta sniði (**NS23**, mynd 13) kemur fram afmarkað viðnámsfrávik, enn í ASA framhaldi af suðurhlíðunum, en á minna dýpi en í sniðinu fyrir vestan og skarpt afmarkað bæði til suðurs og einkum til norðurs.

Sniði **NS24** (mynd 14) er austan Kröfluöskjunnar og liggur frá Hágöngum í norðri og suður mitt á milli Sandabotnafjalls og Jörundar. Þar kemur fram viðnámsfrávik með skörp suðurmörk á móts við sunnanverðan Jörund og nær það til norðurs, eins langt og sniðið nær. Hér er um að ræða afgerandi frávik með lágviðnámi og hærra viðnámi undir. Grynnt er á lágt viðnám við suðursporð Háganga. Austasta sniðið (**NS25**, mynd 15) liggur um austurhlíðar Hágangna og suður með vesturhlíðum Jörundar. Sniðið sýnir lágt viðnám með hærra undir undir suðaustur hluta Hágangna. Viðnámsfrávik í þessum tveimur austustu sniðum kemur nokkuð á óvart því ekki eru nein merki um jarðhita á yfirborði á þessum slóðum og og frávik nær vel út fyrir Kröfluöskjuna.

Syðsta austur-vestur sniðið (**AV85**, mynd 16) liggur um Hlíðarfjall í vestri og austur yfir Hlíðardal og Halaskógarfjall og sýnir hærra viðnám undir lágu undir Dalfjalli. Næsta snið fyrir norðan (**AV86**, mynd 17) liggur frá norðanverðu Hlíðarfjalli og austur yfir Dalfjall og Hlíðardal, norðurbrún Halaskógarfjalls og austur sunnan við Jörund. Sniðið sýnir afmarkað viðnámsfrávik undir Dalfjalli og undir norðurbrún Halaskógarfjalls er það farið að sneiða utan í viðnámsfrávik undir Sandabotnafjalli.

Snið **AV87** (mynd 18) er í vestri um 1,5 km norðan Hlíðarfjalls og liggur austur um Leirhnúkshraun, rétt norðan Hvíhóla, yfir sunnanvert Sandabotnafjall og austur í Jörund miðjan. Sniðið sýnir afgerandi og grunnstætt viðnámsfrávik undir Leirhnúkshrauni um 2 km vestur af Hvíthólum. Vesturmörk fráviksins eru mjög skörp og þegar kemur austur undir Hvíthólaklif dýpkar snögglega á lágt viðnám undir Hvíthólum. Enn dýpkar á lágt viðnám undir vestanverðu Sandabotnafjalli, en grynkar síðan aftur undir miðju Sandabotnafjalli. Austurmörk viðnámsfráviksins eru undir Sandabotnum. Þar er reyndar nokkurt álitamál hvar telja beri mörkin því að á þessum slóðum er viðnám niður undir 10 Ωm með hærra viðnámi undir og með hliðsjón af þrívíðum áhrifum má allt eins gera ráð fyrir að austurmörkin séu nokkuð austar en gefið er í skyn með rauðkrossuðu svæði á mynd 18.

Snið AV88 (mynd 19) liggur frá Vatnahlíð í vestri, austur um Leirhnúkshraun, skammt sunnan Þríhyringa, yfir Sandabotnafjall og í norðanverðan Jörund. Sniðið sýnir skýrt afmarkað viðnámsfrávik með lágu viðnámi og hærra fyrir neðan með vesturmörk undir vestanverðu Leirhnúkshrauni og mjög skörp austurmörk undir Sandabotnum, mitt á milli Sandabotnafjalls og Jörundar. Viðnámsfrávikðið er nærri yfirborði undir Leirhnúkshrauni og eins undir Sandabotnum, en á mun meira dýpi um miðbikið, undir Leirbotnum og Sandabotnafjalli.

Snið AV89 (mynd 20) liggur frá Krókóttuvötnum í vestri, sunnan við Leirhnúk, um brekkubrúnina norðan Leirbotna, um suðurhlíðar Kröflu og austur um norðursporð Jörundar. Nokkuð dýpra er á vesturhluta viðnámsfráviksins undir Leirhnúksharauni í þessu sniði en í næstu sniðum bæði fyrir norðan og sunnan. Til austurs grynkar jafnt og þétt og nokkuð aflíðandi á viðnámsfrávikðið og nær það til yfirborðs undir vinnslusvæðinu í Suðurhlíðum. Þar fyrir austan dýpkar snögglega á það aftur, en við austurjaðar öskjunnar kemur síðan fram grunnstætt viðnámsfrávik með mjög skörpum austurmörkum á móts við austanverð Hágöng.

Snið AV90 (mynd 21) liggur frá sunnanverðu Hvannstöði, austur um Leirhnúk, skammt norðan Vítis, um norðurhluta Kröflu og austur yfir sunnanverð Hágöng. Grunnt er á lágt viðnám með hærra undir, frá því skammt vestan við Leirhnúk og austur undir norðurhluta Kröflu. Vestan Leirhnúks dýpkar aflíðandi á lágt viðnám til vesturs, en við norð-vestanverða Kröflu eru mjög skörp austurmörk. Undir sunnanverðum Hágöngum kemur aftur fram viðnámsfrávik á 200-300 m dýpi, vel afmarkað til vesturs, en til austurs sést hátt viðnám neðan lágviðnáms eins langt og sniðið nær.

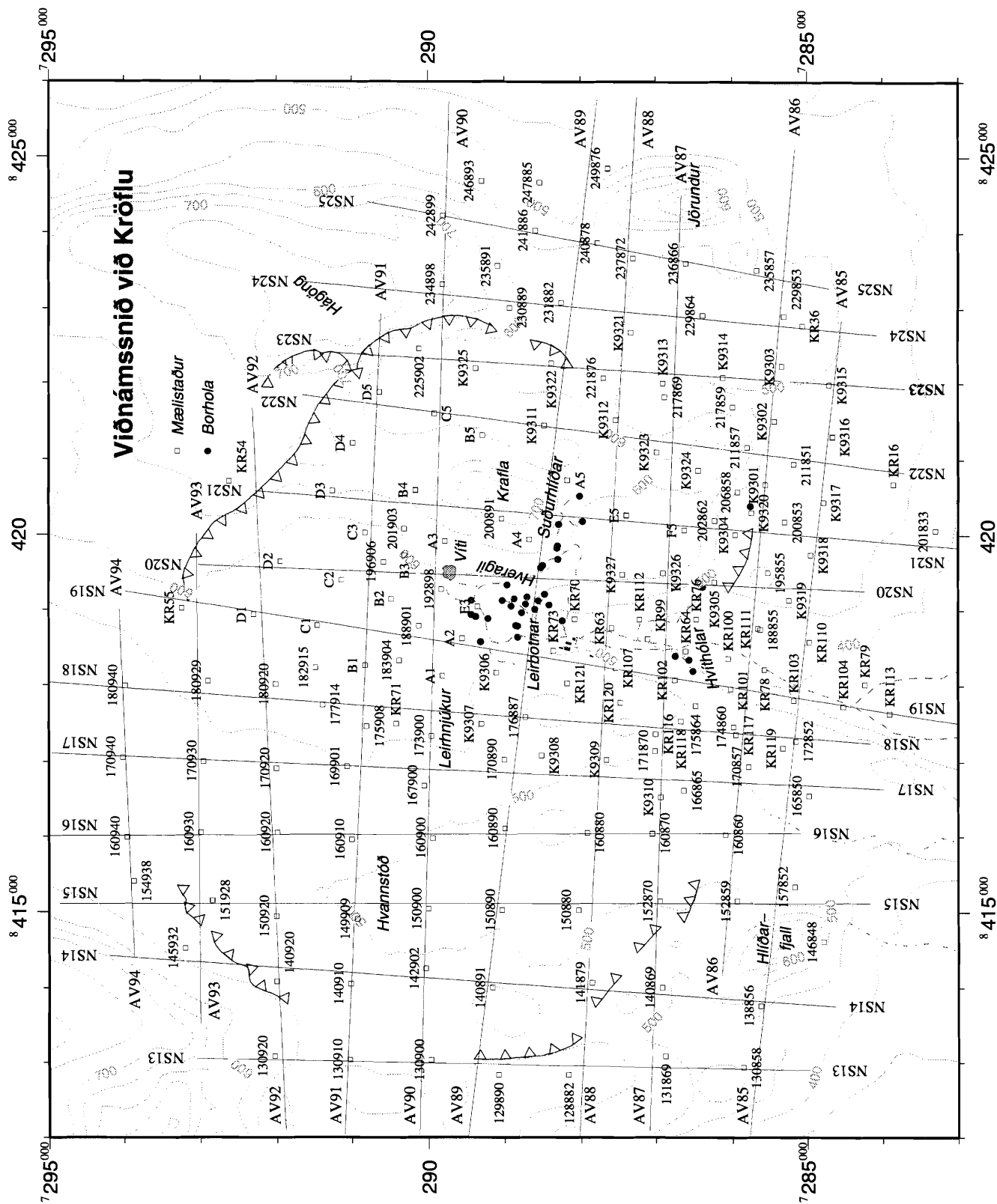
Snið AV91 (mynd 22) liggur frá norðanverðu Hvannstöði, rúmlega 1 km norðan við Víti og þaðan austur að Hágöngum. Grunnstætt viðnámsfrávik, með lágu viðnámi og hærra undir kemur fram frá Litla Leirhnúk í vestri og austur á móts við norður-suðurlínu um vesturhlíðar Kröflu. Útmörk þessa viðnámsfráviks er mjög skörp bæði að austan og vestanverðu. Ennfremur kemur fram í einni mælingu (140910) norðvestur af Hvannstöði staðbundið lágt viðnám á um 200 m dýpi, sem bendir til að þar sé, eða hafi verið mjög staðbundin jarðhitavirkni.

Snið AV92 (mynd 23) liggur frá Múla, sunnan Gæsafjalla, og til austurs í Graddabungu. Sniðið sneiðir rétt í norðurmörk viðnámsfráviks í mælingu 180920 við Rauðkollshóla. Þar kemur reyndar einungis fram tiltölulega lágt viðnám (16 Ω m), en með afgerandi hærra viðnámi fyrir neðan. Þetta millilága viðnám er, samkvæmt því sem rætt var í kaflinum um þrívíð áhrif hér að framan, túlkað sem lágviðnámskápa á jaðri jarðhitageymisins.

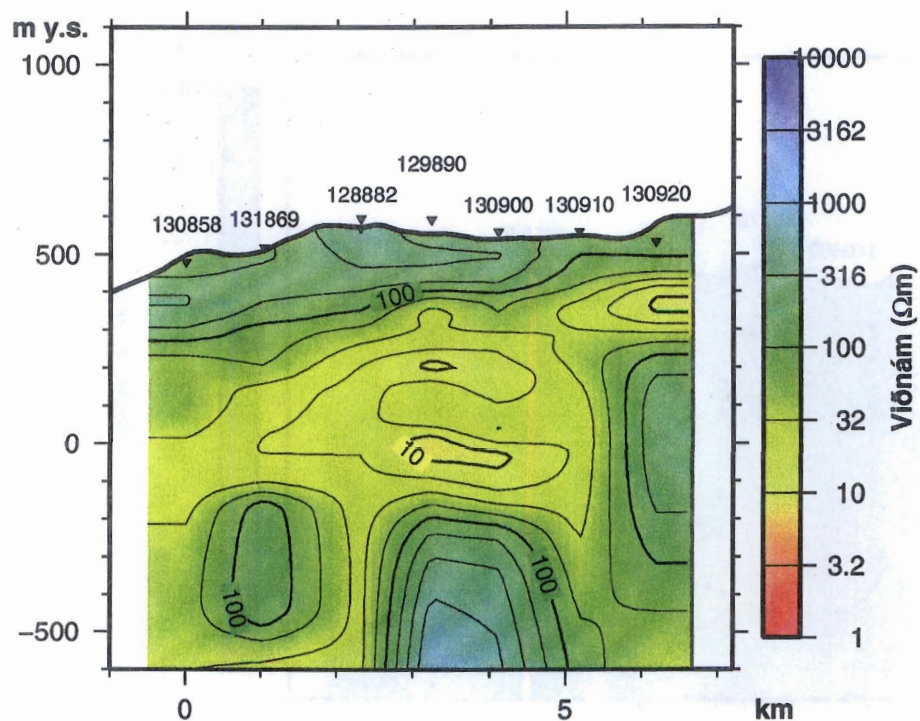
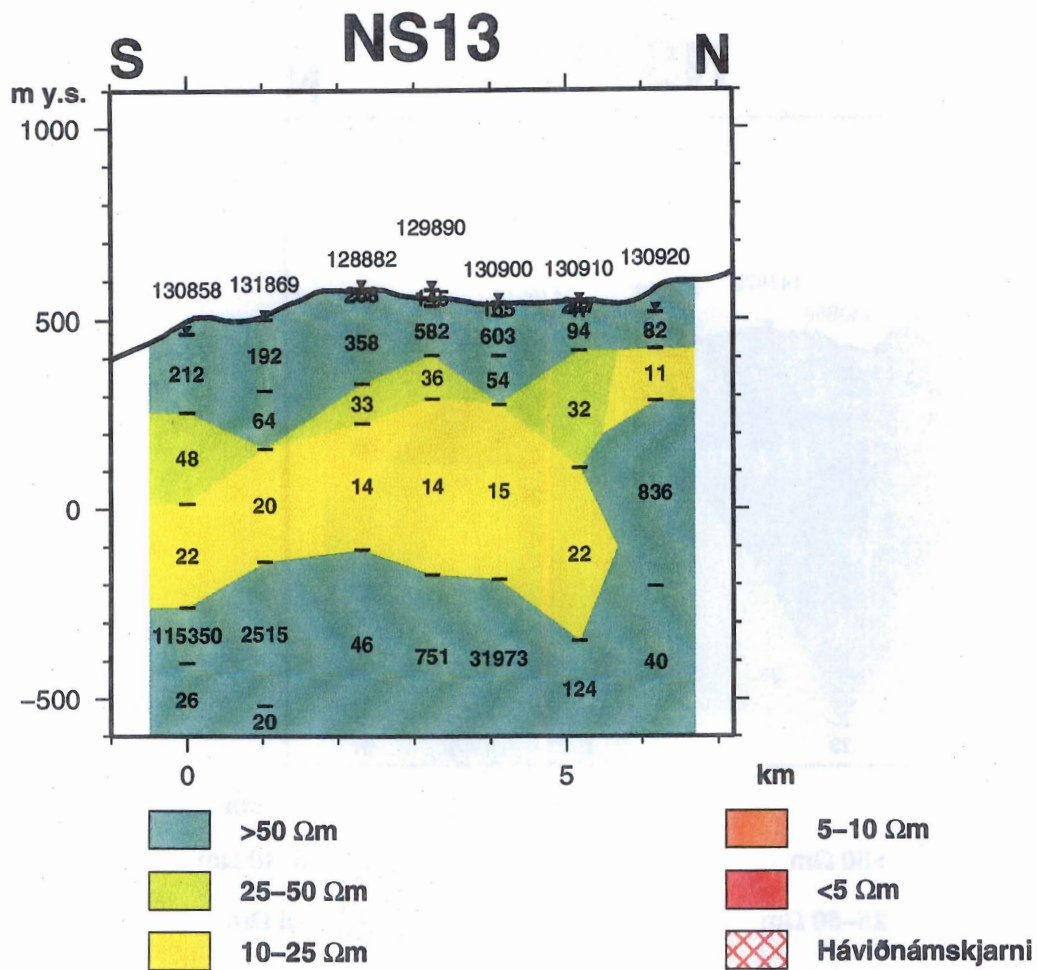
Snið AV93 (mynd 24) liggur frá suðaustanverðum Gæsafjöllum og austur að Hreindýrahól. Í því kemur hvergi fram verulega lágt viðnám. Í vesturhluta sniðsins er, til þess að gera, regluleg lagskipting með 15–30 Ω m viðnámi á 100-400 m y.s. og hærra viðnámi fyrir neðan. Í austur hlutanum er hinsvegar um 20–80 Ω m neðan háviðnáms næst yfirborði, eins djúpt og mælingarnar skynja.

Snið AV94 (mynd 25) er norðan Kröfluöskjunnar, um 1 km norðan við AV93. Þetta snið er einungis um 3 km langt og með fjórum mælingum. Ekki kemur fram neitt viðnámsfrávik, sem augljóslega tengist jarðhitavirkni. Á um 200 m dýpi (um 300 m y.s.) kemur fram, neðan háviðnáms næst yfirborði, samfellt og rúmlega 100 m þykkt lag með 13–20 Ω m. Þar fyrir neðan er hærra en nokkuð óreglugt viðnám.

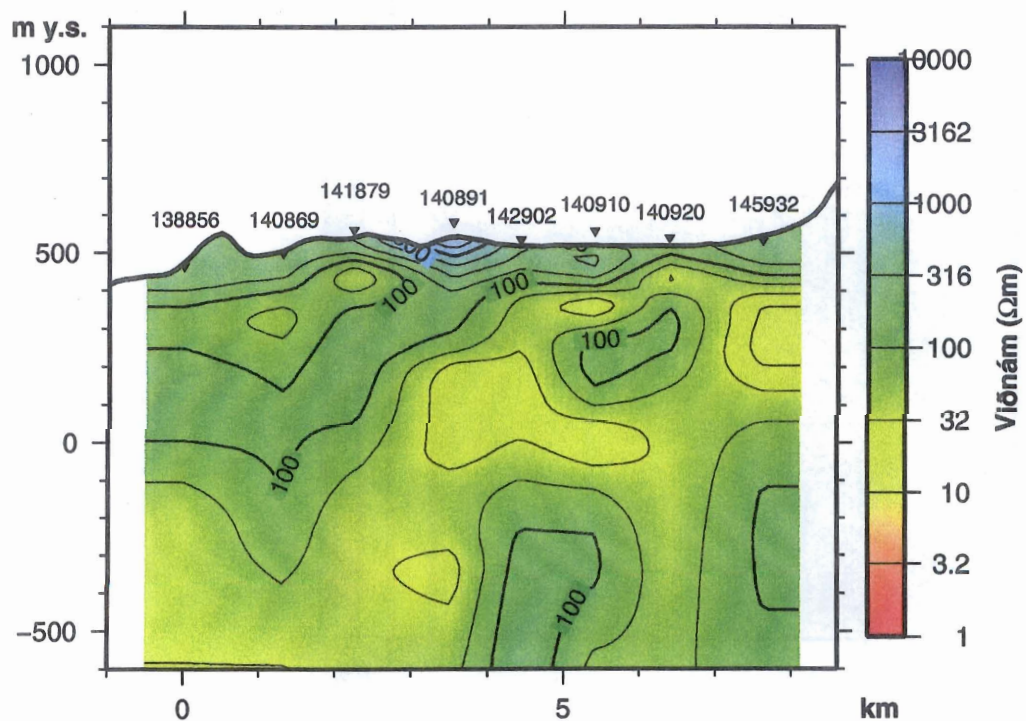
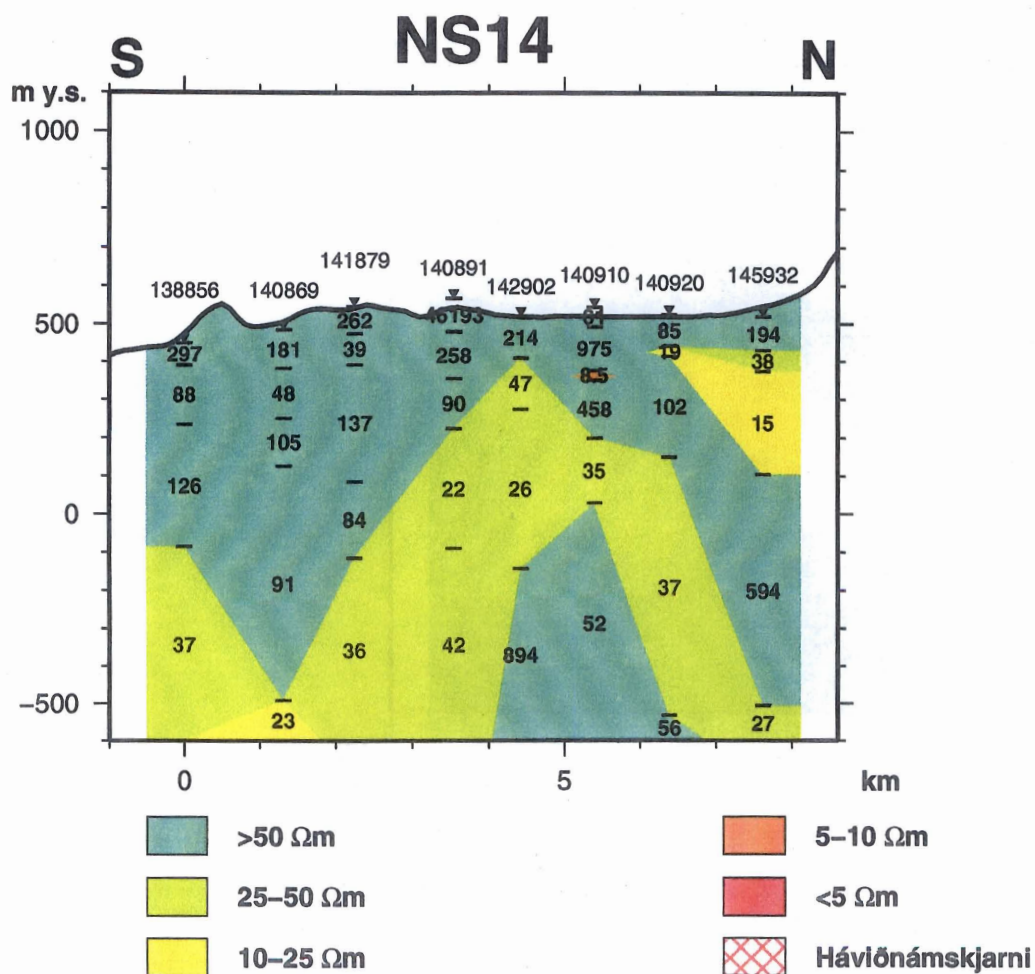
Almennt má segja um viðnámssniðin, að innan Kröfluöskjunnar, þar sem ekki kemur fram ákveðið viðnámsfrávik vegna jarðhitaummyndunar, er viðnámsskipanin mjög flókin og óregluleg. Þetta er einkum áberandi vestan jarðhitavirkinnar (í norður-suður sniðunum gegnum vestasta hluta öskjunnar og vesturhluta austur-vestur sniðanna). Í sniðum sem liggja utan öskjunnar og utan jarðhitavirkni (vestasta norður-suður sniðið og nyrsta og syðsta austur-vestur sniðin) er viðnámsskipanin mun reglulegri og þar má frekar greina samfeld viðnámslög. Óreglulegri viðnámskipan innan öskjunnar má ef til vill skýra með því, að eftir að askjan myndaðist hafi hún fylltist af óreglulegum móbergseiningum undir ís og/eða vatni. Utan öskjunnar eru jarðlög í efsta kílómetranum hinsvegar mun reglulegri og lagskiptari. Vestast í öskjunni ber viðnámsskipanin nokkur einkenni "lágviðnámskápu" með hærra viðnámi undir. Viðnámsgildin í "lágviðnámskápunni" eru þó verulaga hærri en í raunverulegri lágviðnámskápu austar í öskjunni. Hugsanlega er hér um að ræða gamla ummyndun, frá fornri jarðhitavirkni. Að þessu verður nánar vikið síðar.



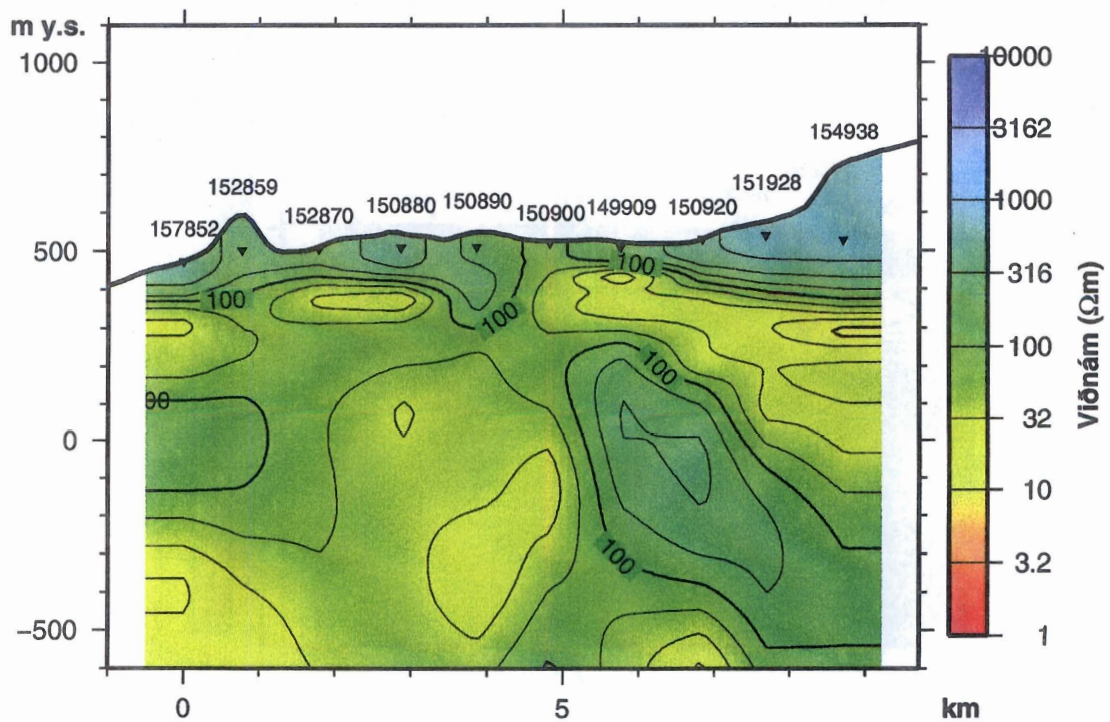
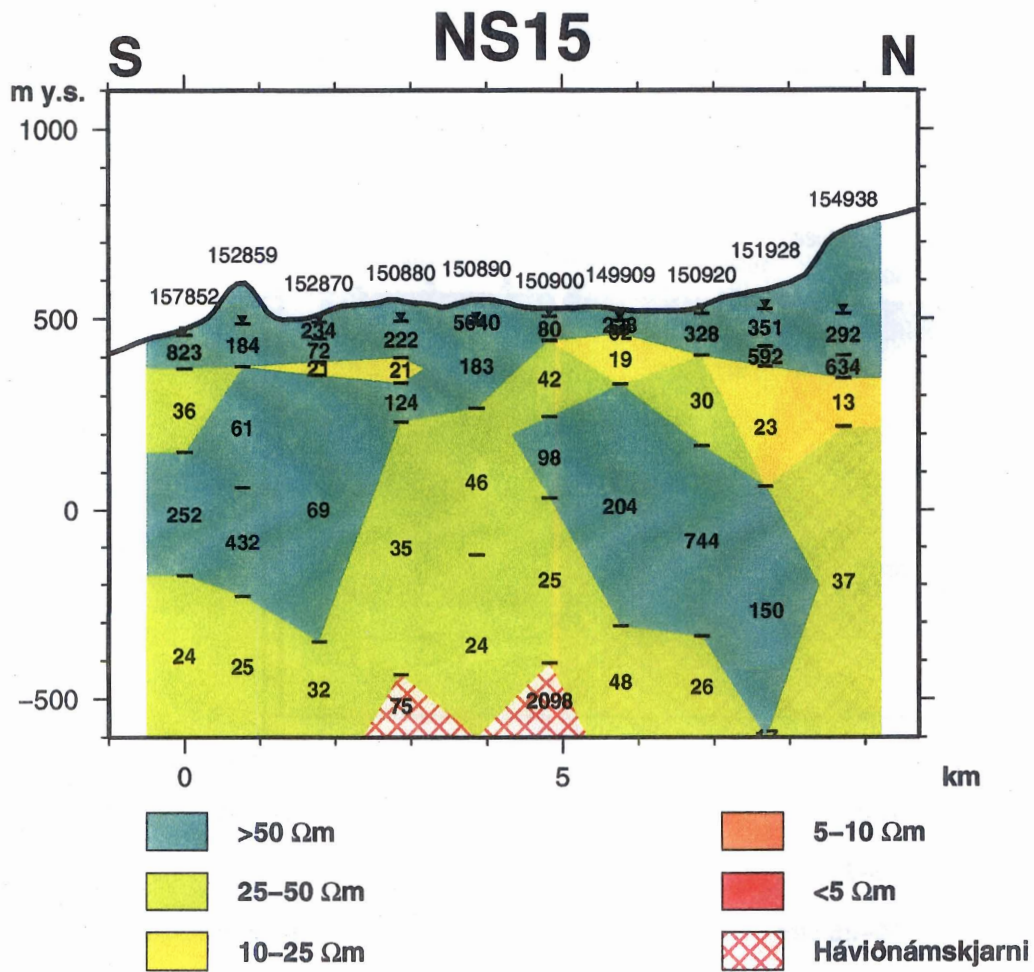
Mynd 2. Lega viðnámssniða.



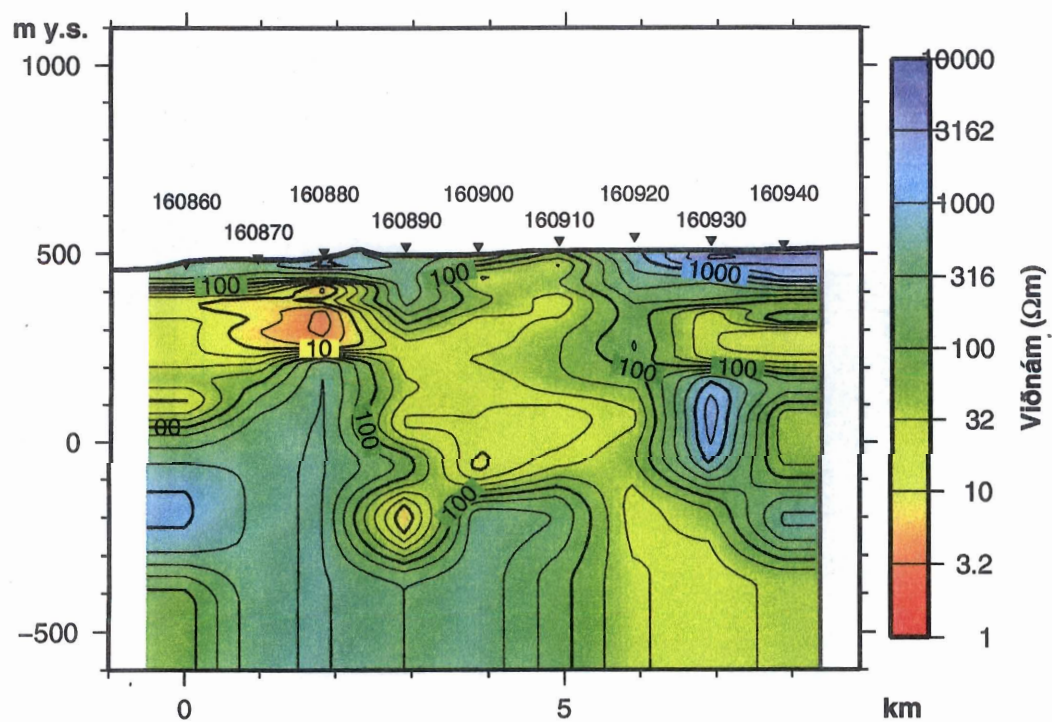
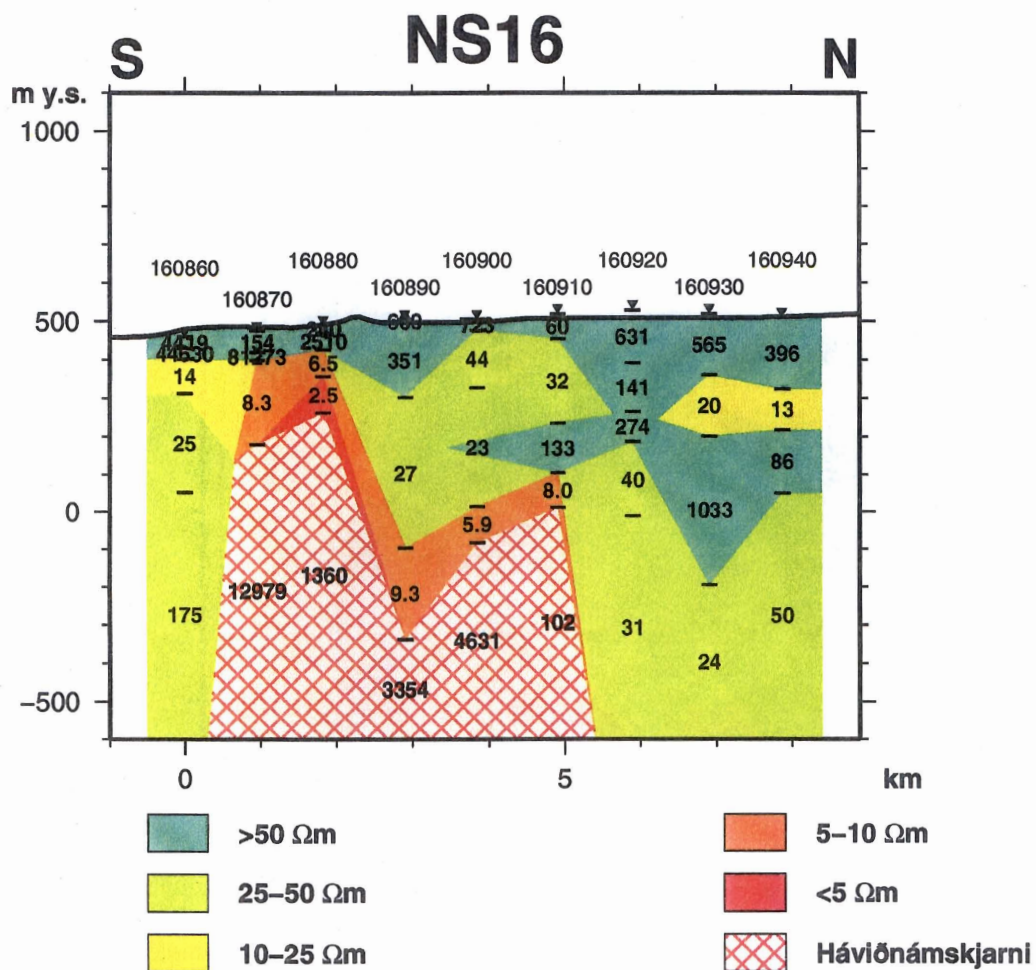
Mynd 3. Norður-suður snið NS13.



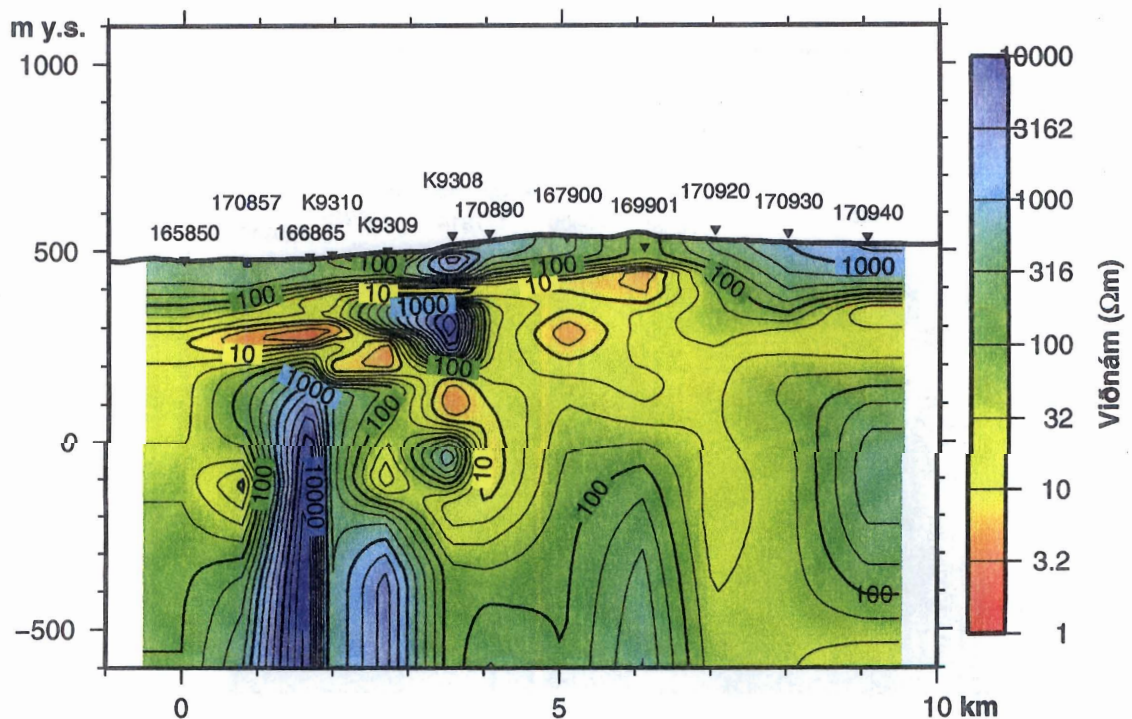
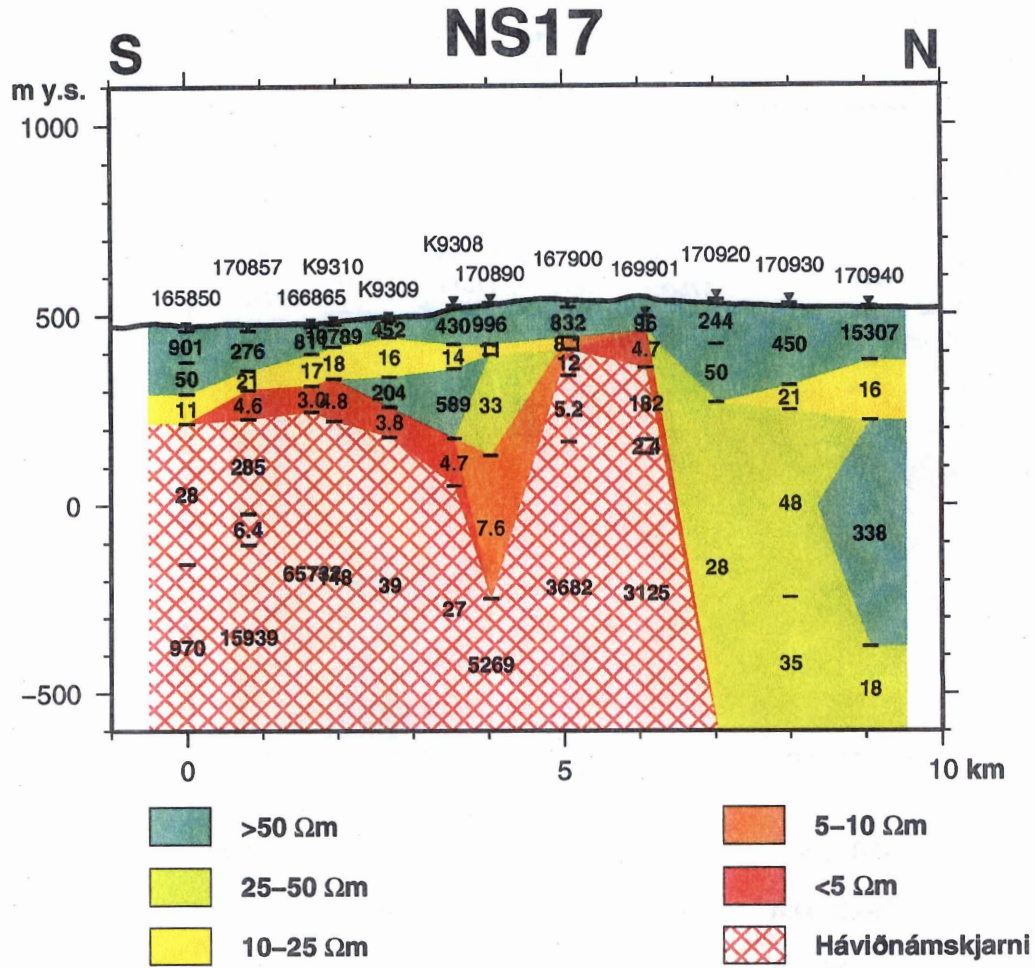
Mynd 4. Norður-suður snið NS14.



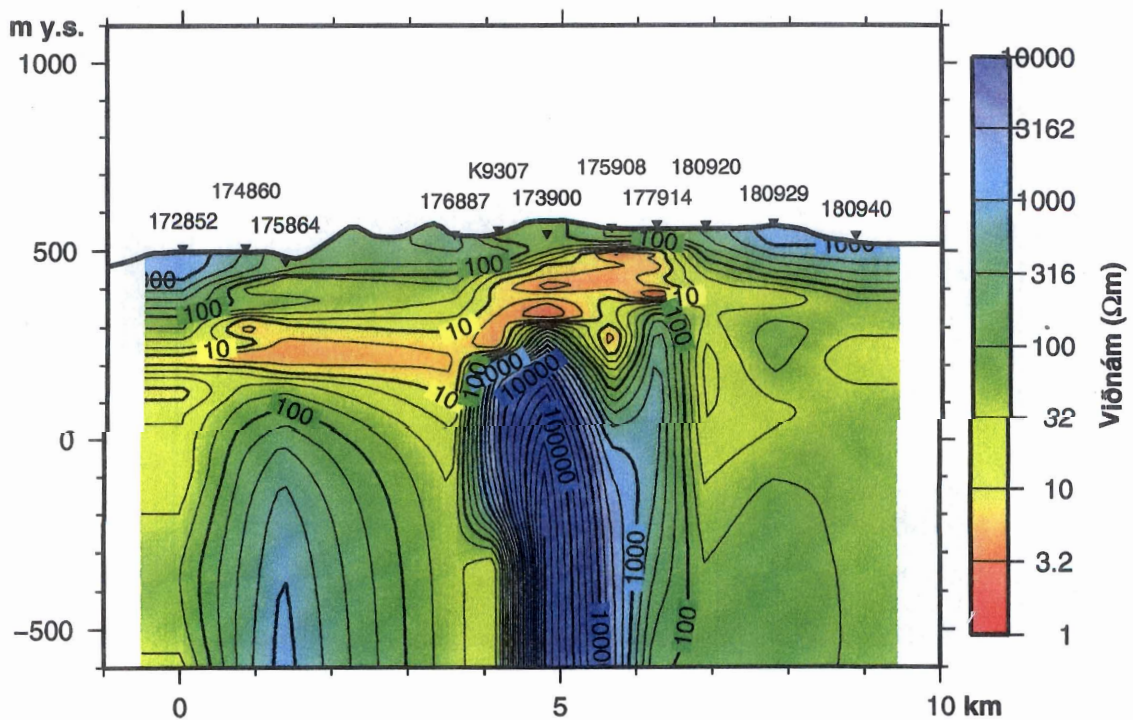
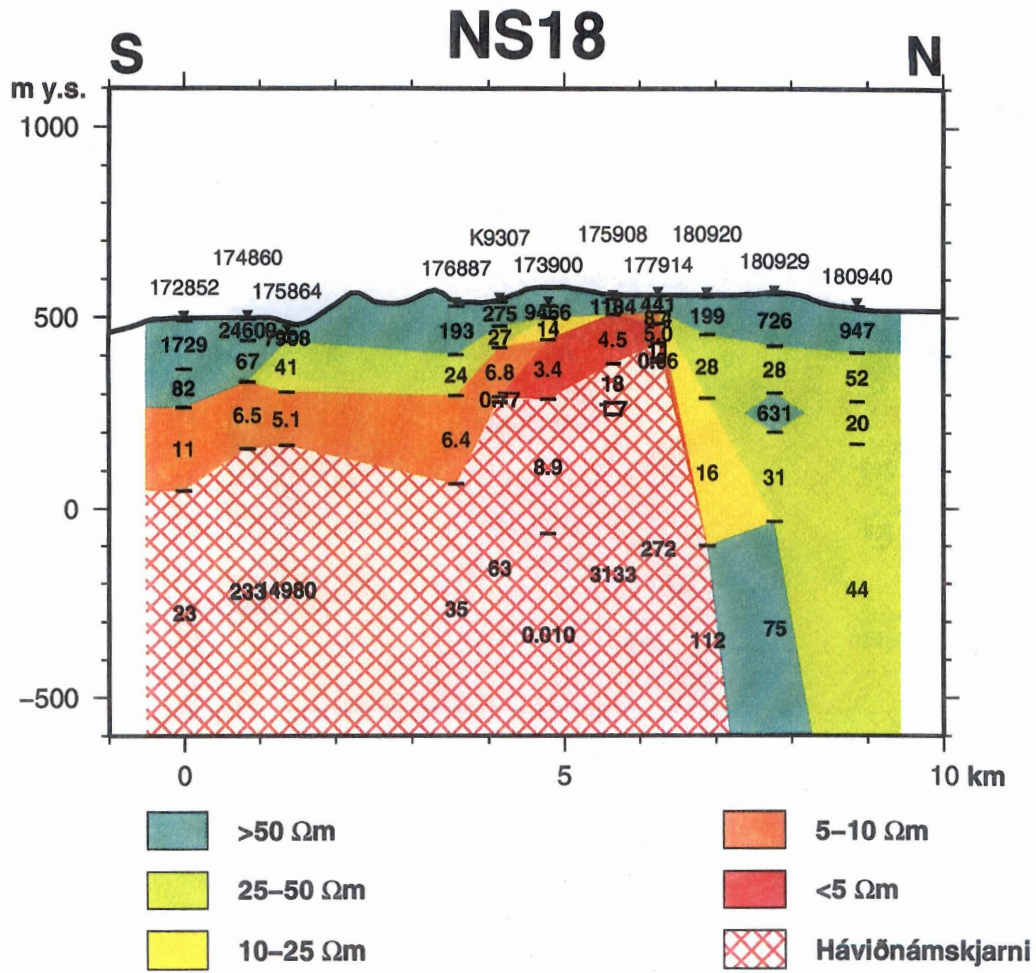
Mynd 5. Norður-suður snið NS15.



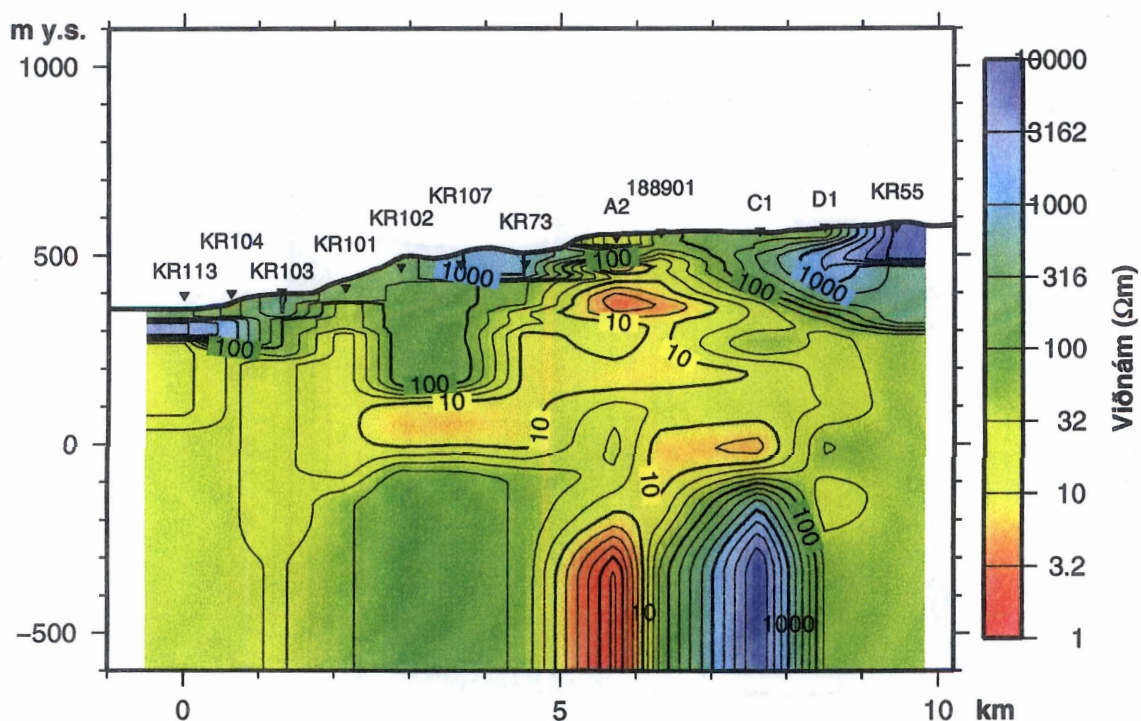
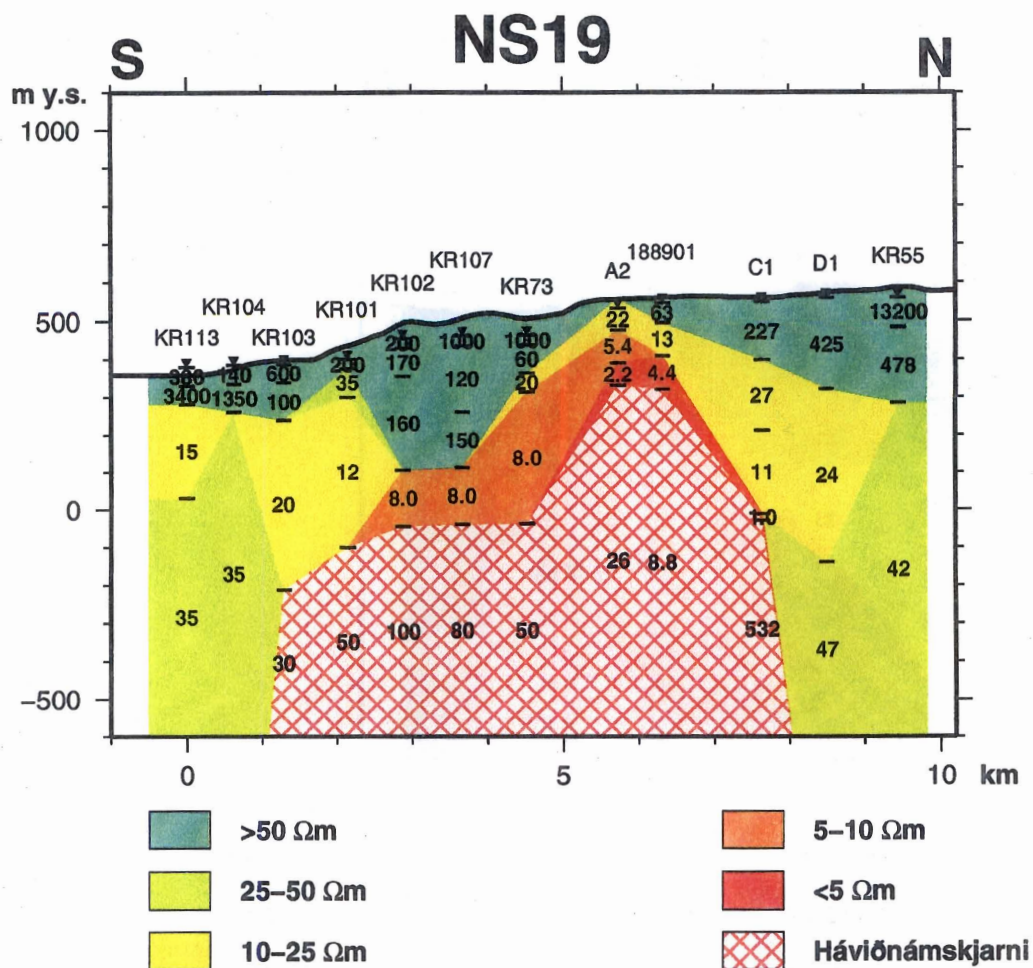
Mynd 6. Norður-suður snið NS16.



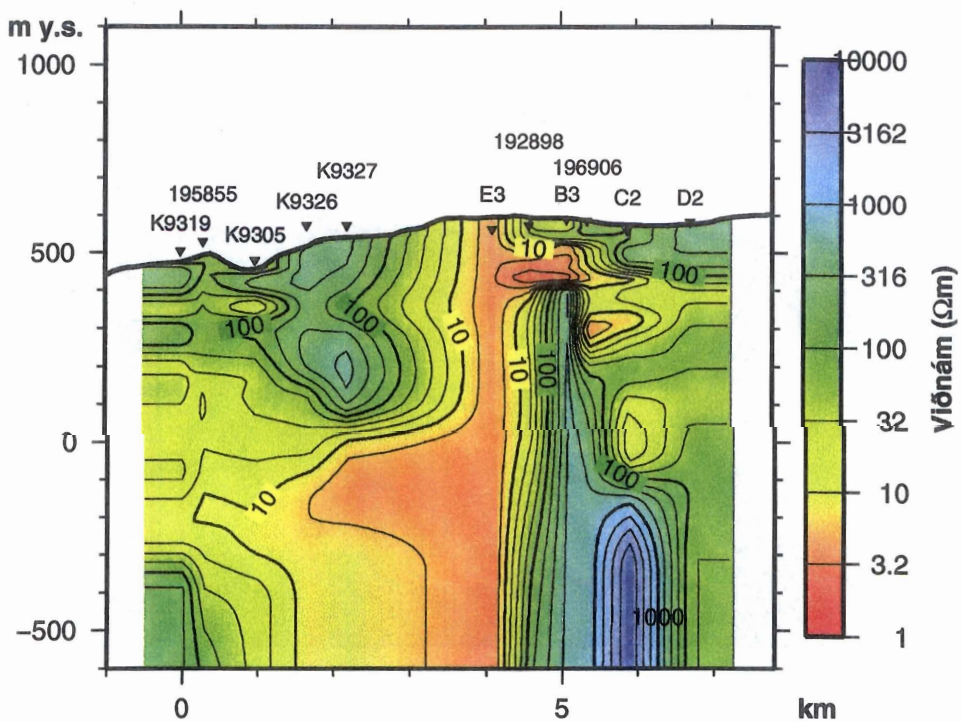
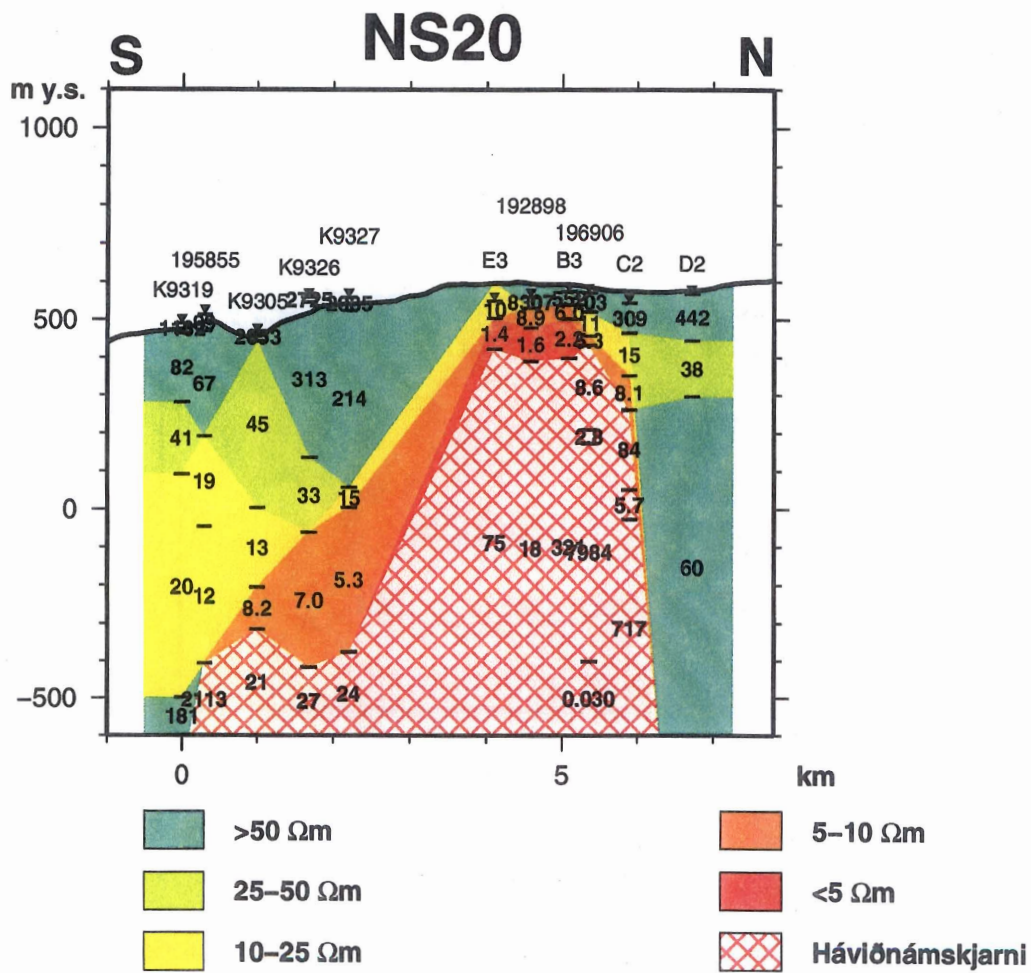
Mynd 7. Norður-suður snið NS17.



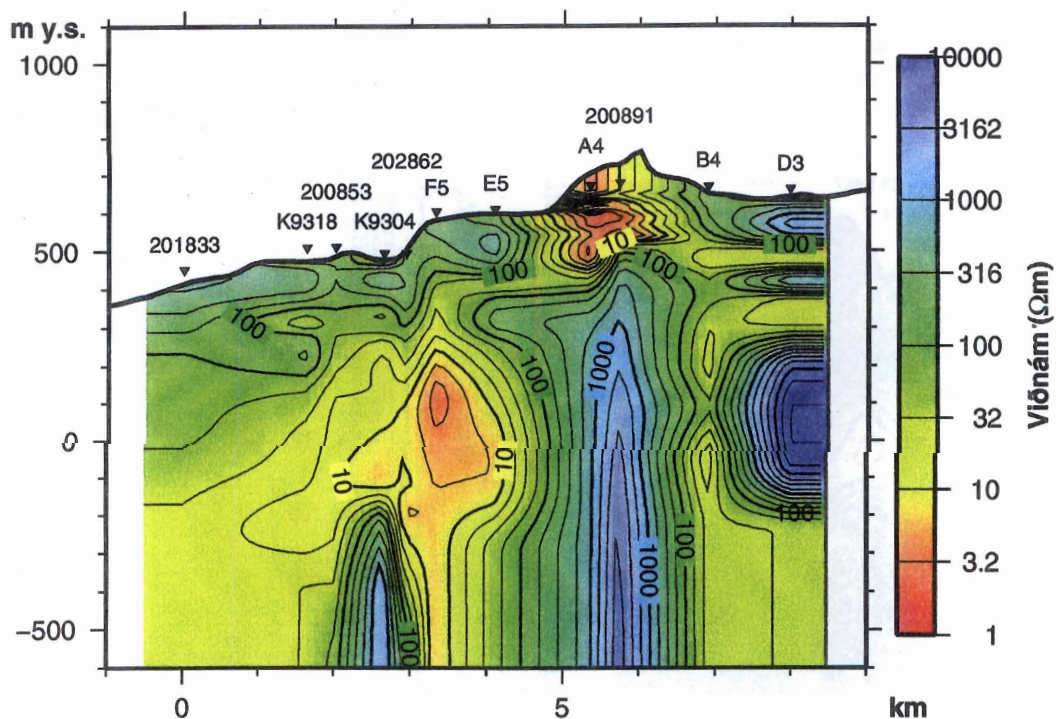
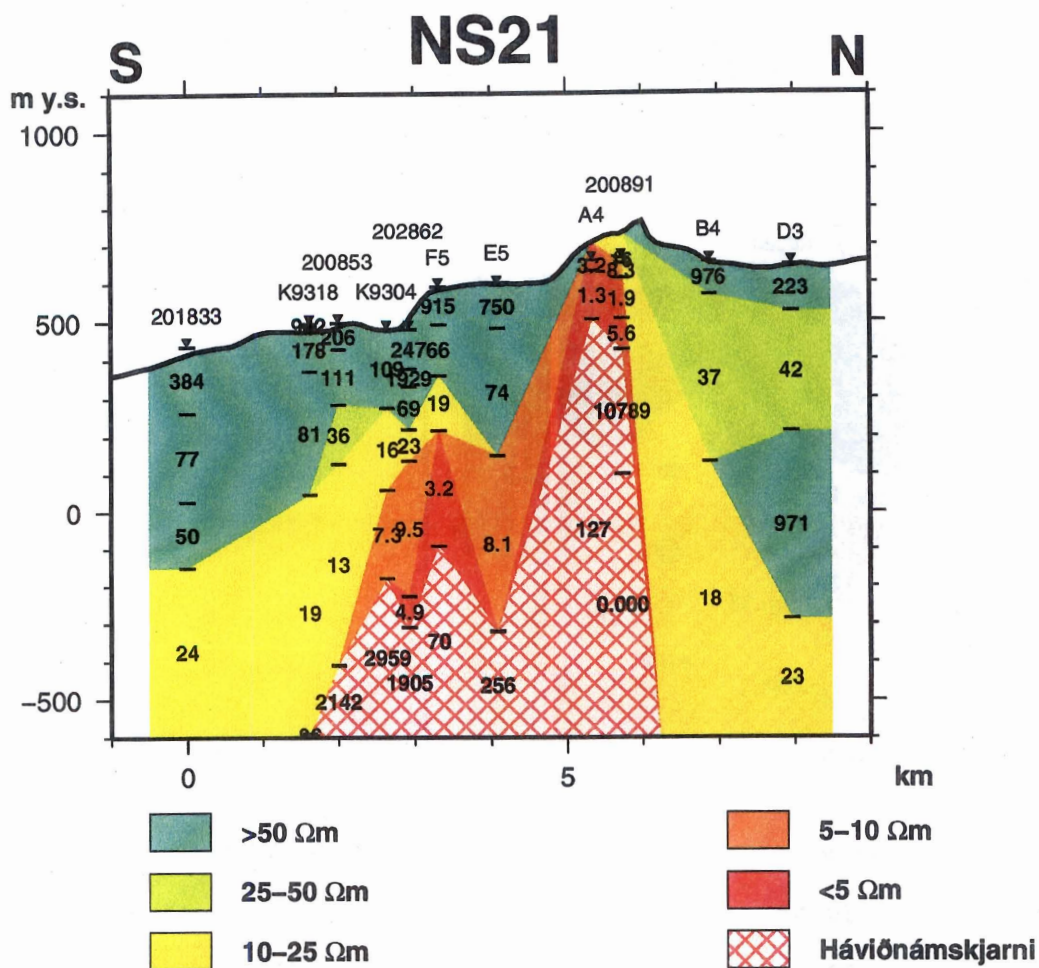
Mynd 8. Norður-suður snið NS18.



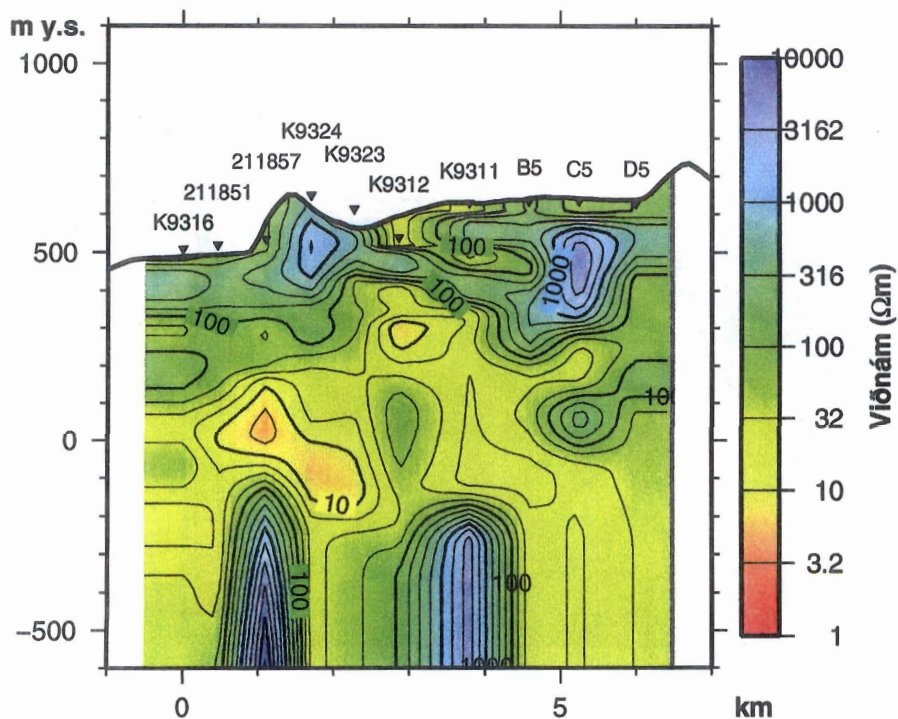
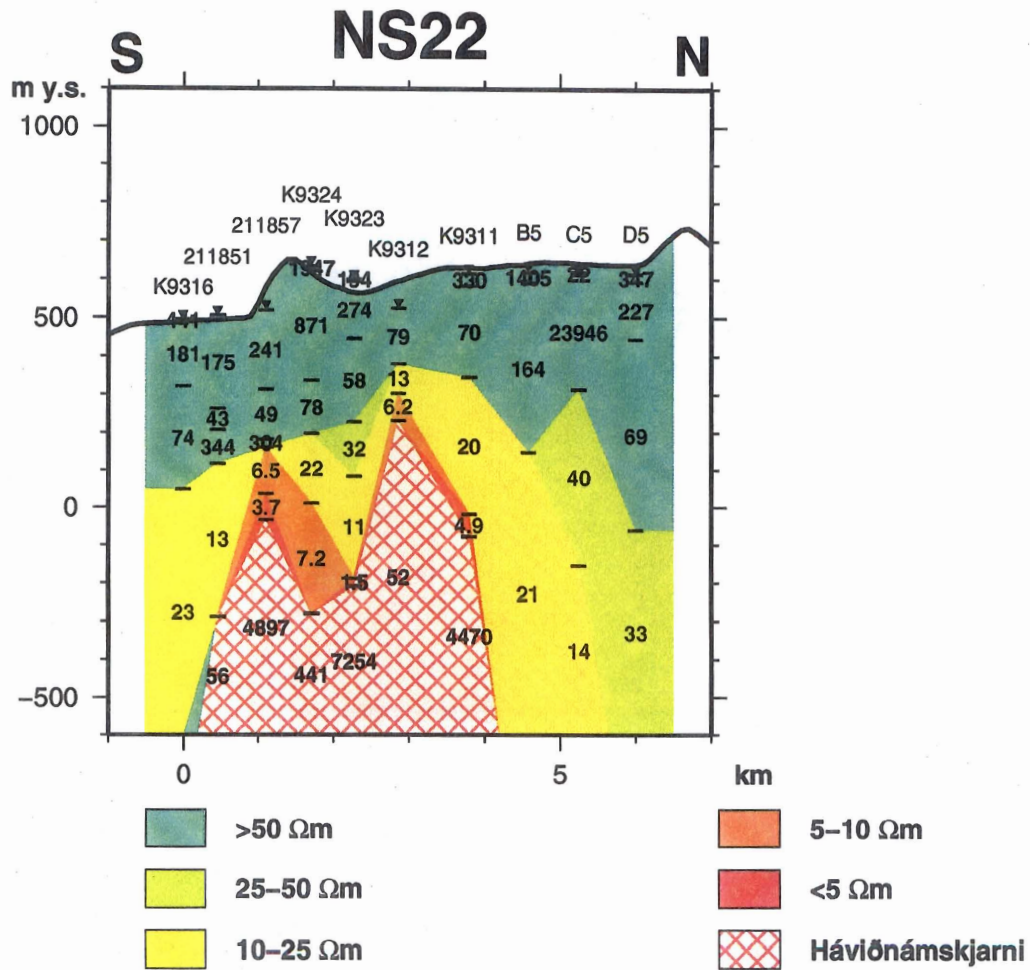
Mynd 9. Norður-suður snið NS19.



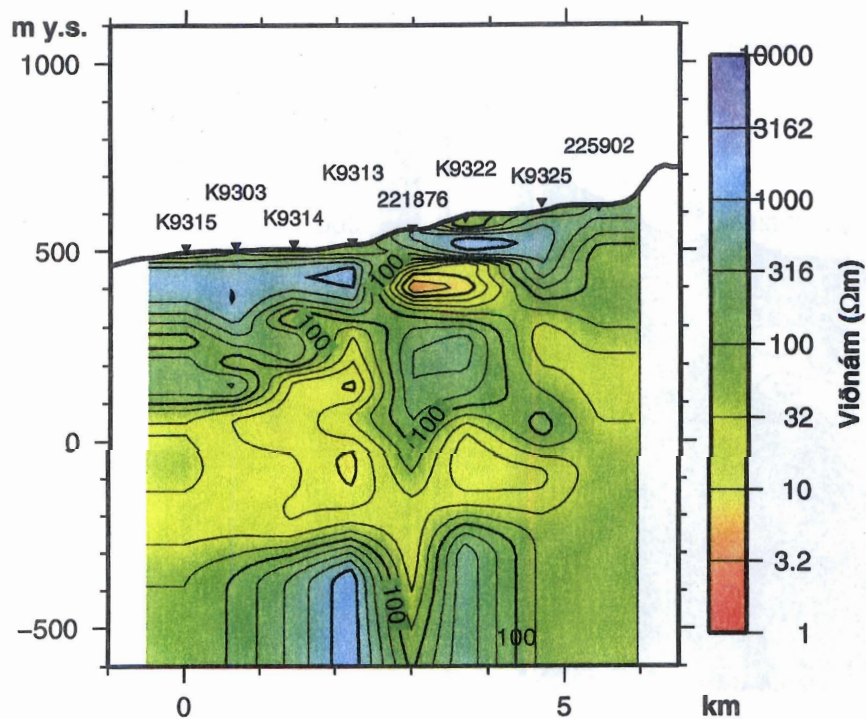
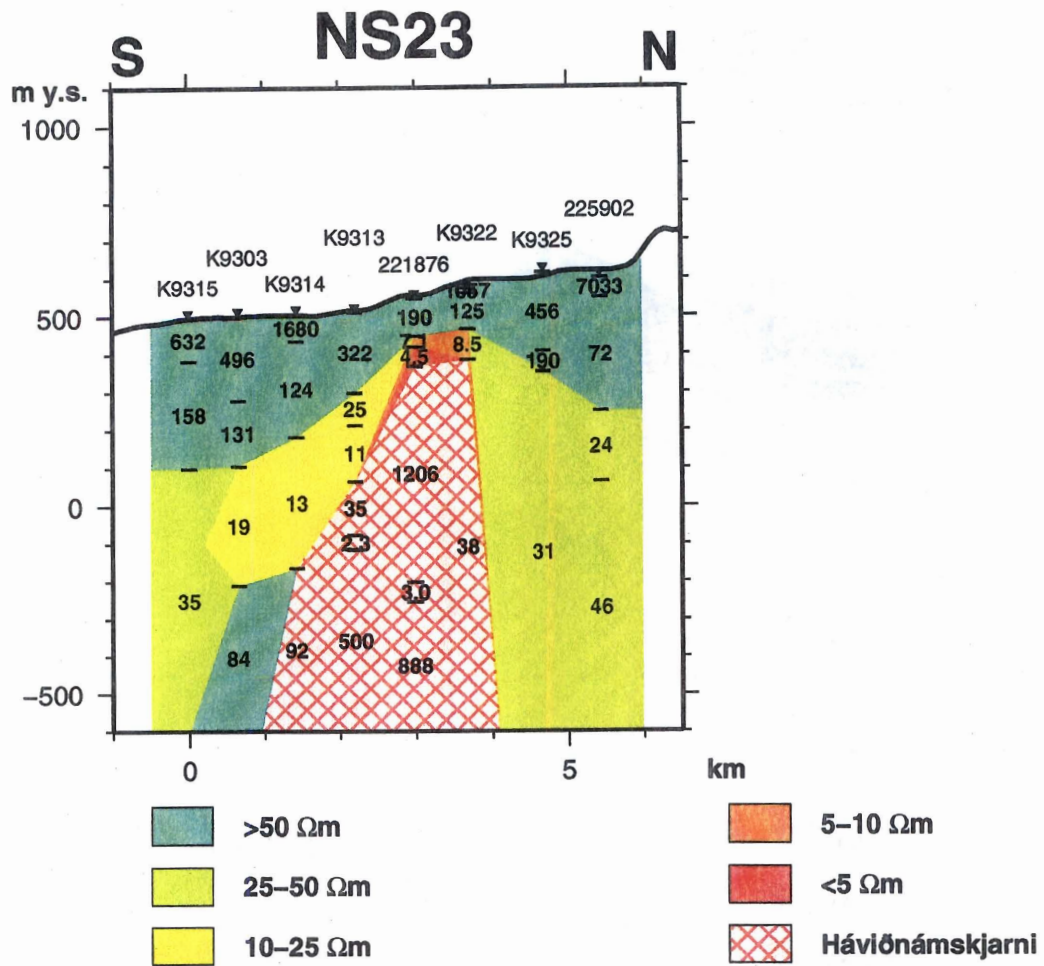
Mynd 10. Norður-suður snið NS20.



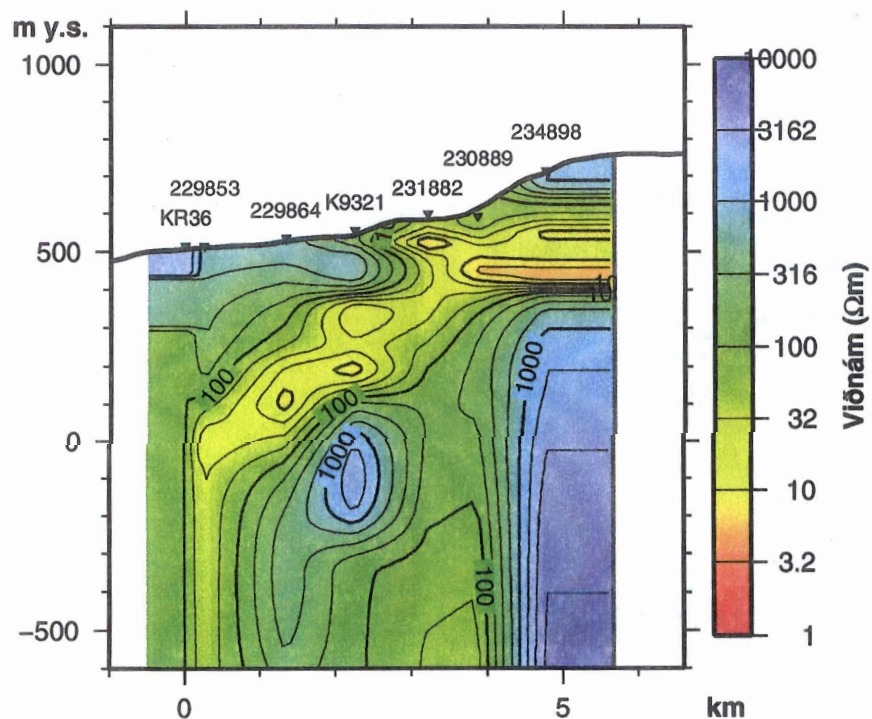
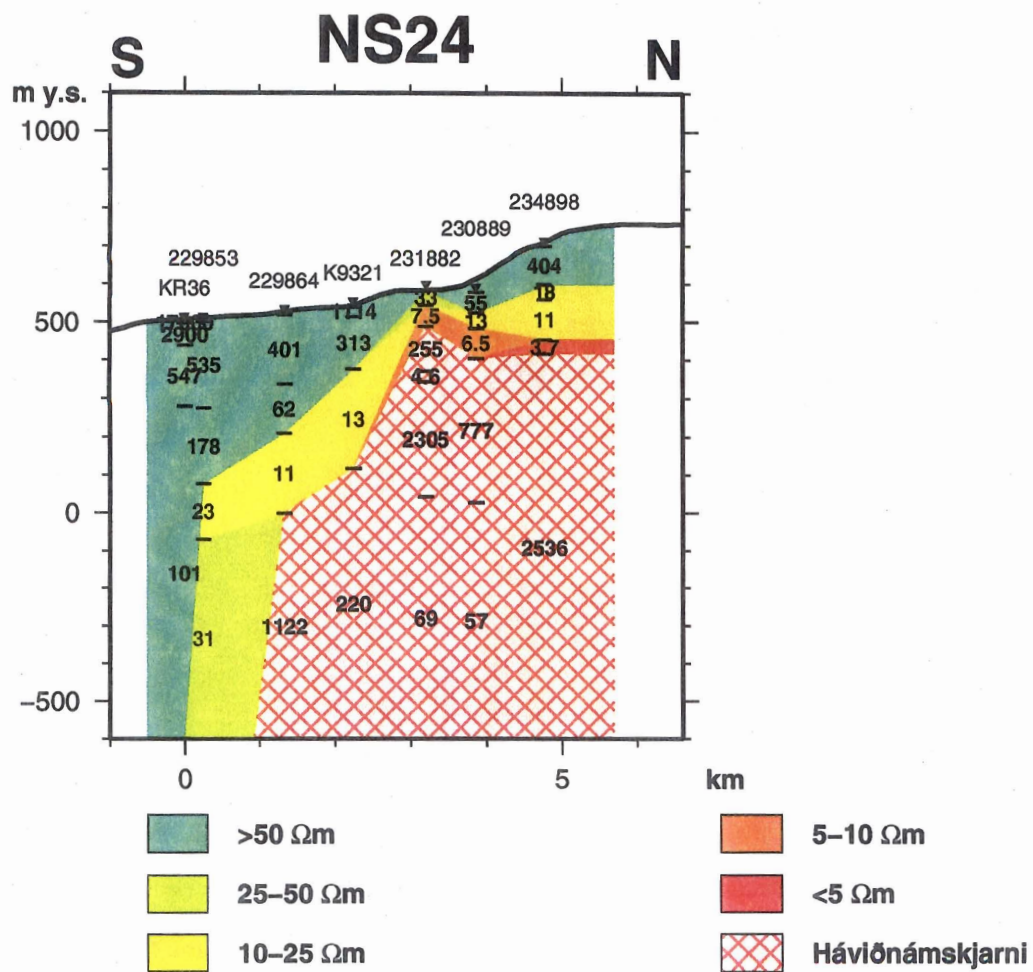
Mynd 11. Norður-suður snið NS21.



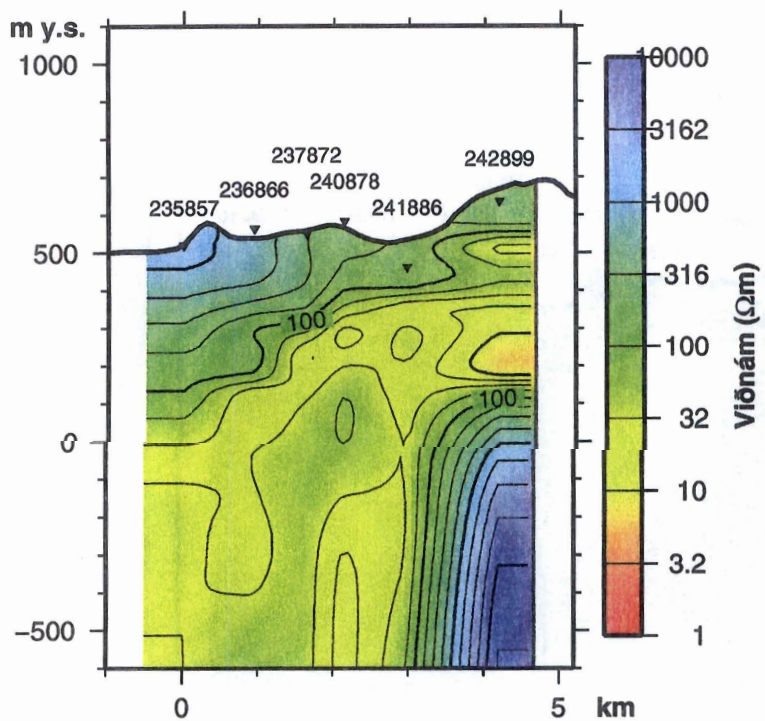
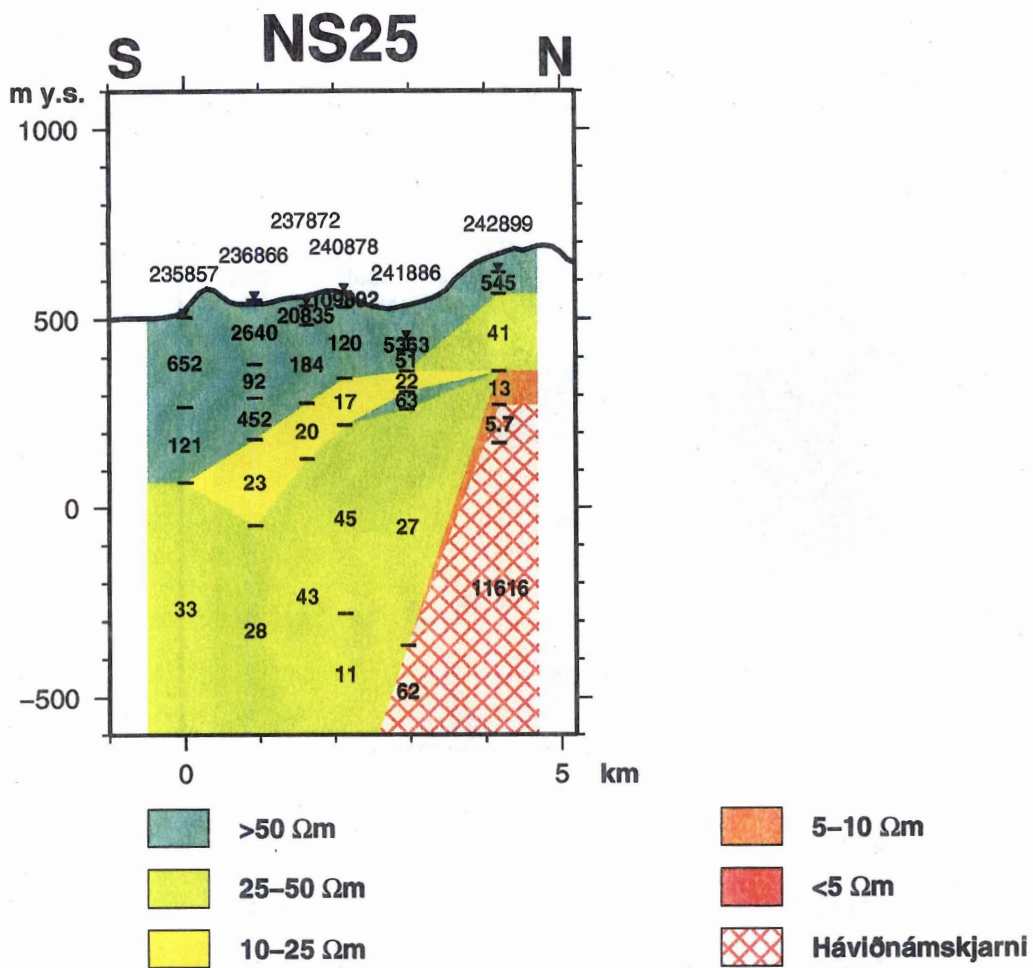
Mynd 12. Norður-suður snið NS22.



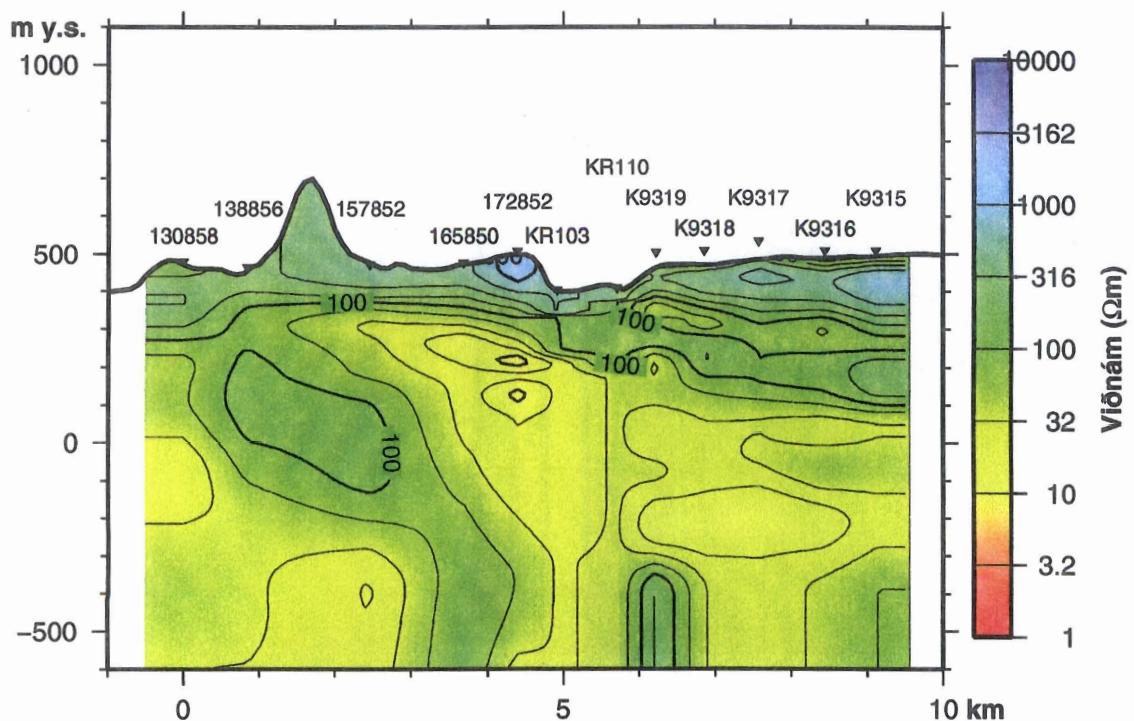
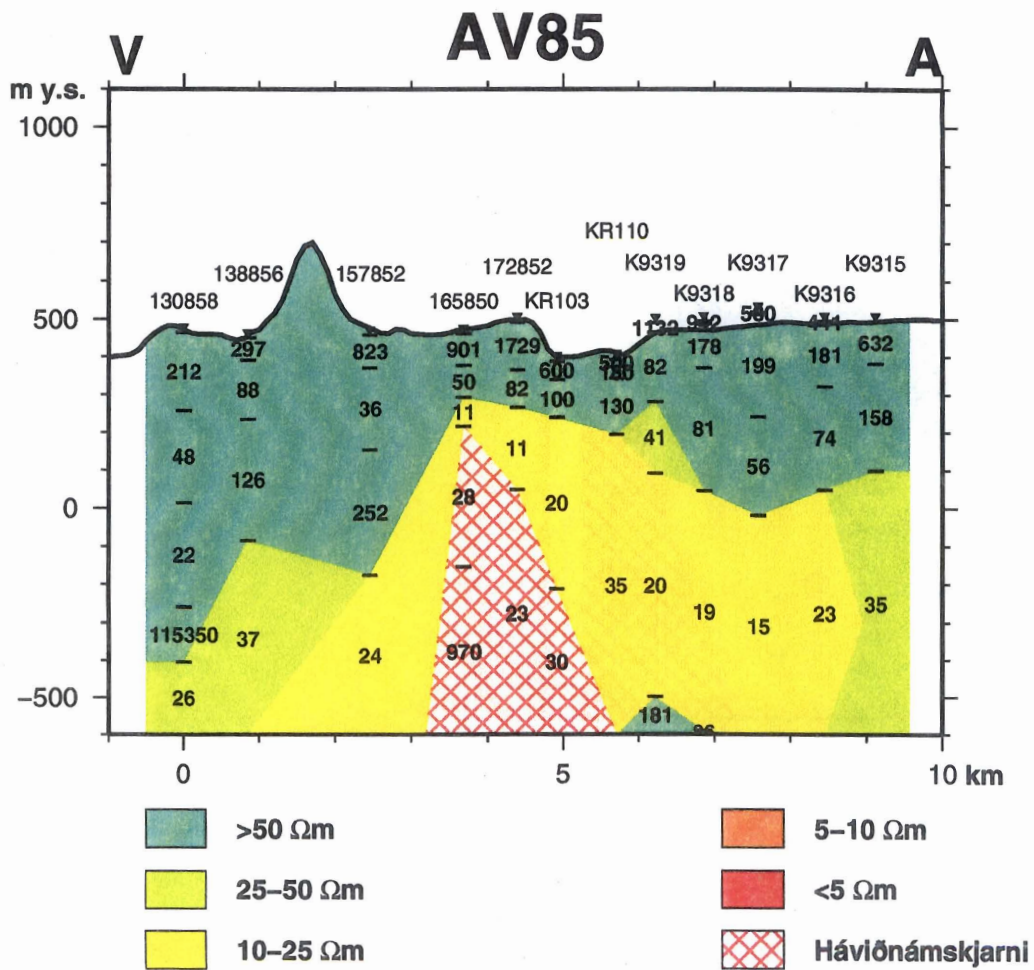
Mynd 13. Norður-suður snið NS23.



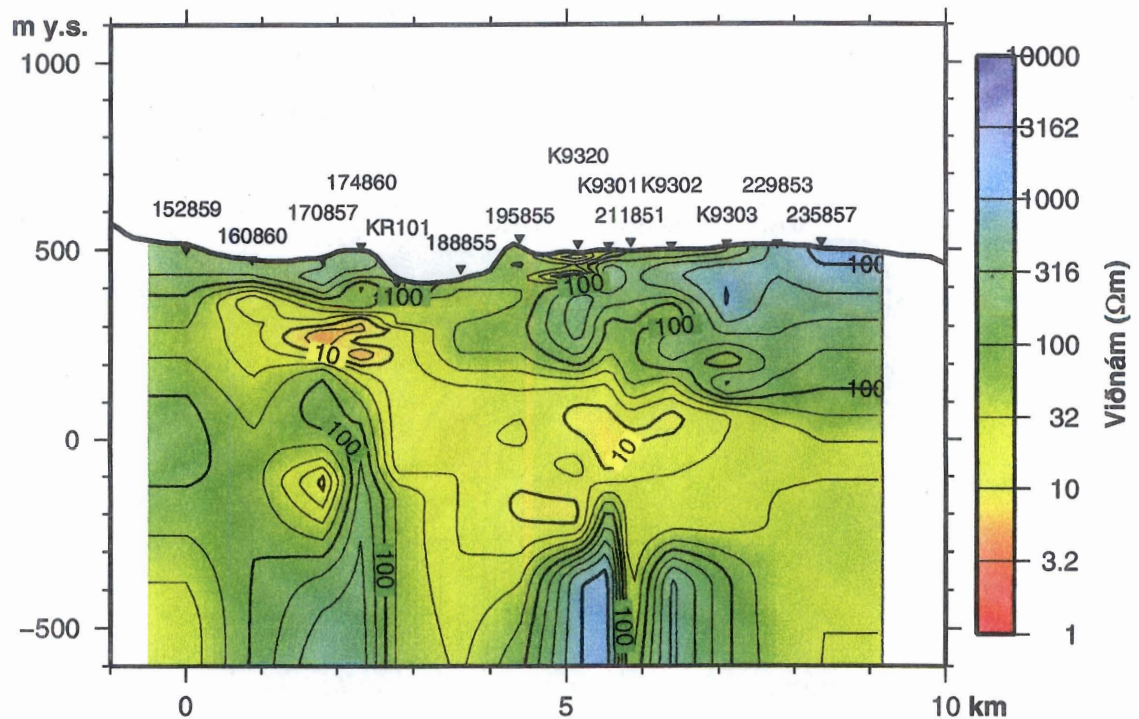
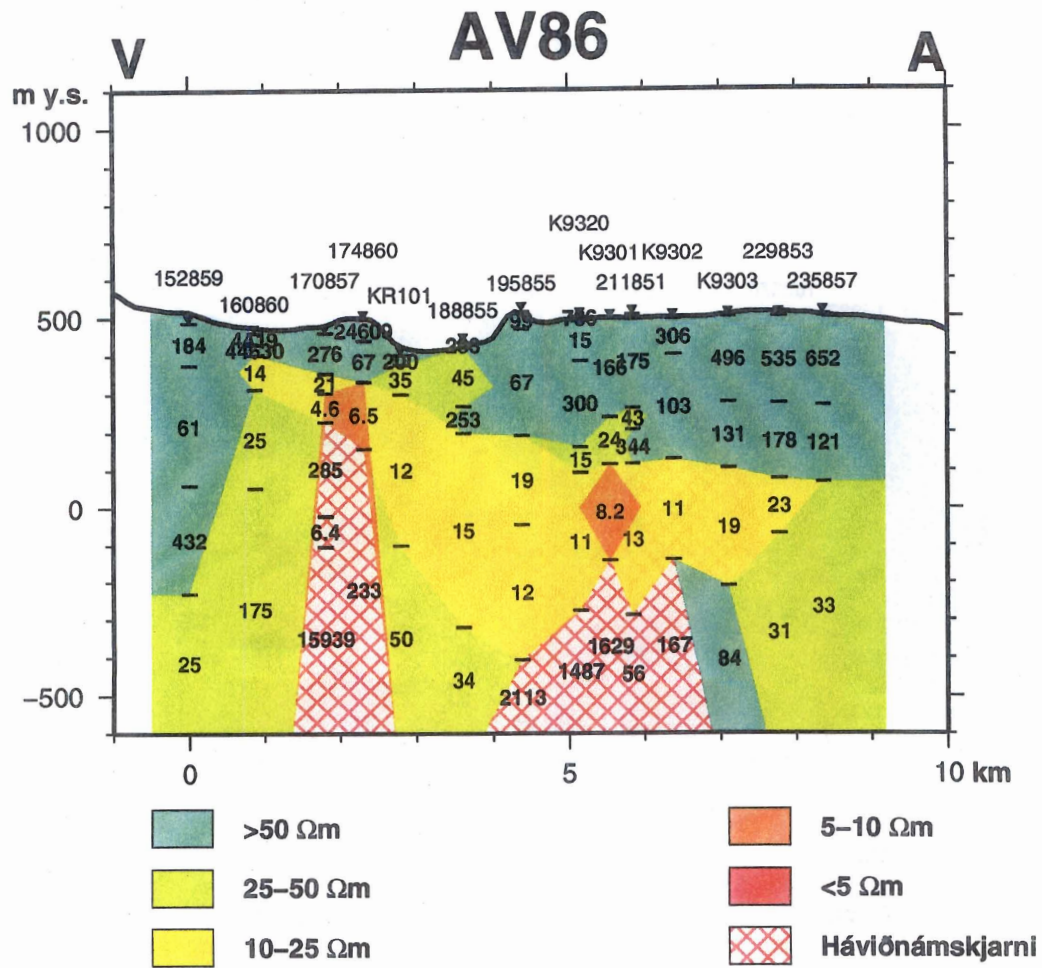
Mynd 14. Norður-suður snið NS24.



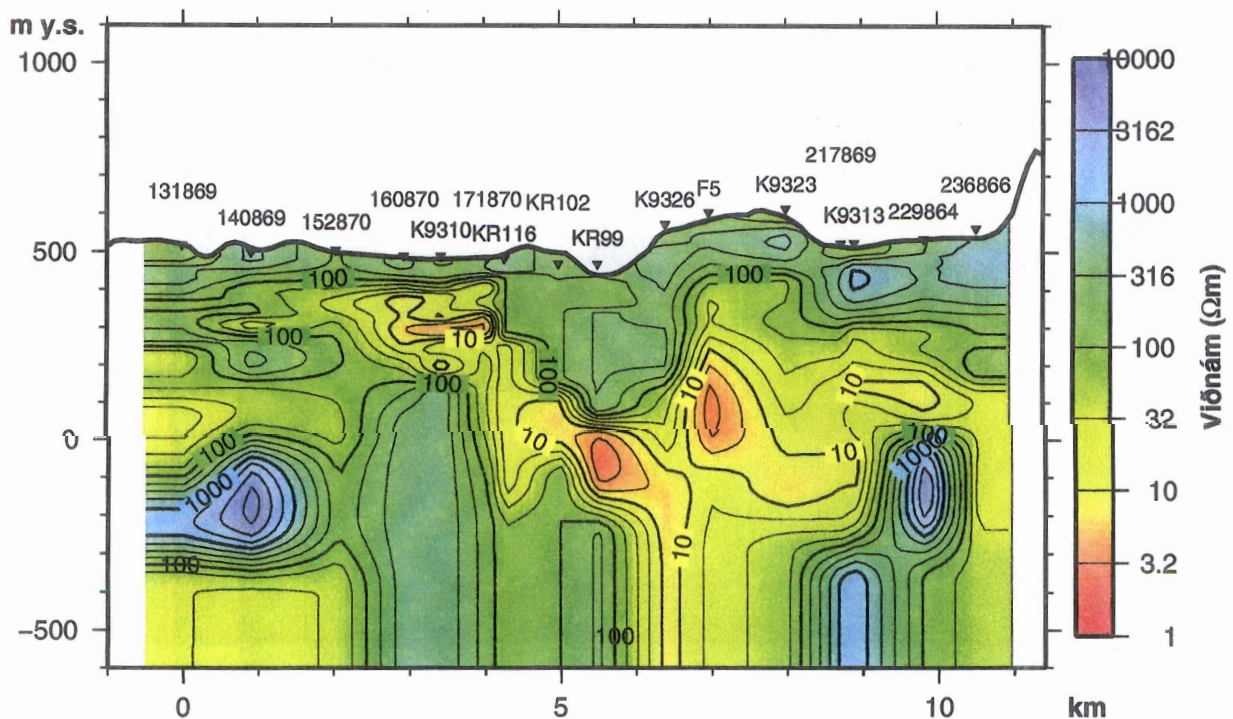
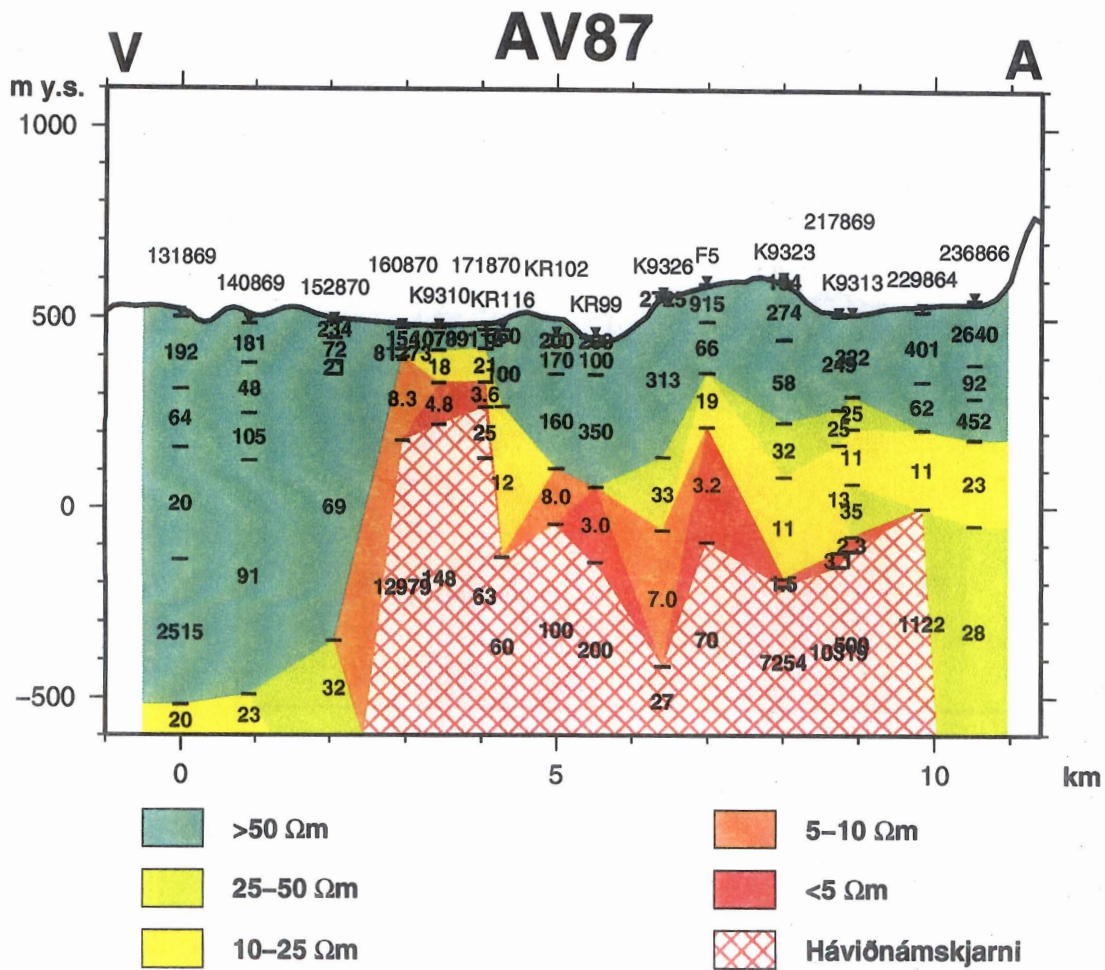
Mynd 15. Norður-suður snið NS25.



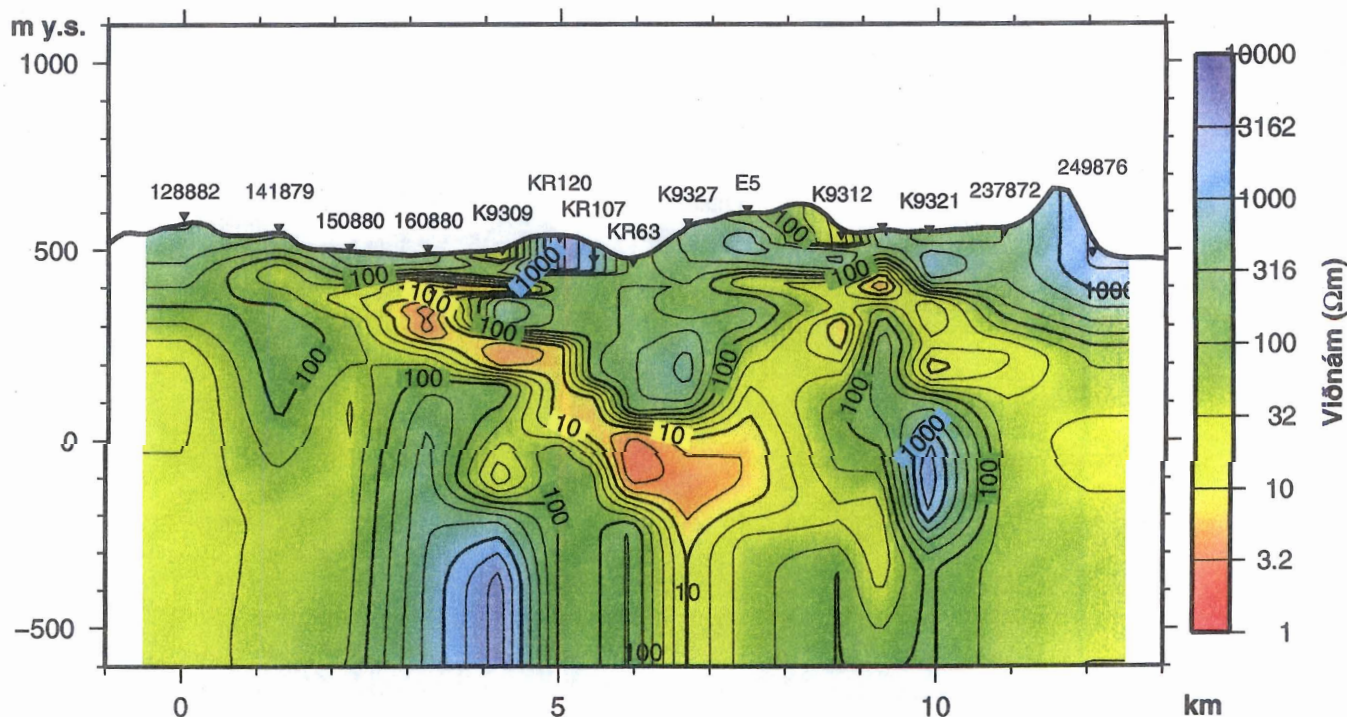
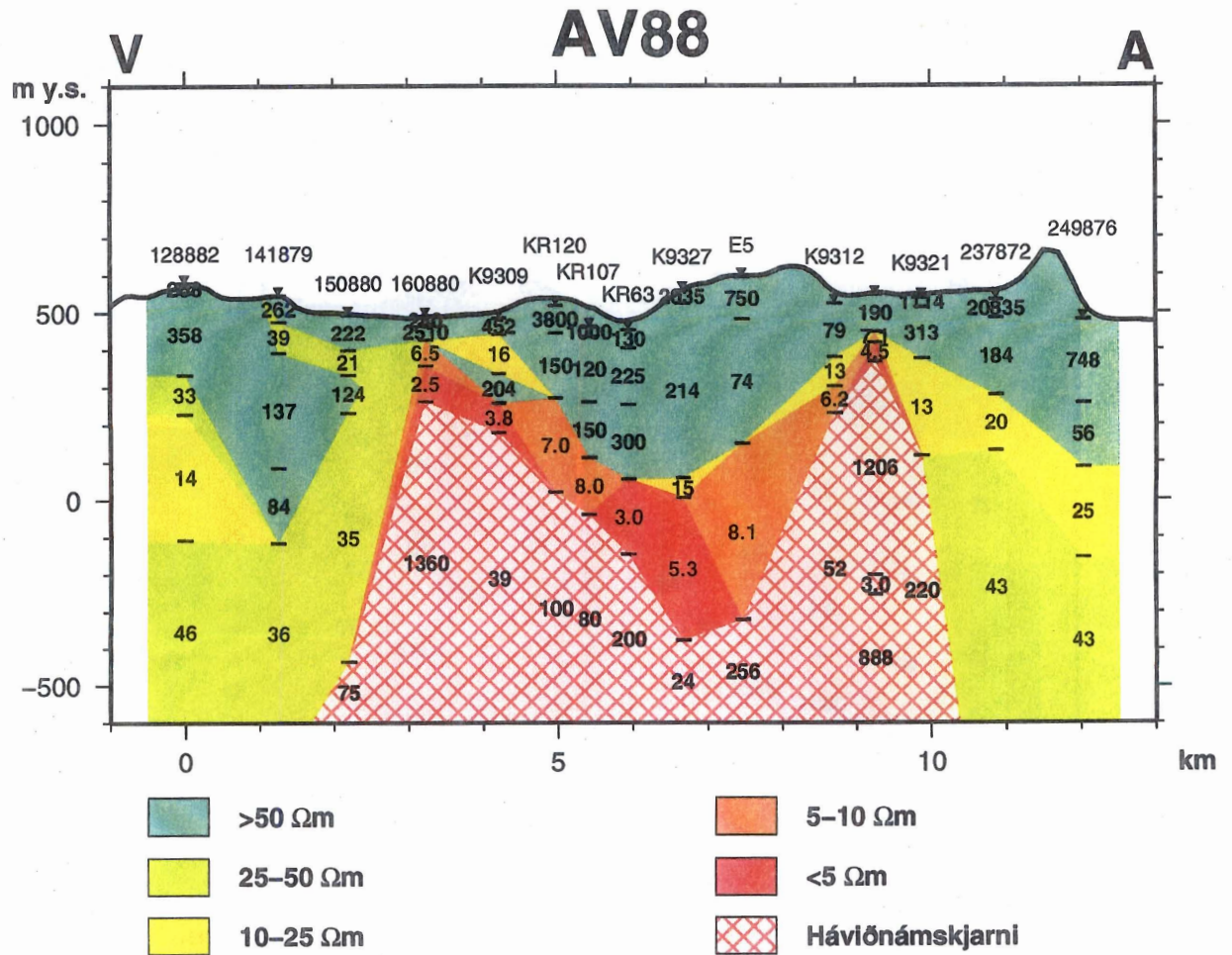
Mynd 16. Austur-vestur snið AV85.



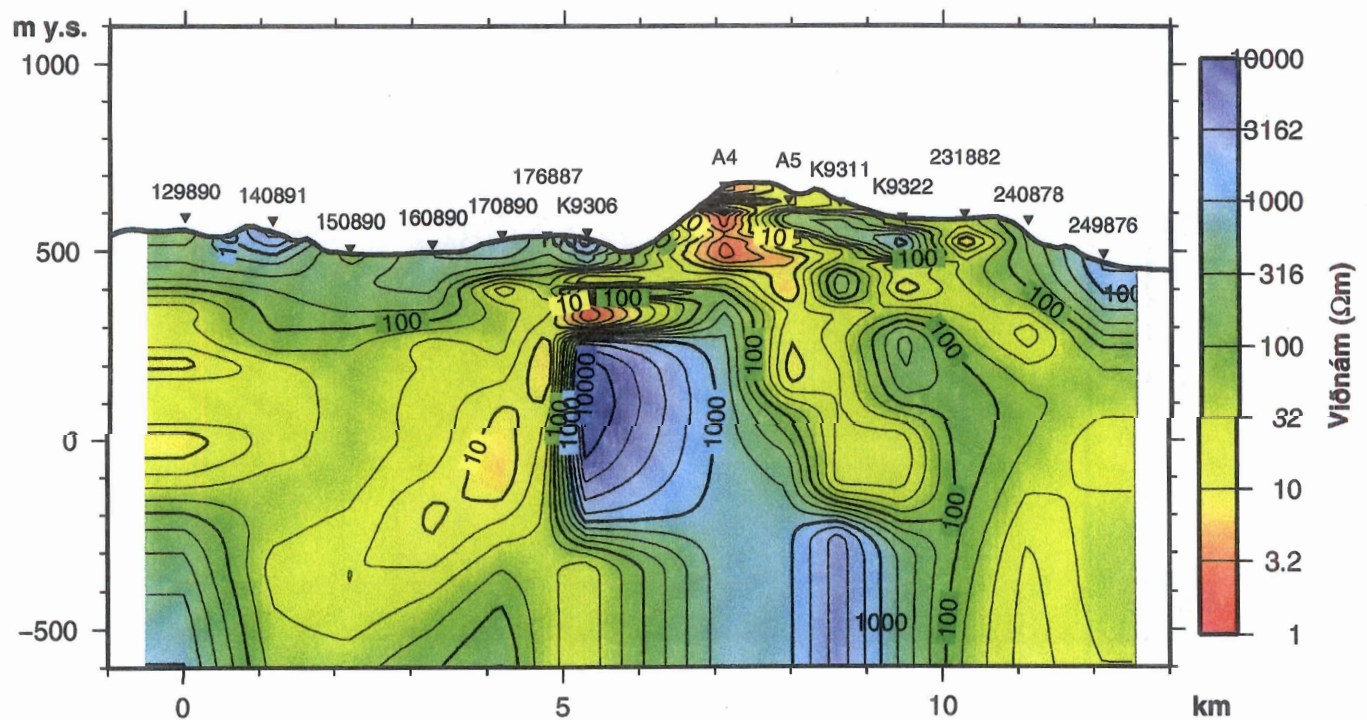
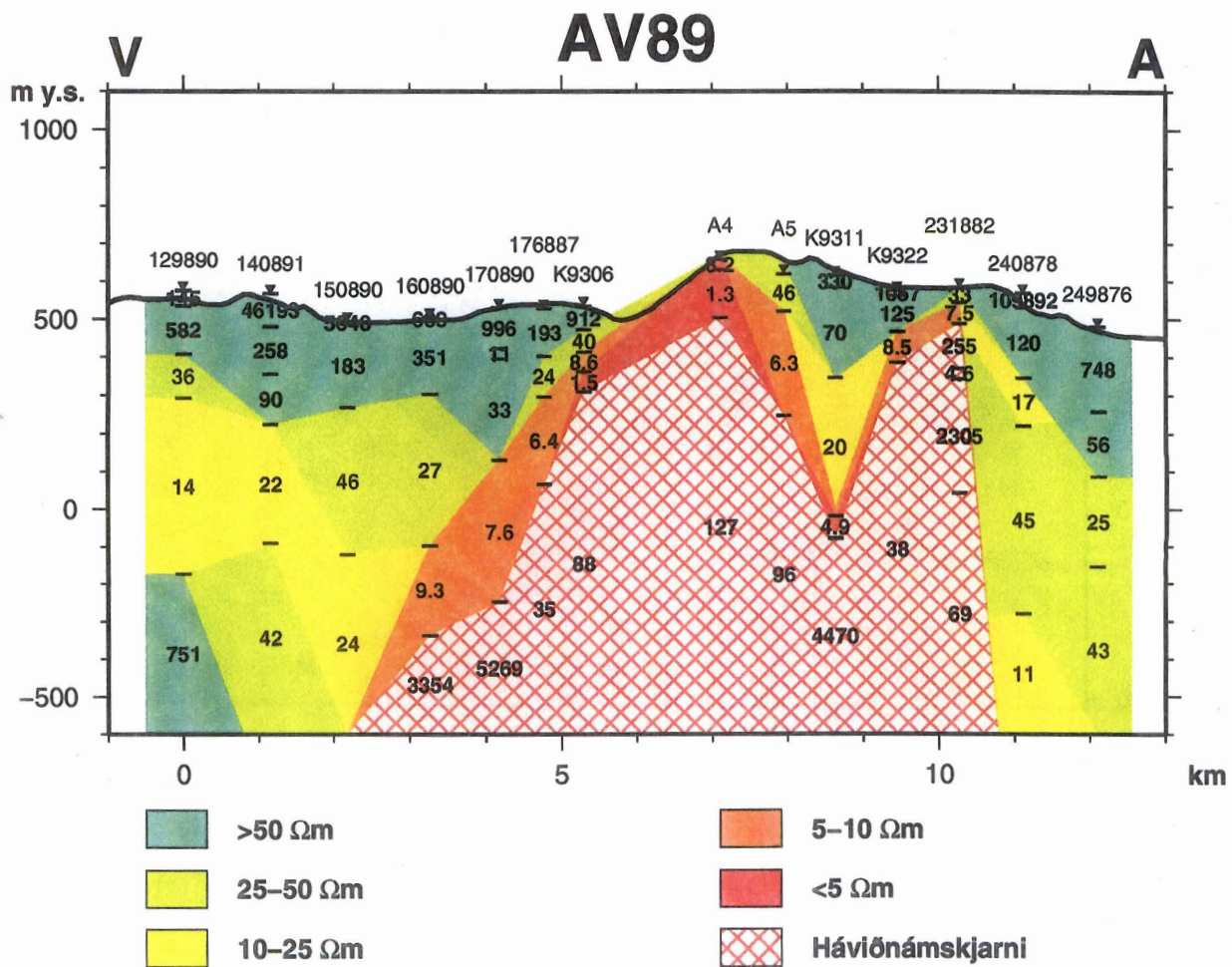
Mynd 17. Austur-vestur snið AV86.



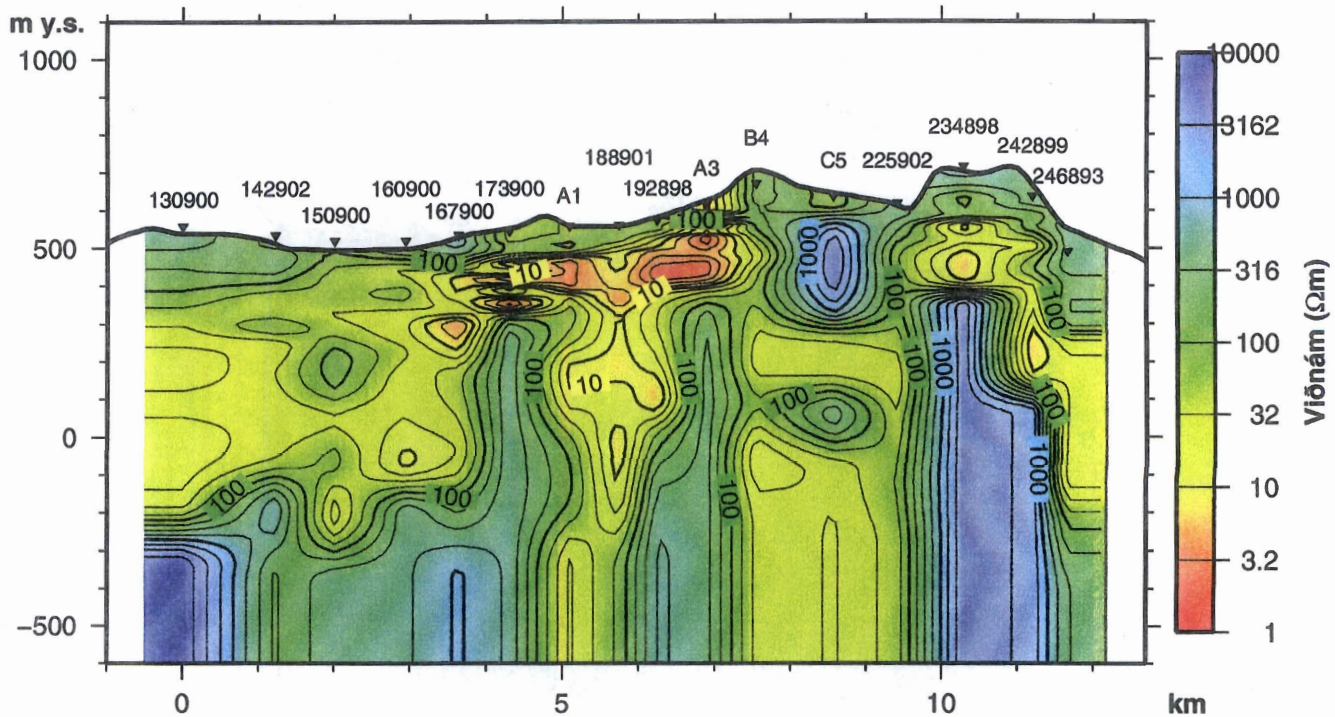
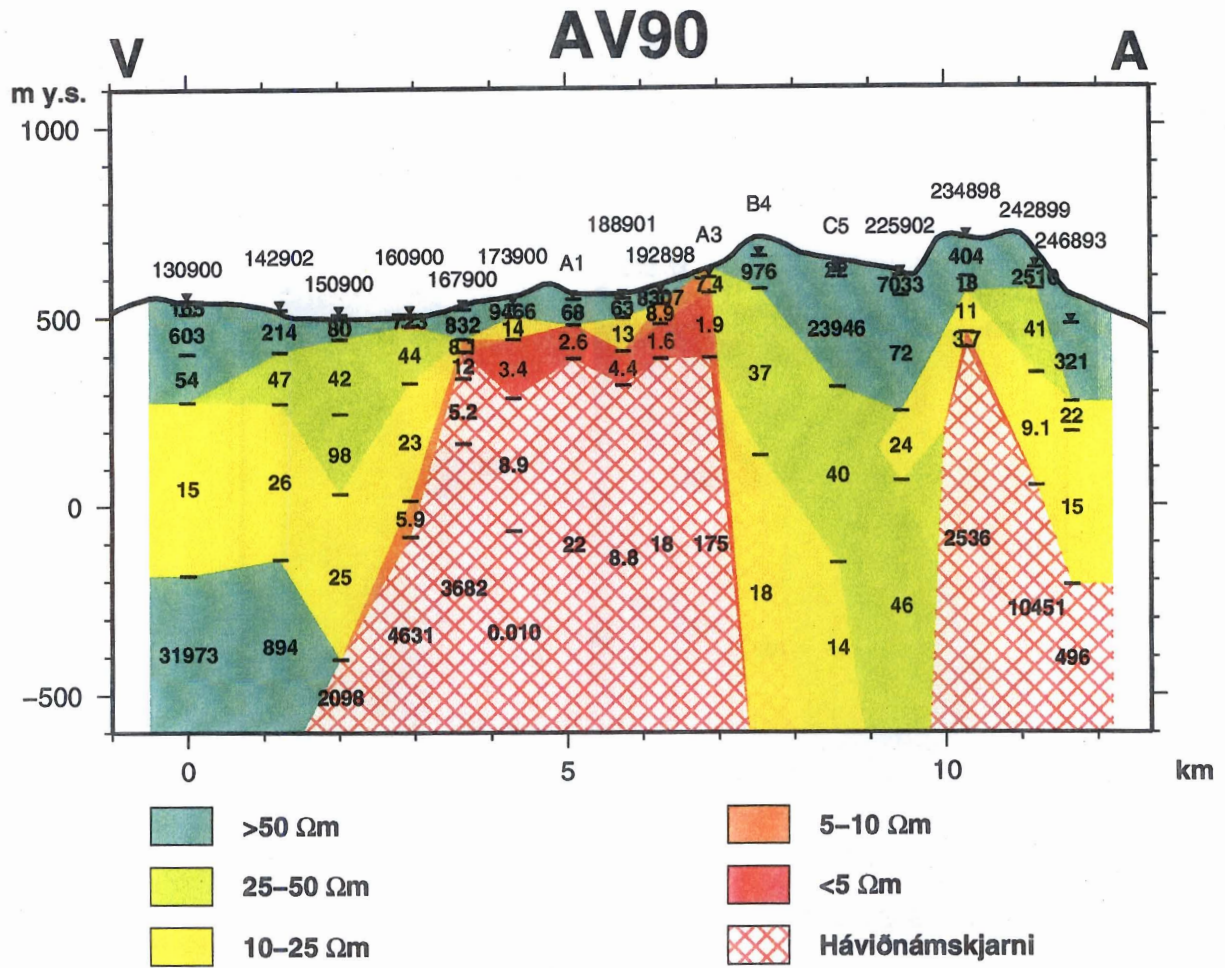
Mynd 18. Austur-vestur snið AV87.



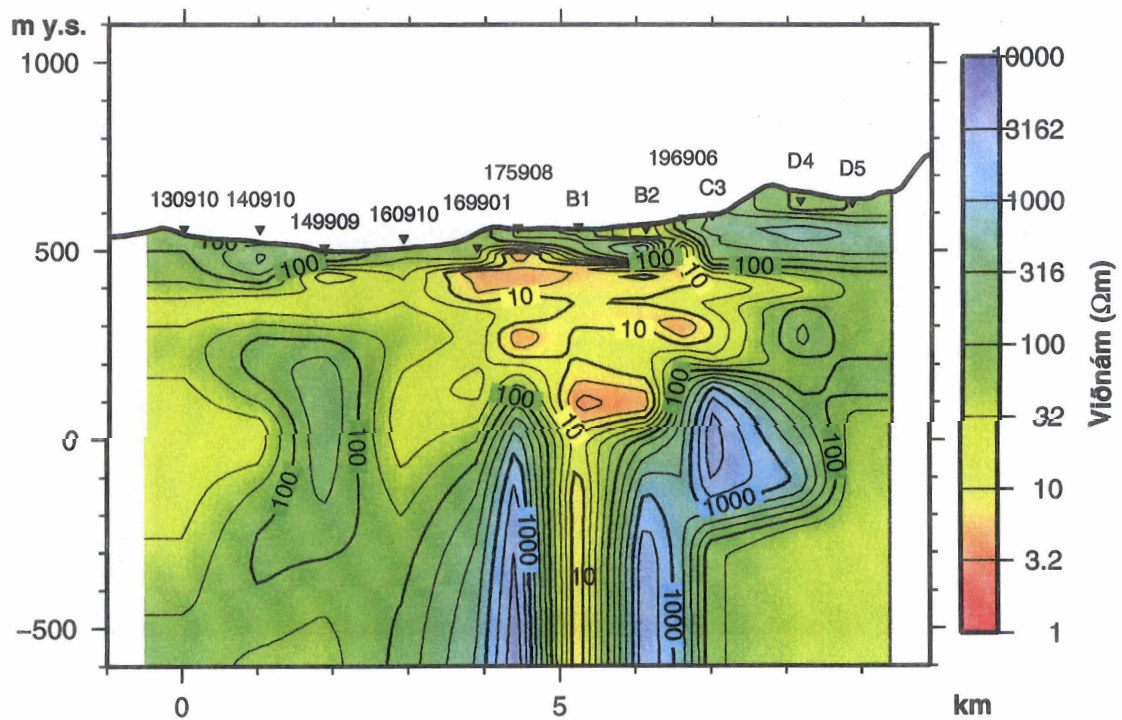
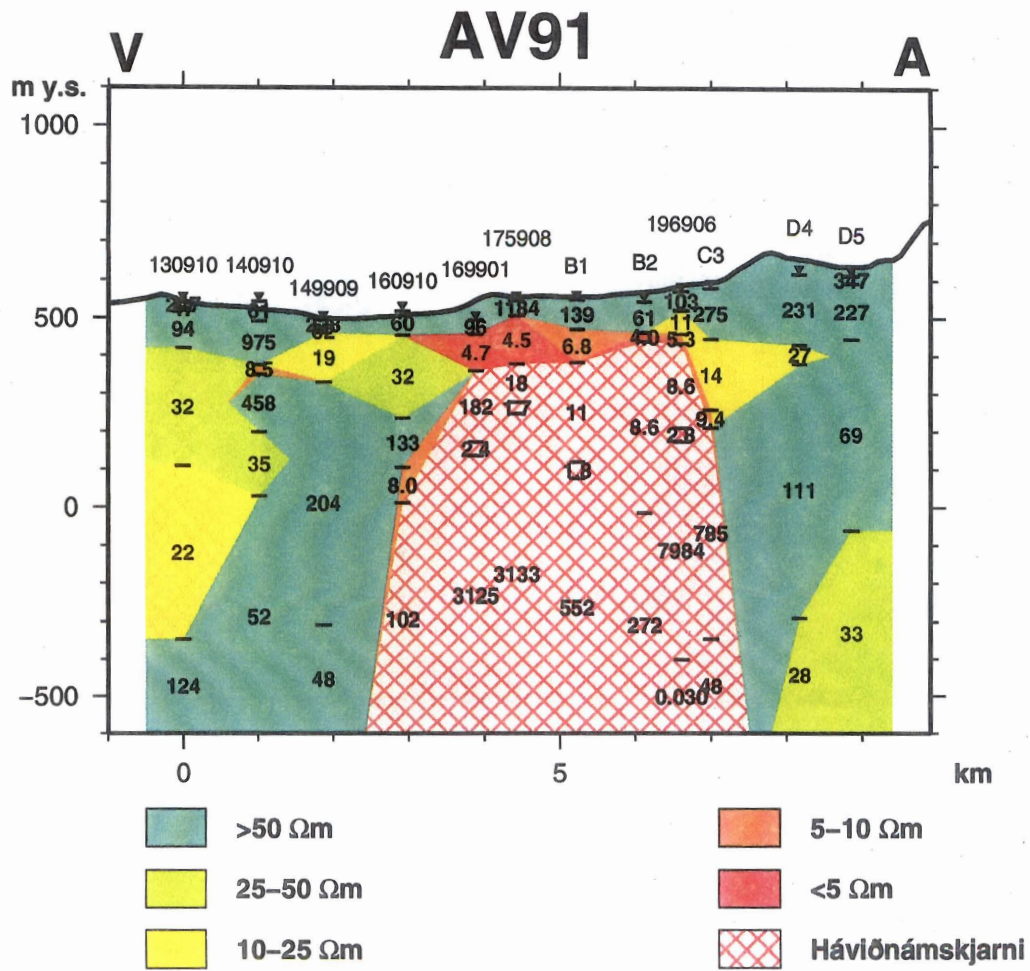
Mynd 19. Austur-vestur snið AV88.



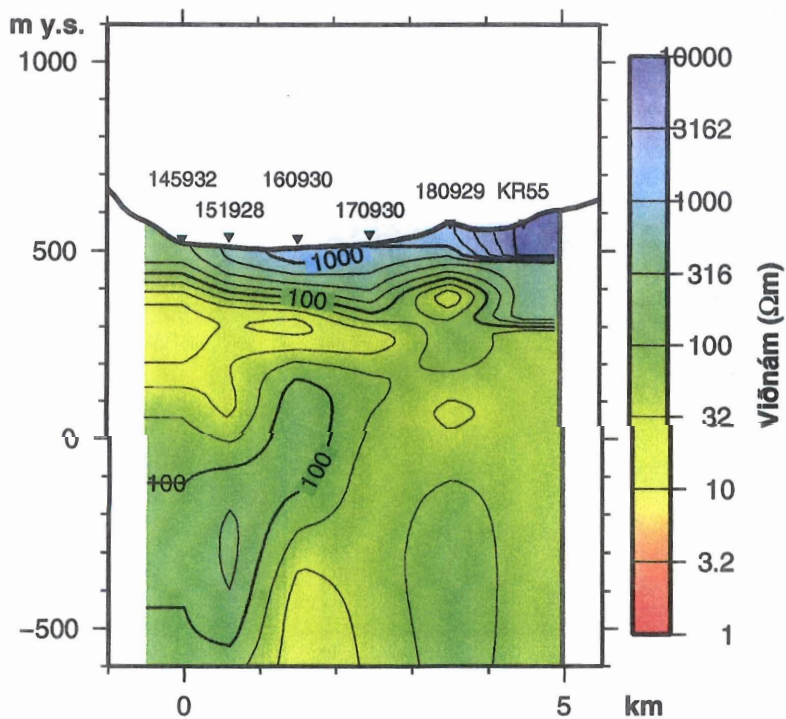
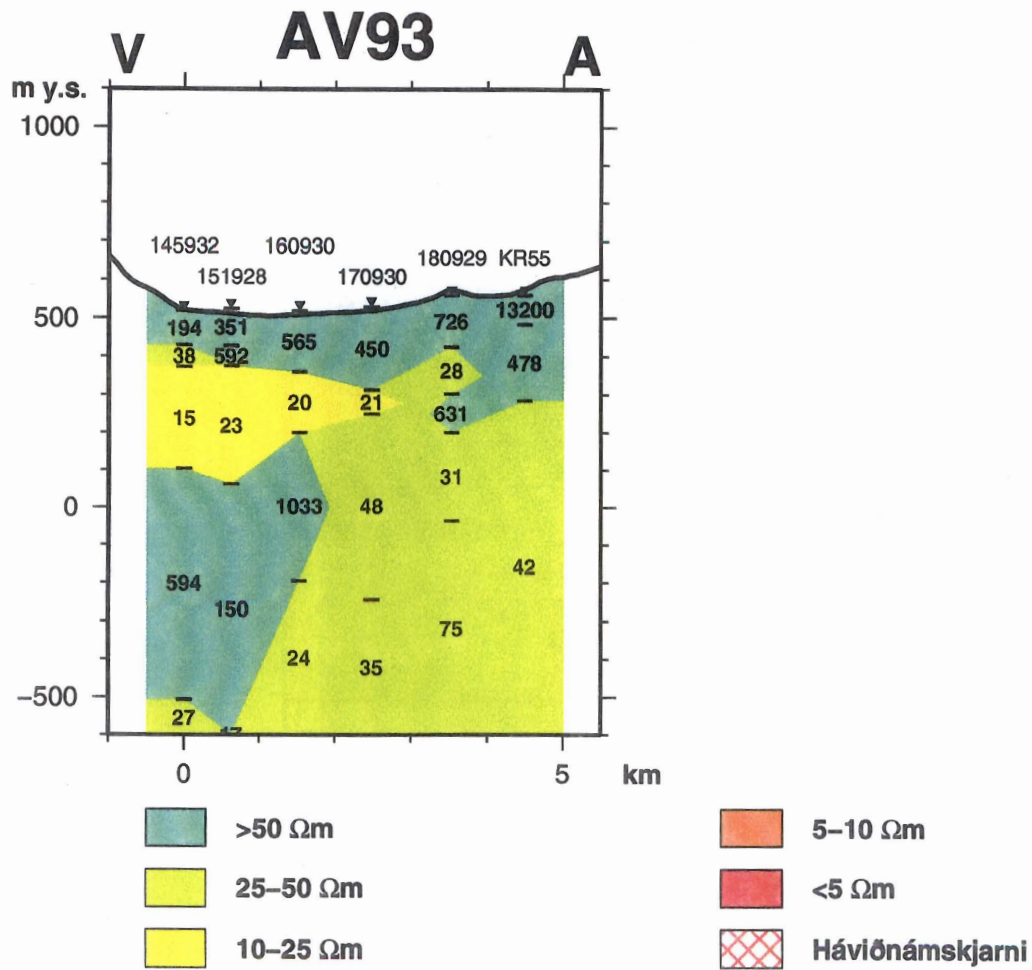
Mynd 20. Austur-vestur snið AV89.



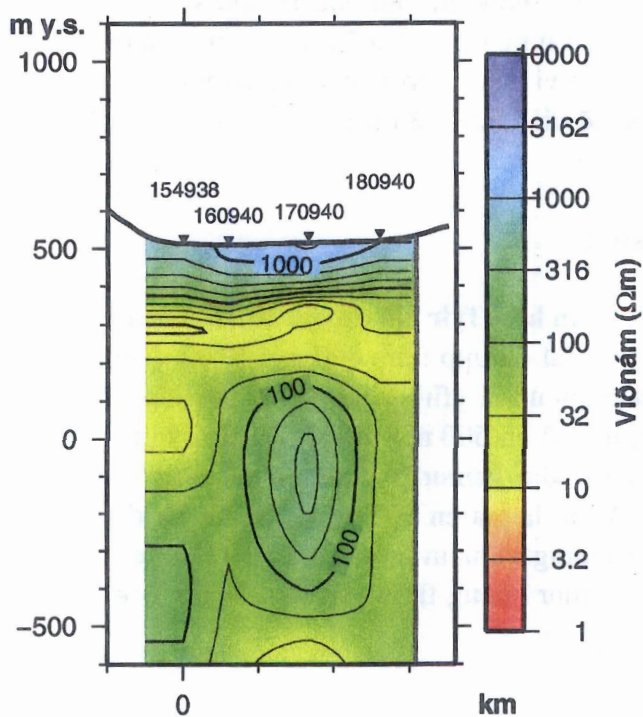
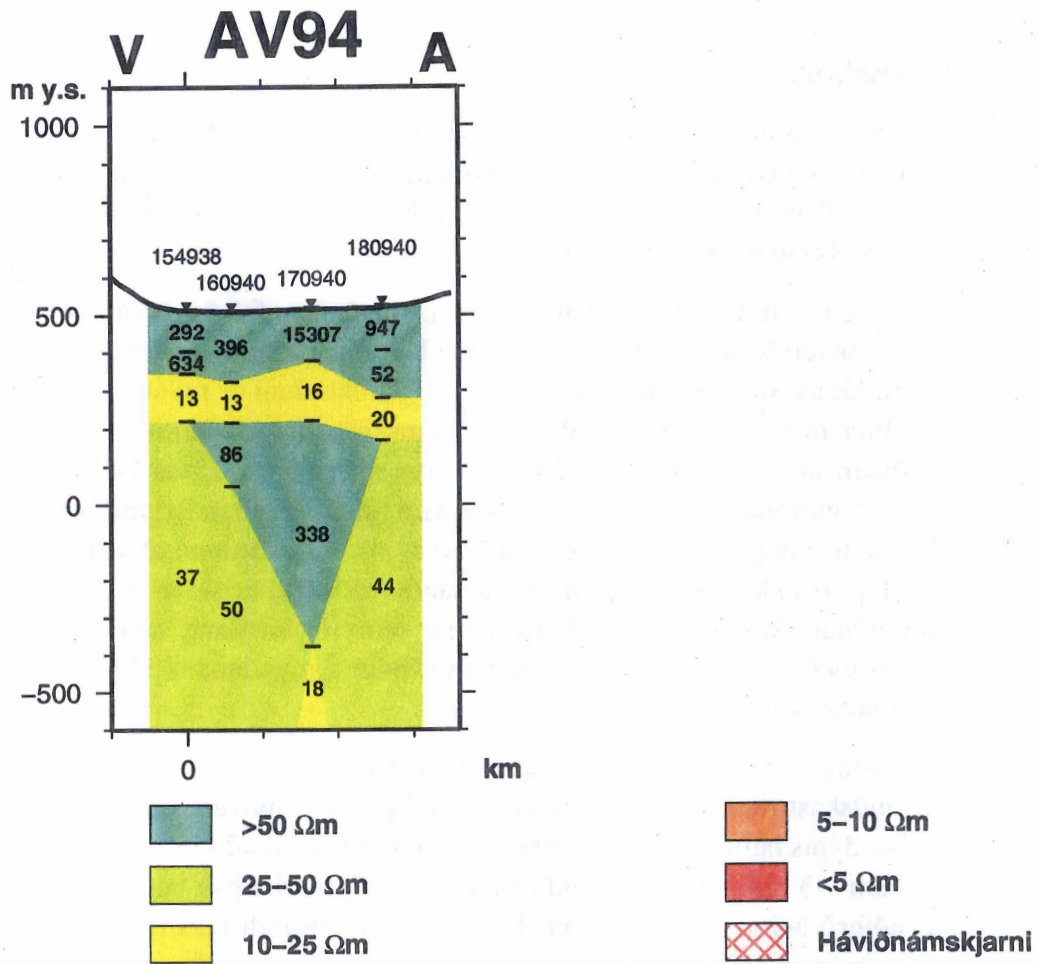
Mynd 21. Austur-vestur snið AV90.



Mynd 22. Austur-vestur snið AV91.



Mynd 24. Austur-vestur snið AV93.



Mynd 25. Austur-vestur snið AV94.

5.2 Viðnámskort

Á myndum 26 til 36 er eðlisviðnám í efsta kílómetra jarðskorpunnar á Kröflusvæðinu sýnt sem jafnviðnámskort í láréttum flötum í mismunandi hæð yfir sjó. Landhæð er víðast á bilinu 500 til 700 m og er efsta kortið dregið í 500 m hæð yfir sjó og síðan með 100 m millibili niður á 500 m undir sjávarmáli.

Kortin eru byggð á túlkun viðnámsmælinganna með "samfelldum" líkönum. Þau eru reyndar ekki raunverulega samfelld, heldur hafa þau mjög mörg viðnámslög þar sem lagþykktirnar eru látnar vaxa logaritmískt með dýpi. Í túlkuninni er reynt að hafa viðnámsbreytinguna litla milli laga. Við gerð jafnviðnámskortanna er unnið með logaritmíska dreifingu viðnámsins. Viðnámsgildi á því dýpi sem um ræðir er ákvarðað út frá vegnum meðaltölum af logaritma viðnámsgilda í lögum kringum viðkomandi dýpi (meðaltölin eru vegin með cosinus glugga sem vex línulega með dýpi). Logaritminn af viðnámsgildum á viðkomandi dýpi (samkvæmt líkönum mismunandi mælinga) er síðan brúaður í láréttum fleti. Á jafnviðnámskortunum eru ekki dregnar jafnviðnámslínur, heldur er viðnámið gefið til kynna með litum og er viðnámskvarði sýndur á myndunum. Hafa ber í huga að litakvarðinn miðast við logaritmann af viðnáminu.

Á viðnámskortunum er svæði þar sem fram kemur hærra viðnám neðan lágviðnáms auðkennd með rauðskástirkun. Rauðskástrikað svæði þýðir að einhvers staðar milli yfirborðs og viðkomandi dýpis hefur viðnám verið lægra en 10 Ω m. Til að fá sjálfvirka ákvörðun á þessum svæðum við brúun viðnámsgildanna og til að afmarka þau betur á myndunum er eftirfarandi aðferð beitt. Fyrir mælingar þar sem viðnámsgildi fara niður fyrir 10 Ω m í "samfelldu" viðnámsíkani og hækka síðan aftur með dýpi, er skipt um formerki á logaritma viðnámsins neðan lægsta viðnámsgildisins. Litakvarðinn á kortunum gefur hinsvegar alltaf til kynna jákvæðan logaríthma af viðnáminu. Þar sem tala með neikvæðan logaríthma er < 1 , þvingast viðnámsgildi á útmörkum rauðskástrikuðu svæðanna alltaf niður í 1 Ω m. Þetta hefur í för með sér að á útmörkum svæða með háu viðnámi neðan lágviðnáms kemur alltaf fram rönd þar sem viðnámskortin sýna viðnám um 1 Ω m (sterkrautt). Þetta þarf hinsvegar ekki að þýða að viðnámið sé í raun og veru svo lágt á þessum stöðum.

5.2.1 Umræða um viðnámskort

Fyrsta viðnámskortið er dregið í **500 m hæð fyrir sjó** (mynd 26). Landhæð á mælisvæðinu er frá því um 400 m yfir sjó í Hlíðardal og upp í um 800 m á Kröflufjalli og Hágöngum. Víðast sýnir því kortið viðnám skammt undir yfirborði og hluti mælinganna er ekki sýndur á myndinni því þær eru í minni hæð en 500 m yfir sjó. Kortið sýnir yfirleitt hátt viðnám (um og yfir 100 Ω m). Lágt viðnám kemur þó fram sunnan og vestan við Kröflu. Einnig sést strax á þessu dýpi viðnám lægra en 10 Ω m norður af Leirhnúk. Mæling við Leirhól í Sandabotnaskarði sýnir einnig viðnám niður undir 10 Ω m rétt undir yfirborði. Undir sunnanverðum Hágöngum kemur einnig fram verulega lægra viðnám en umhverfis.

Í 400 m hæð yfir sjó (mynd 27) er farið að koma fram afgerandi viðnámsfrávik frá vesturhlíðum Kröflu og til norðvesturs, vestur fyrir Leirhnúk. Farið er að sjást í hátt viðnám undir lágu undir vesturhlíðum Kröflu og brekkubrúninni norðan Leirbotna. Einnig er viðnám farið að hækka aftur frá Kröfluhálsi norðan Vítis og vestur undir Leirhnúk og eins vestan við Leirhnúk. Auk viðnámsfráviksins milli Kröflu og Leirhnúks kemur strax fram á þessu dýpi, mjög afgerandi viðnámsfrávik með háu viðnámi neðan lágviðnáms, undir sunnanverðum Hágöngum, skammt austan við öskjujaðarinn. Þetta frávik er ekki afmarkað til norðurs. Til þess þarf frekari mælingar. Þá er einnig farið að sjá merki um lækkanandi viðnám til SV frá Leirhnúk og sunnan við Sátu í Leirhnúkshrauni er viðnám vel innan við 10 Ωm.

Í 300 m hæð yfir sjó (mynd 28) er orðið samfelld um 2 km breitt viðnámsfrávik frá vesturhlíðum Kröflu og til norðvesturs yfir Leirhnúk. Undir sunnanverðum Hágöngum hefur viðnámsfrávikðið stækkað til suðurs undir Sandabotna og komið er fram mjög afgerandi hærri viðnám neðan lágviðnáms. Í Leirhnúkshrauni, suðvestur af Þríhyrningum er viðnám orðið lægra en 10 Ωm á svæði sem teygir sig frá Sátu og í átt að Hvíthólaklifi.

Í 200 m hæða yfir sjó (mynd 29) hefur viðnámsfrávikðið frá Kröflu, vestur um Vítismó og yfir Leirhnúk stækkað nokkuð, einkum til norðurs frá Víti. Á þessu dýpi er það farið að tengjast suðurenda viðnámsfráviksins frá Hágöngum, en greinilegur svangi er í viðnámsfrávikinu austan holu KJ-18 og við Hrafninnuhygg. Á þessu dýpi mynda suðurmörk þessara viðnámsfrávika afgerandi línu frá Sandabotnum, um suðurhlíðar Kröflu, brekkubrúnina upp af Leirbotnum og til VNV í sunnanverðan Leirhnúk. Þessi lína á eftir að vera nokkuð afgerandi á næstu kortum. Undir Leirhnúkshrauni, suður af Sátu og til suðvesturs frá Þríhyrningum er farið að koma fram afgerandi viðnámsfrávik með hærri viðnámi undir lágu, sem teygir sig til SSV undir vestanverðu Dalfjalli, eins langt og mælingar ná.

Í 100 m hæð yfir sjó (mynd 30) hefur orðið lítil breyting á viðnámsfrávikinu um Leirhnúk, austur um Kröflu og við Hágöng. Suðurmörk þess eru enn skörp frá Leirhnúk og til ASA í Sandabotna. Þó er farið að sjást lægra viðnám til suðurs frá Leirhnúk, milli frávikanna við Leirhnúk og undir Leirhnúkshrauni. Viðnámsfrávikðið undir Leirhnúkshrauni hefur einnig stækkað nokkuð og er farið að teygja sig til austurs að Hvíthólaklifi. Þá er einnig farið að sjást í lágt viðnám undir sunnanverðu Sandabotnafjalli, bæði fyrir því miðju og eins við gíginn í SA-horni þess.

Við sjávarmál (mynd 31) hefur norðurhluti fráviksins undir Hágöngum breikkað til austurs og er það áberandi opið til NA vegna skorts á mælingum. Viðnámsfrávik með háu viðnámi undir lágu teygir sig nú lengra til vesurs í átt til Hvannstöðs. Við sjávarmál eru viðnámsfrávikin í NA-hluta öskjunnar og undir Leirhnúkshrauni SV af Þríhyrningum, sem til þessa hafa verið aðskilin, farin að tengjast með háu viðnámi neðan lágviðnáms suður frá Leirhnúk. Einnig er komið lágt viðnám undir Leirbotnum og NV verðum Hlíðardal. Loks er, auk lágs viðnáms undir sunnanverðu Sandabotnafjalli, komið afgerandi lágt viðnám og með hærri undir við Leirhól.

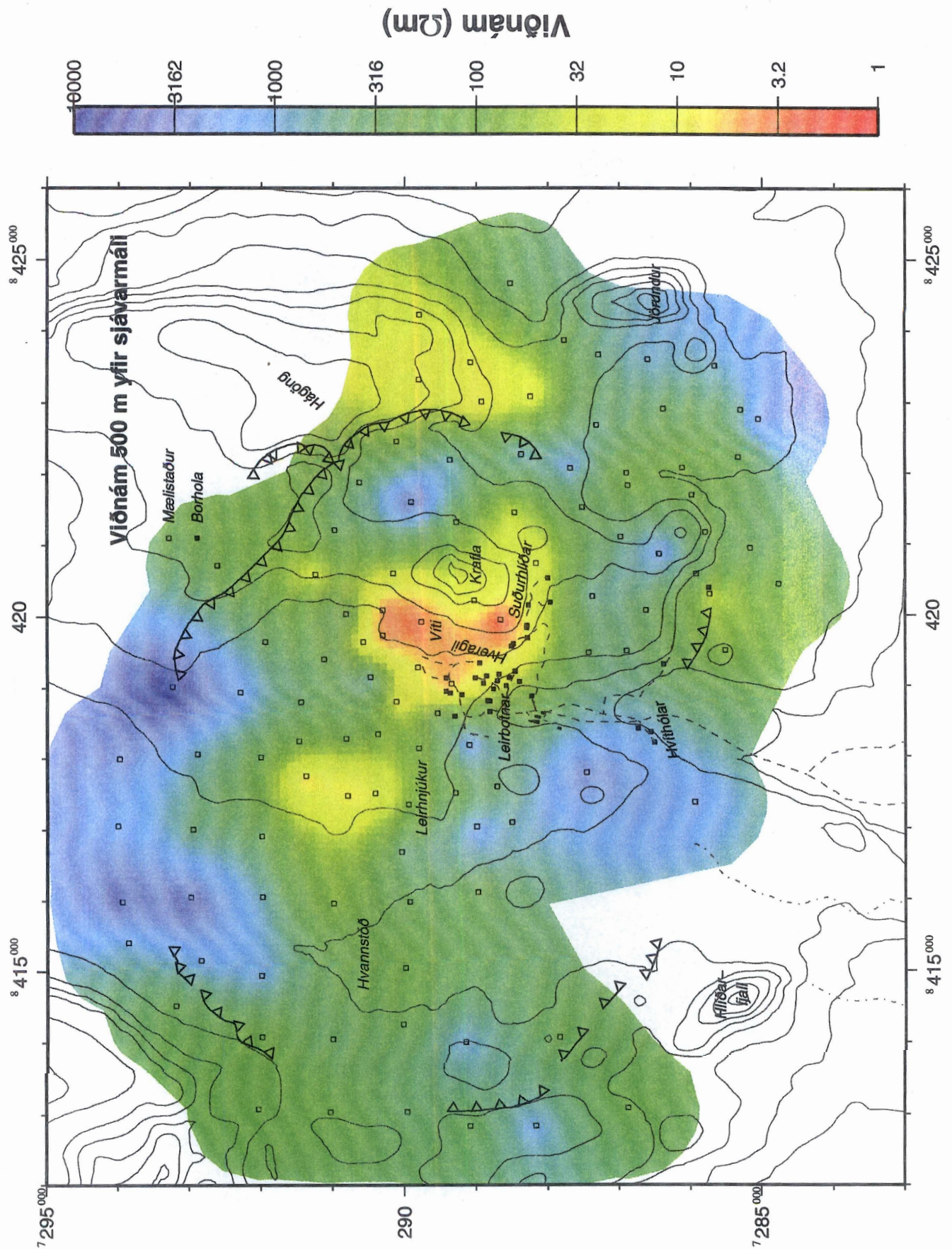
100 m neðan sjávarmáls (mynd 32) er viðnámsfrávikíð undir Hágöngum, á austurjaðri mælisvæðisins, farið að teygja sig til suðurs að Jörundi og einnig til suðurs með honum að vestan. Þá er tenging frá Sandabotnum að suðurhlíðum Kröflu orðin meira áberandi og frávikíð um norðanvert miðbik öskjunnar hefur teygt sig lengra til norðurs og eins til vesturs, að Hvannstóði. Hátt viðnám er einnig komið fram undir Dalfjalli og Þríhyrningadal vestan virkjunarinnar og því orðin ákveðin tenging við viðnámsfrávikíð undir Leirhnúkshrauni í suðvestri. Undir sunnaverðu Sandabotnafjalli er líka farið að sjá í hækkandi viðnám undir lágviðnámi.

200 m neðan sjávarmáls (mynd 33) tengist hátt viðnám neðan lágviðnáms frá því vestan við Jörund og vestur í Sandabotnaskarð og sunnavert Sandabotnafjall. Þá hefur hátt viðnám neðan lágviðnáms breiðst lengra til ausurs undir Hlíðardal, norðan Hvíthóla. Viðnámsfrávikíð um miðbik norðurhluta öskjunnar hefur einnig teygt sig ögn til norðurs. Suðvestur af Leirhnúk hefur, allavega niður á þetta dýpi, verið greinilegt vik í viðnámsfrávikíð úr vestri, en nú er þar farið að koma fram lágt viðnám.

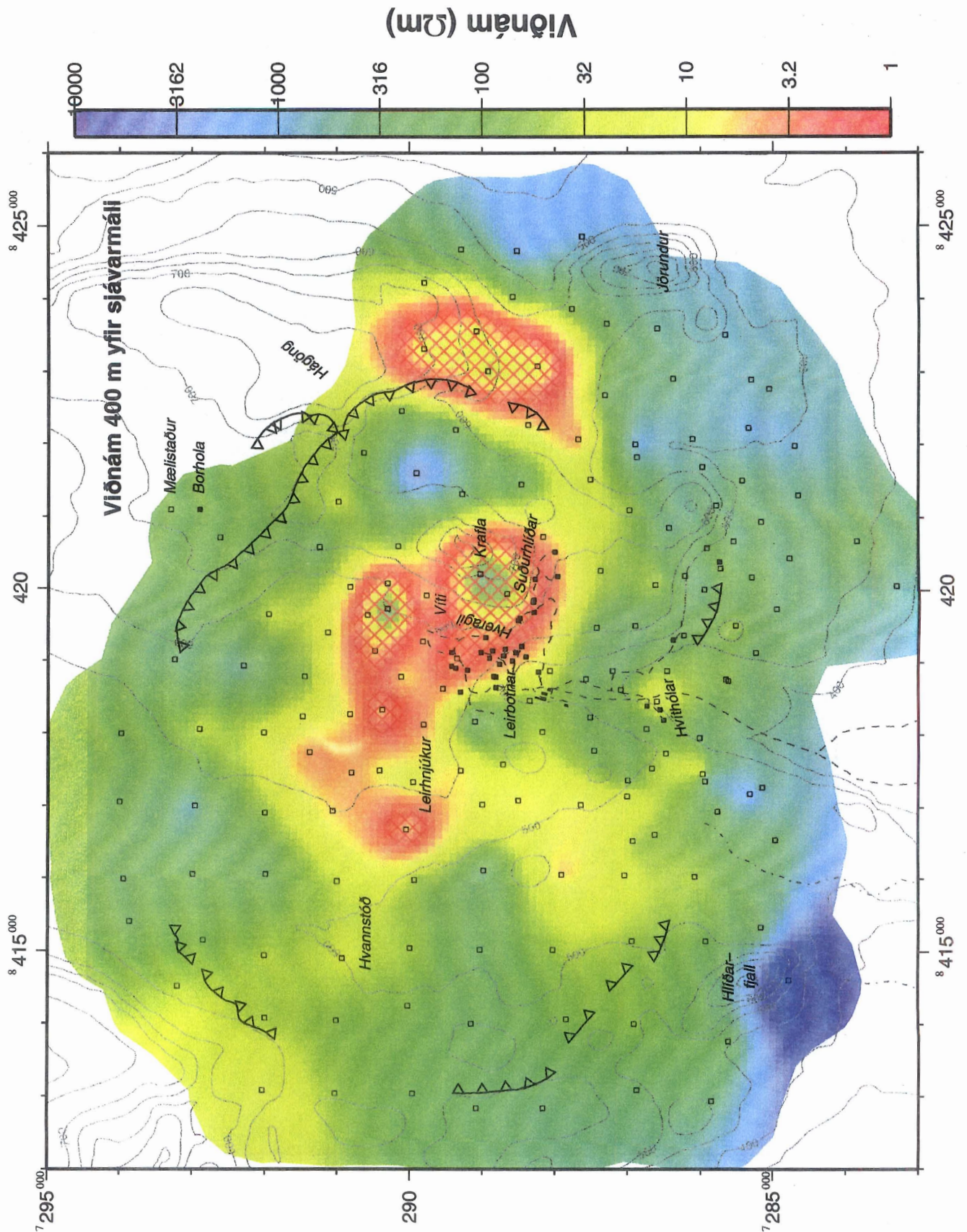
300 m neðan sjávarmáls (mynd 34) er helsta breytingin sú að hátt viðnám neðan lágviðnáms teygir sig lengra til vesturs frá Sandabotnum og undir austurhluta Sandabotnafjalls. Einnig er hér komið samfellt hátt viðnám neðan lágviðnáms NA Jörundar. Á þessu dýpi slær í augu að ekki kemur fram hátt viðnám neðan lágviðnáms á tungu frá Grænegili og til suðvesturs, undir vestanverðu Sandabotnafjalli. Þessi tunga stenst einkennilega á við vik inn í viðnámsfrávikíð í NA hluta öskjunnar, milli Kröflu og Háganga.

400 m neðan sjávarmáls (mynd 35), eða á um 900 m dýpi, er komið að neðri mörkum þess sem mælingarnar sjá. Þó virðist sem vikið undir vestanverðu Sandabotnafjalli hafi minnkað nokkuð en er samt enn greinilegt. Á vesturjaðri viðnámsfráviksins kemur fram hátt viðnám neðan lágviðnáms í mælingu norður af Sátu og vikið sem þar hefur verið hverfur tímabundið.

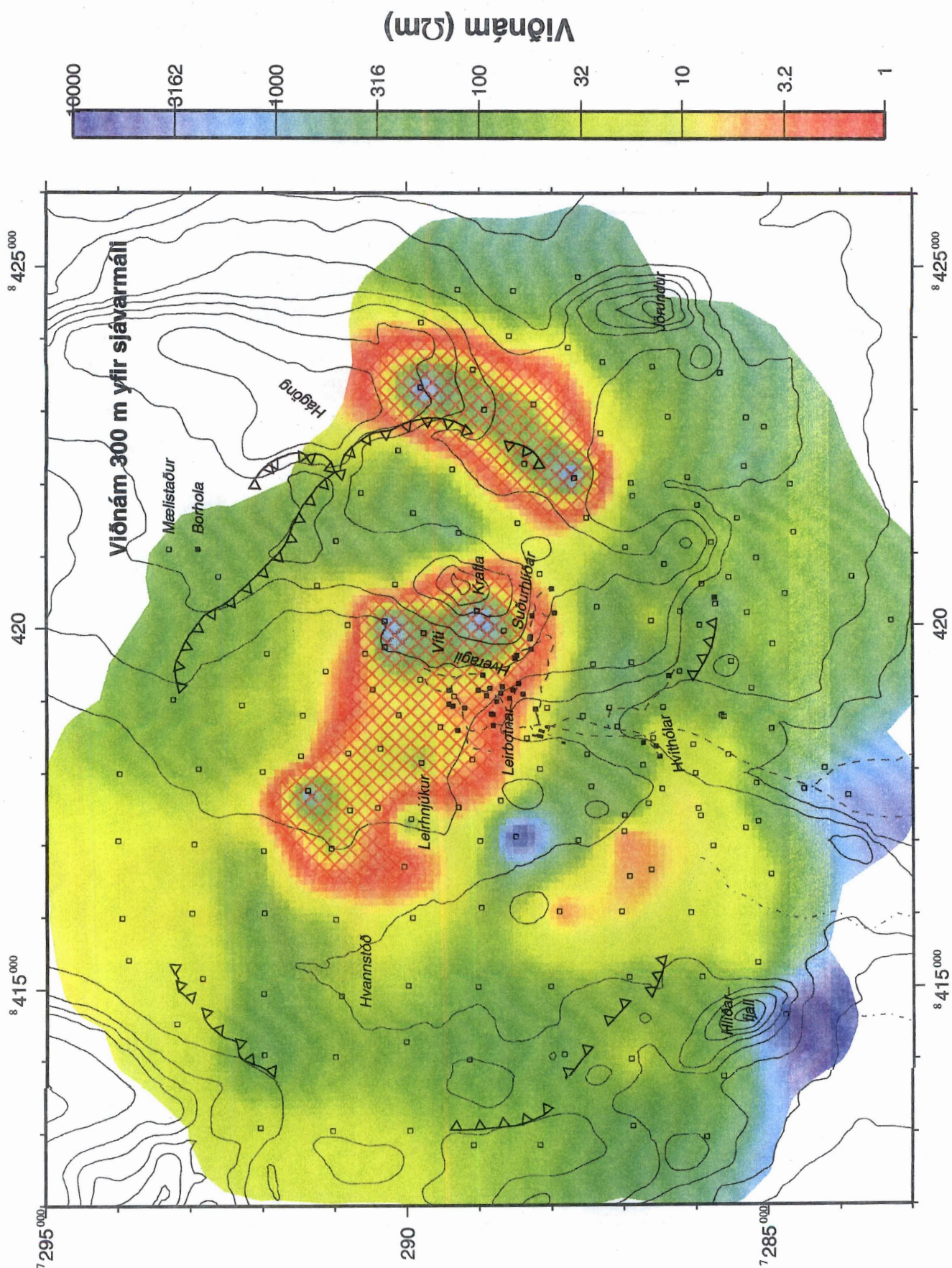
500 m neðan sjávarmáls (mynd 36), hefur hátt viðnám neðan lágviðnáms teygt sig ögn lengra til suðurs undir Halaskógarfjall þannig að enn er áberandi vik í viðnámsfrávikíð úr suðvestri í átt að vestanverðu Sandabotnafjalli. Á vesturjaðrinum hefur hátt viðnám einnig breiðs lítillega til vesturs, þannig að aftur myndast vik til austurs, nokkru sunnan við Hvannstóð.



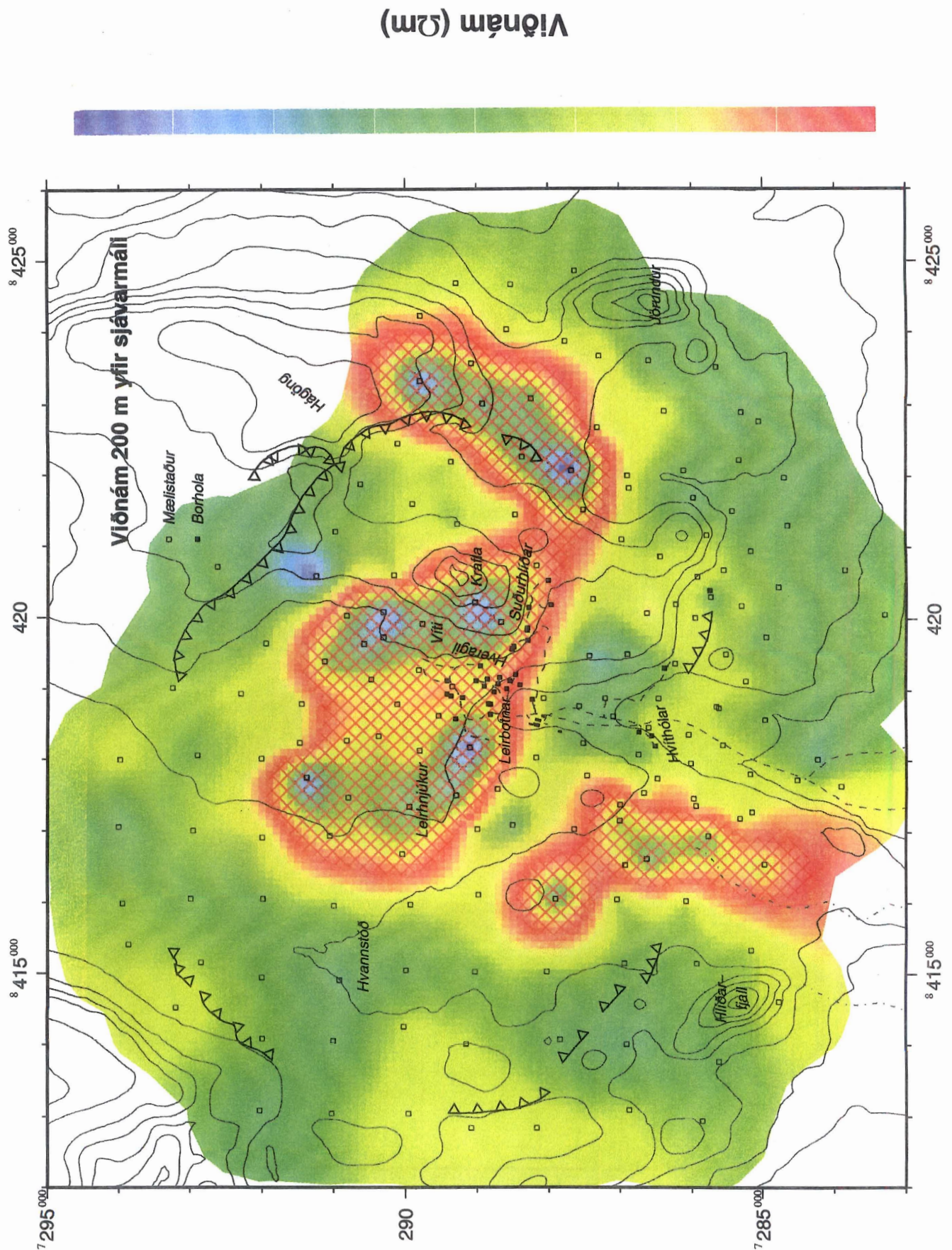
Mynd 26. Eðlisviðnám 500 m ofan sjávarmáls.



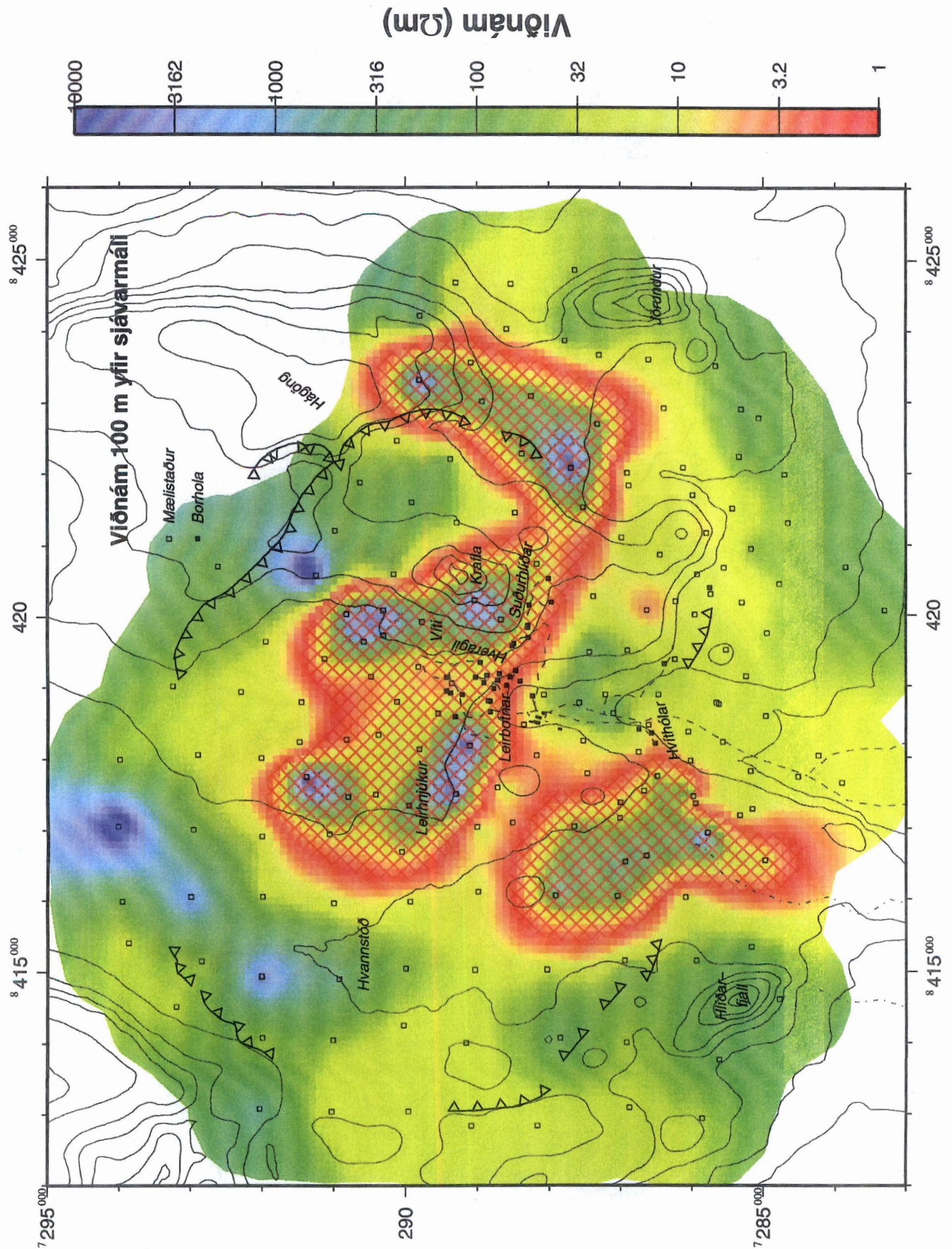
Mynd 27. Eðlisviðnám 400 m ofan sjávarmáls.



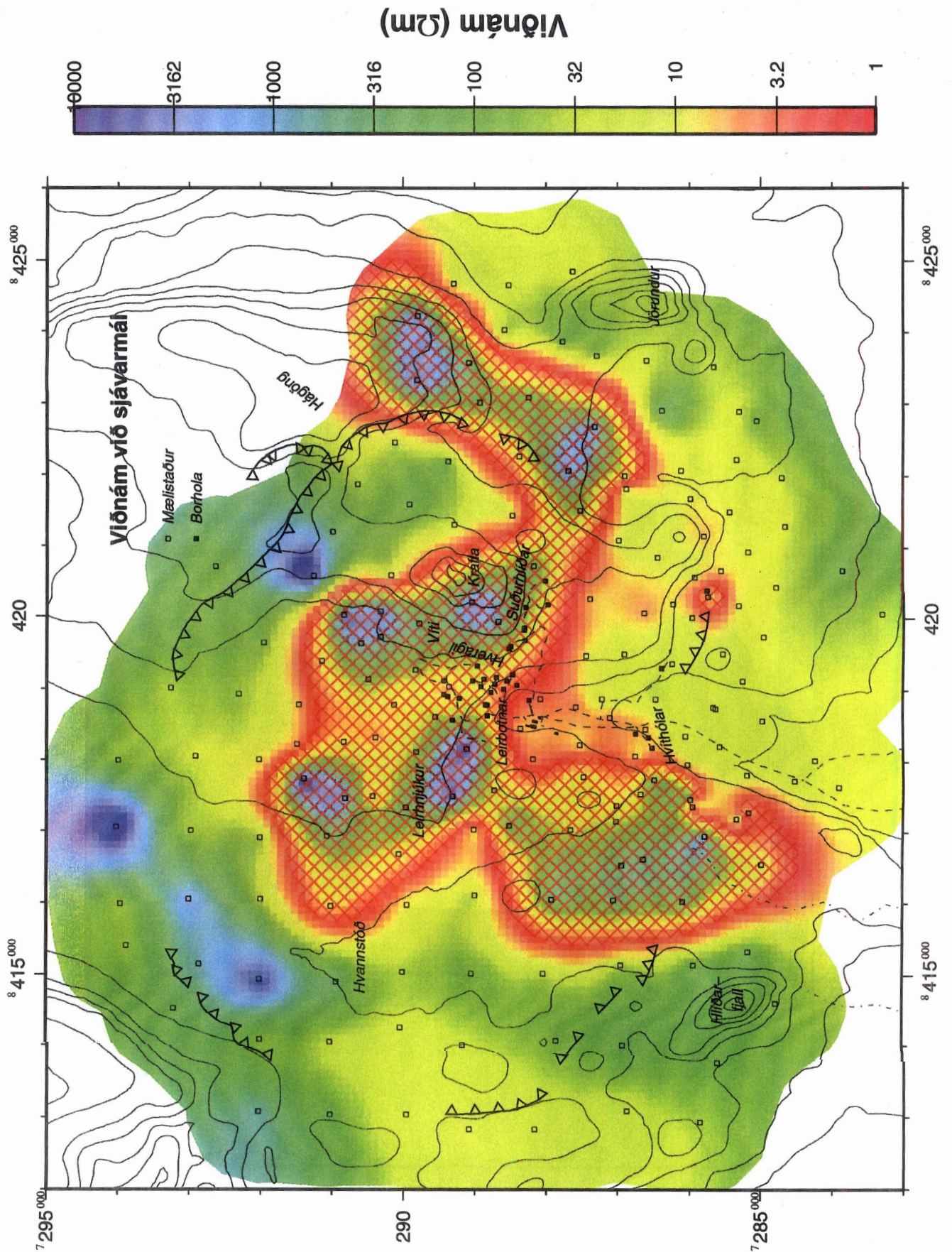
Mynd 28. Eðlisviðnám 300 m ofan sjávarmáls.



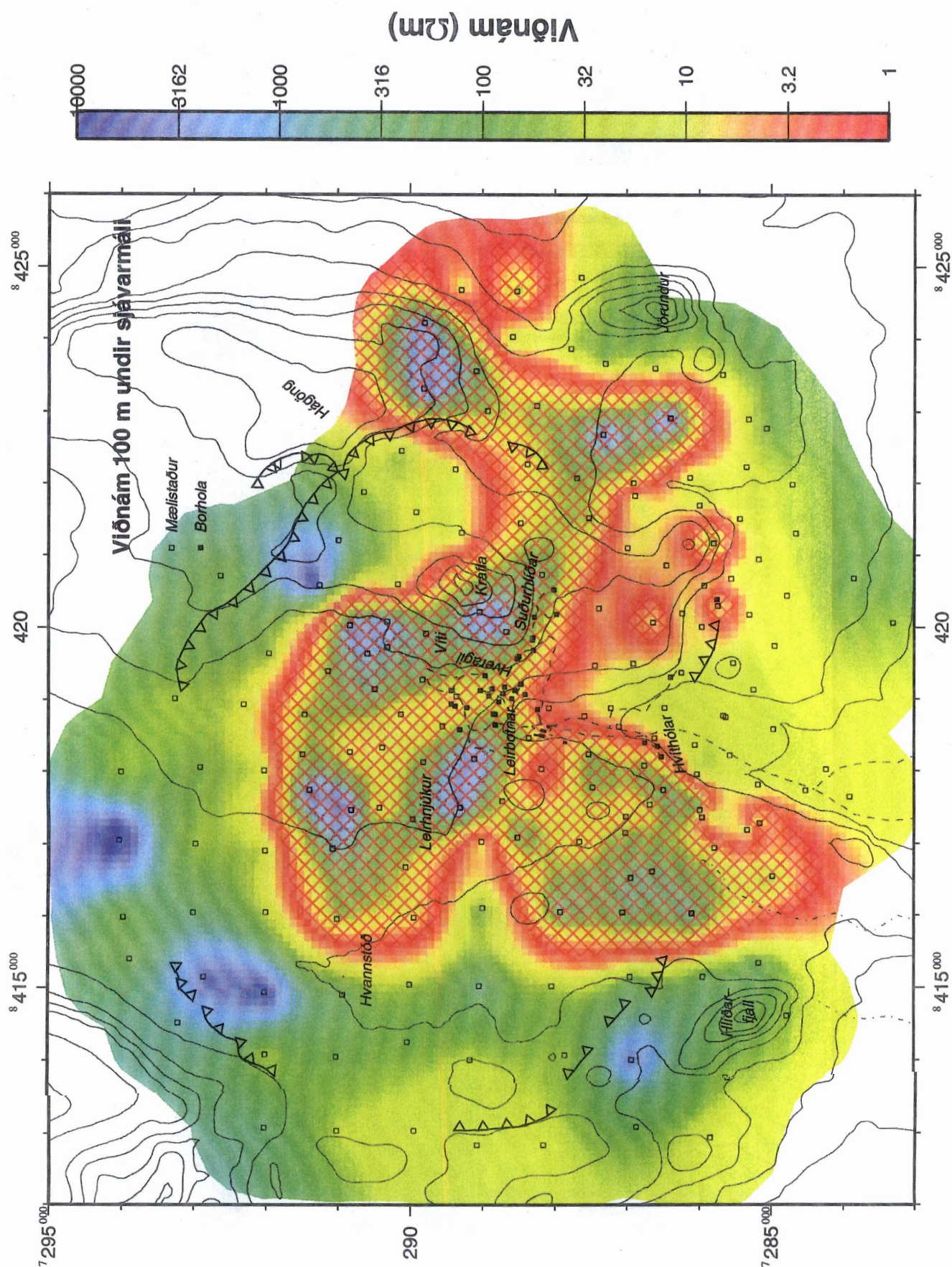
Mynd 29. Eðlisviðnám 200 m ofan sjávarmáls.



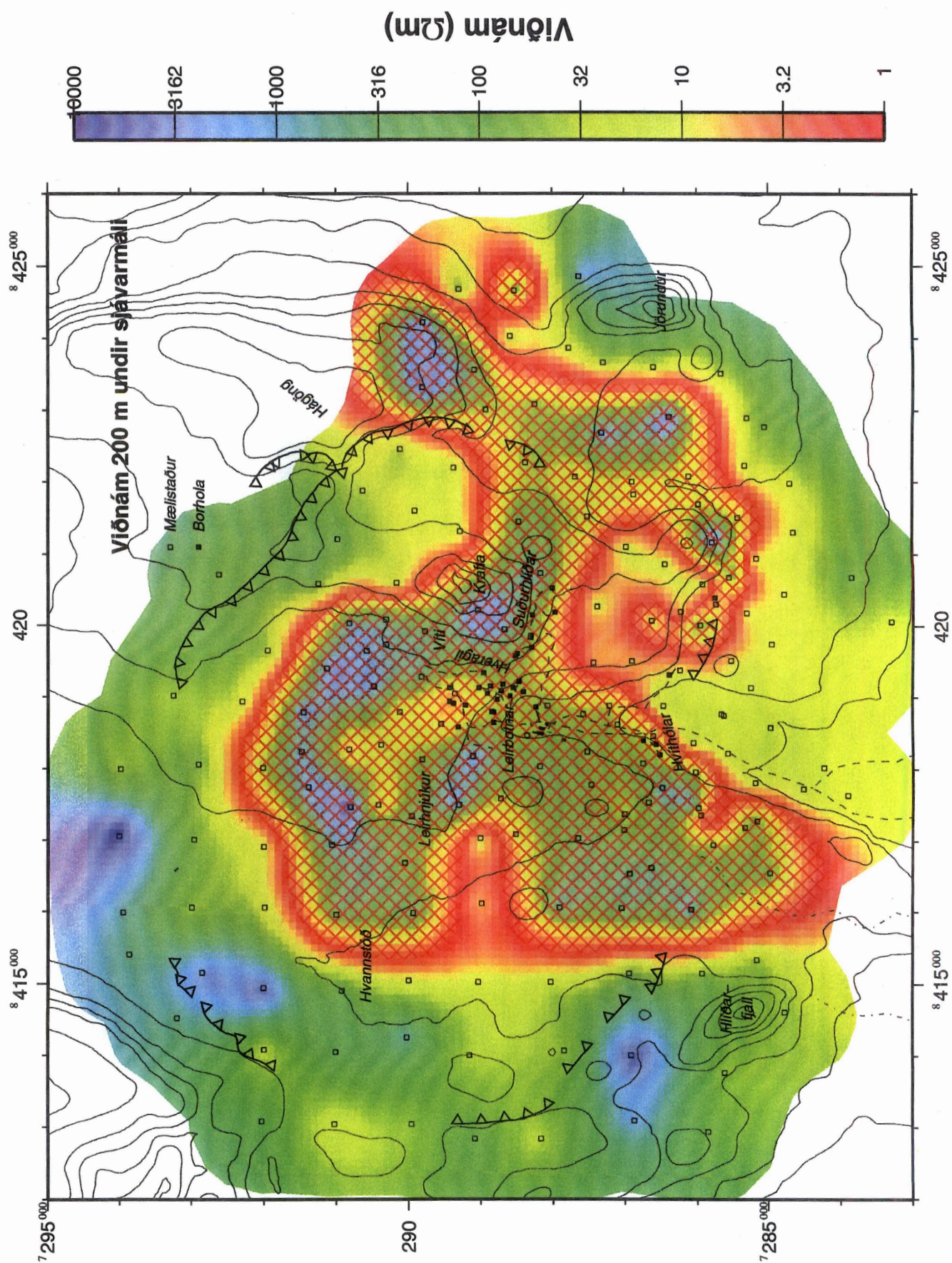
Mynd 30. Eðlisviðnám 100 m ofan sjávarmáls.



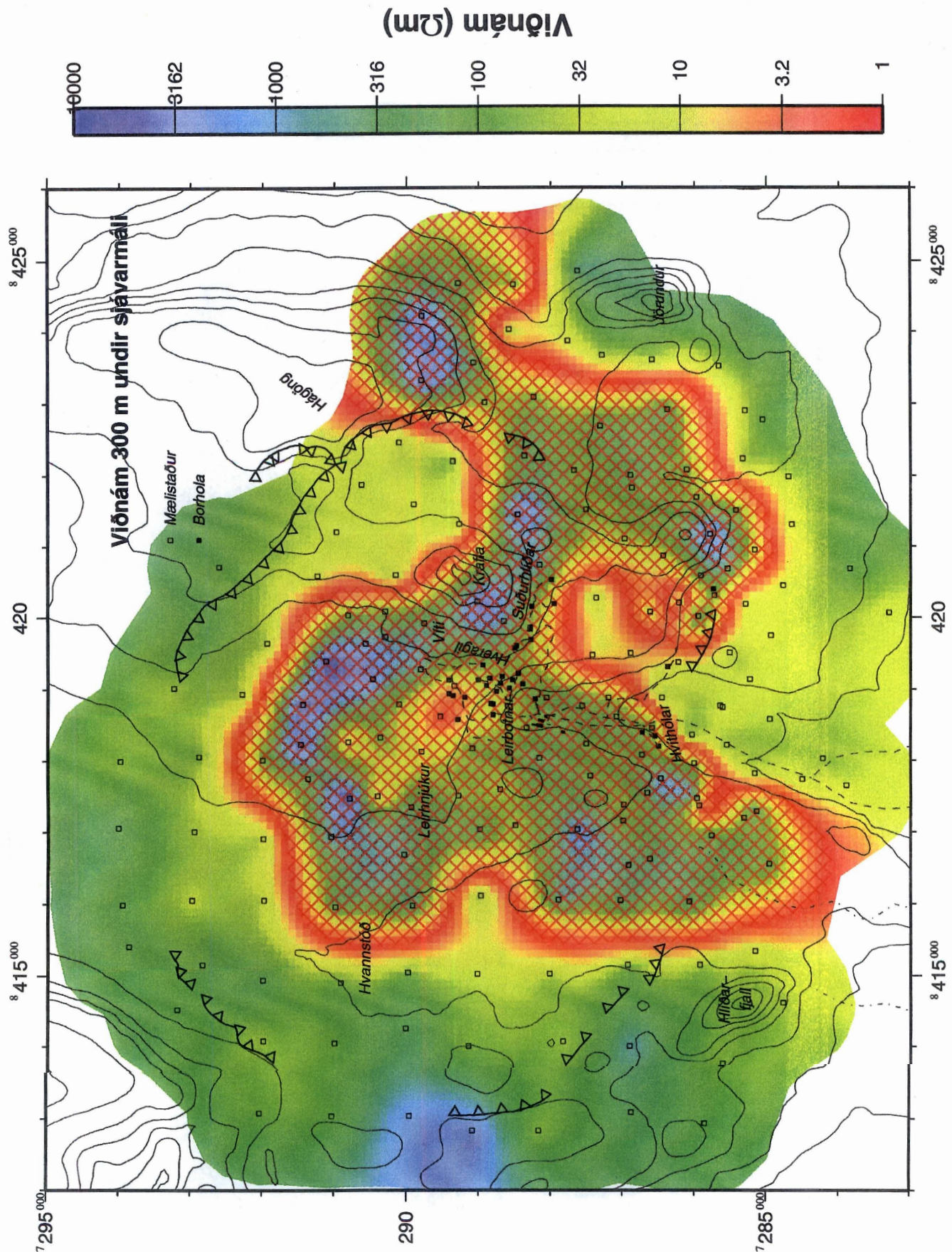
Mynd 31. Eðlisviðnám við sjávarmál.



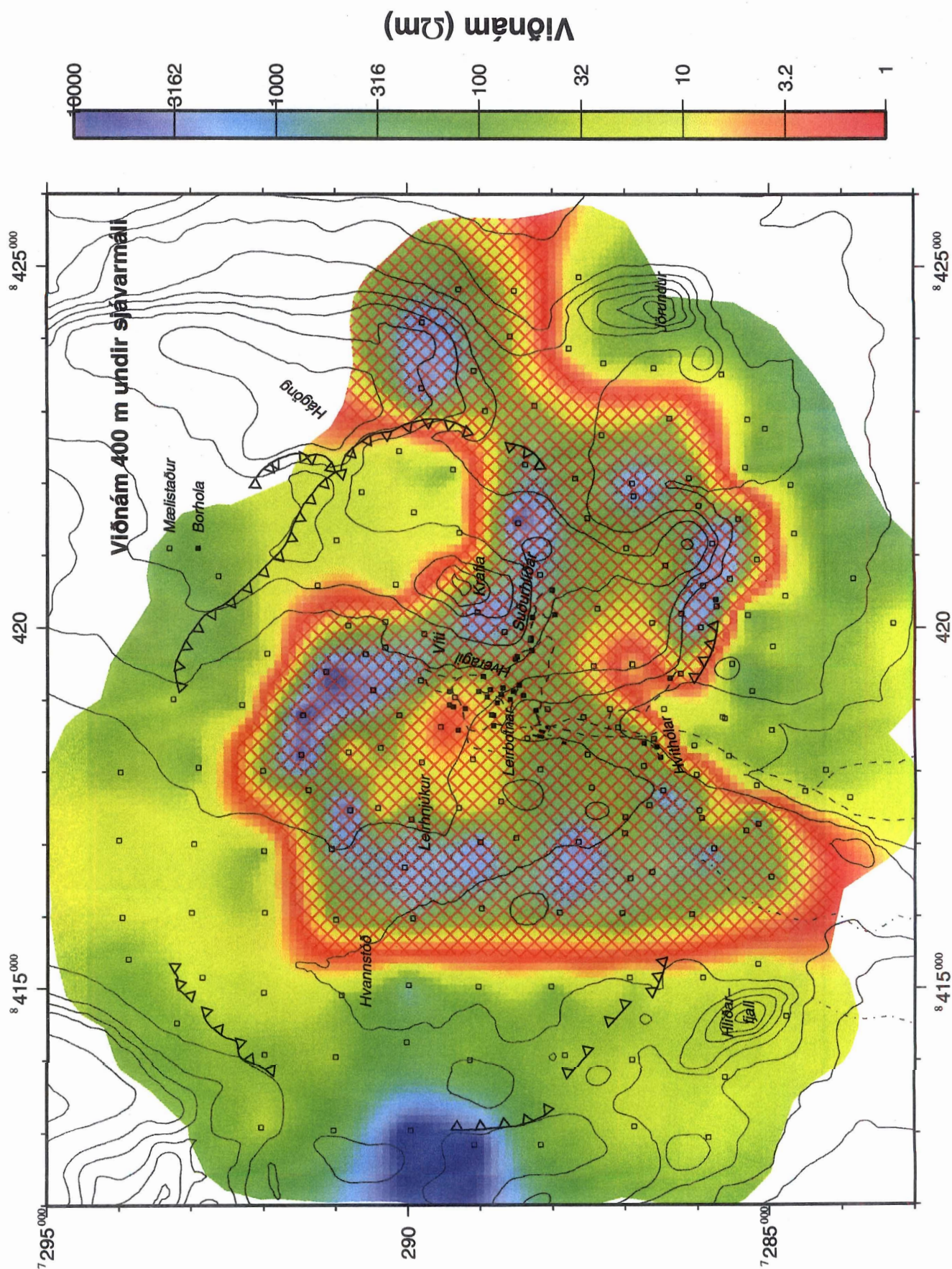
Mynd 32. Eðlisviðnám 100 m neðan sjávarmáls.



Mynd 33. Eðlisviðnám 200 m neðan sjávarmáls.



Mynd 34. Eðlisviðnám 300 m neðan sjávarmáls.



Mynd 35. Eðlisviðnám 400 m neðan sjávarmáls.

6. UMRÆÐA UM VIÐNÁMSSKIPANINA

Hér verður farið nokkrum orðum um þá viðnámsskipan sem fram kemur á Kröflusvæðinu og reynt að gera sér nokkra grein hvernig túlka meggi hana með tilliti til jarðhitavirkni. Það ber þó að taka fram strax að erfitt er að draga mjög afgerandi ályktanir út frá viðnámsmælingum einum saman. Nauðsynlegt er að túlka niðurstöður þeirra í ljósi annarra gagna, eftir því sem kostur er. Þó að viðnámmælingarnar gefi nokkuð ábyggilega heildarmynd af viðnámsskipaninni í efsta kílómetra jarðskorpunnar, hafa þær takmarkaða upplausn, einkum þegar dýpra kemur. Einnig ber að hafa í huga að hér er byggt á einvíðri túlkun og til staðar geta verið þrívíð áhrif sem leiða til þess að túlkunin gefi ekki alltaf rétta mynd af viðnámsdreifingunni.

6.1 Samband viðnáms, ummyndunar og hitastigs

Í smantektarskýrslu frá 1996 um viðnámsmælingar í austurhluta Kröfluöskjunnar (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996) var gerður samanburður á beltaskiptingu ummyndunar í borholum og viðnámsdreifingu samkvæmt viðnámsmælingum. Sá samanburður leiddi í ljós að lágviðnámslagið fellur vel saman við smektít-zeolíta beltið og að viðnámið hækkar aftur verulega í blandlagssteindabeltinu þar fyrir neðan. Það er því ljóst að hið hefðbundna samhengi milli eðlisviðnámsdreifingar og beltaskiptingar ummyndunar, sem lýst er í kafla 5 hér að framan, á við á Kröflusvæðinu.

Ríkjandi berghiti, samkvæmt hitamælingum í borholum, er hinsvegar víða verulega lægri í efri hluta jarðhitageymisins en ummyndun gefur til kynna. Þetta er einkum áberandi í hinu svokallaða efra kerfi, í efstu 1000-1200 m nyrst í Leirbotnum og uppi á stallinum vestan Hveragils, og einnig í holu KJ-18 austast í suðurhlíðum Kröflu. Þetta þarf ekki að koma á óvart því að á þeim 100 þúsund árum sem liðin eru frá því að askjan myndaðist og meðan hún fylltist síðan aftur af gosefnum, hefur jarðhitavirknin vafalaust farið í gegnum mörg skeið hitunar og kólnunar. Einnig hafa myndast innskot og gangar sem breyta rennislisleiðum jarðhitavökvans.

Í hinu svokallaða efra-kerfi, undir Leirbotnum og Vítismó, vex hitastig skarpt upp í um 190-210 °C á um 200-300 m dýpi en helst síðan nánast óbreytt, eða vex einungis lítillega, niður á um 1000-1200 m dýpi. Þar fyrir neðan vex hitinn mjög skarpt á stuttu bili upp í um 300 °C og er nokkurn veginn á suðumarkarksferli í neðra-kerfinu. Ríkjandi ummyndun á 300-1200 m dýpi í efra-kerfinu hefur orðið við mun hærra hitasig en nú er til staðar. Þetta verður illa skýrt á annan hátt en þann að á einhverjum tíma hafi troðist inn víðáttumikil, nærri lárétt og þétt innskot, sem verka sem þakberg á uppstreymi í neðrakerfinu. Hinn lági hitastigull í efra kerfinu bendir eindregið til þess að þar sé nú til staðar öflug hræring í góðri lóðréttri lekt, knúin af varmaleiðni í gegnum þakberg neðra-kerfisins.

Kæling, miðað við ríkjandi ummyndun, í nágrenni holu KJ-18 er mun umfangsmeiri en í efra-kerfinu undir Leirbotnum og Vítismó. Áætlaður berghiti í holu KJ-18 sýnir verulega kælingu niður á rúmlega 2000 m dýpi og ríkjandi hitastig nær ekki 150 °C fyrr en á rúm-

lega 1000 m dýpi. Hitamælingarnar sýna merki um lárétt rennsli jarðhitavökva í nágrenni holunnar. Í holum KJ-16 og KJ-17, vestan við KJ-18, er berghiti áætlaður sem næst á suðumarksferli niður á um 1000 m dýpi, en sýnir viðsnúning á bili þar fyrir neðan, sem er órækt vitni um láréttan þátt í streymi jarðhitavökvans á þessum slóðum. Í austur rótum Grænagils, milli hola KJ-16 og KJ-17 annarsvegar og KJ-18 hinsvegar, er gossprunga frá Hólseldum fyrir um 2000 árum (Kristján Sæmundsson, 1991). Líklegt er að við það gos hafi myndast þéttur gangur sem lokaði af aðstreymi jarðhitavökva úr norð-vestri.

Af framansögðu er ljóst að í efra kerfinu undir Leirbotnum og Vítismó er hitastig í jafnvægi við ummyndun í smektít-zeolíta beltinu, en ekki í blandlags-, klórít- og klórít-epídótbeltunum ofan 1200 m dýpis. Viðnámsmælingarnar sýna, í samræmi við þetta, mjög lágt viðnám (1–2 Ω m) í smektít-zeolítabeltinu (sjá mælingar K9306, A2, E3 og A4 á sniðum NS19, NS20 og AV89, myndir 9, 10 og 20) en verulega hærra þegar kemur niður í blandlagssteindabeltið.

Við holu KJ-18 er hitastig hinsvegar ekki í jafnvægi við ummyndun fyrr en á um 2000 m dýpi, langt neðan þess sem viðnámsmælingarnar skynja. Næsta mæling við KJ-18 er A4, um 200 m NA við holuna. Sú mæling sýnir viðnám í lágviðnámskápunni upp á rúmlega 6 Ω m (sjá snið AV89, mynd 20), sem er 3-5 sinnum hærra en vestar í suðurhlíðum Kröflu og undir Vítismó. Á þessum slóðum er veruleg mjódd og hik í tengingunni milli viðnámsfrávikanna frá Kröflu og vestur fyrir Leirhnúk annars vegar og undir Sandabotnum og Hágöngum hins vegar og ört dýpkar á lágt viðnám til suðurs, norðurs og austurs. Vegna þrívíðra áhrifa gæti raunverlegt viðnám því verið eitthvað lægra en 6 Ω m, en að öllum líkindum verulega hærra en í lágviðnámskápunni í norð-vestri.

Ekki eru til beinar mælingar á hvernig eðlisviðnám breytist með hitastigi í hinum mismunandi ummyndunarbeltum í háhitakerfum hér á landi. Þó hafa verið settar fram ónákvæmar reynslujöfnur, að mestu byggðar á erlendum mælingum (Axel Björnsson o.fl., 1985; Drury og Hindman, 1979). Samkvæmt slíkum jöfnum má gera ráð fyrir að eðlisviðnámið rúmlega tvöfaldist við það að hitastig lækkar úr 200 í 100 °C. Hærra viðnám við holu KJ-18 en vestar er því í góðu samræmi við lægra hitastig. Það ber þó að hafa í huga að vangaveltur um breytilegt hitastig út frá samanburði á eðlisviðnámi eru alltaf óvissum háðar því að ekki er hægt að greina í sundur breytingar vegna mismunandi ummyndunarstigs (hversu mikið af bergmassanum hefur ummyndast) og mismunandi hitastigs.

Það sem hér hefur verið rakið má draga saman þannig að áætlaður berghiti í núverandi borsvæðum Kröfluvirkjunar sýnir að ekki má almennt gera ráð fyrir að ummyndun endurspegli núverandi hitastig. Þar sem viðnámmælingarnar endurspeгла í megindráttum gerð og dreifingu ummyndunar verður því almennt að gera ráð fyrir að þær sýni útbreiðslu jarðhitavirkni eins og hún hefur mest verið. Ákveðnar vísbendingar má þó sjá um að viðnámsgildi innan lágviðnámskápunnar geti endurspeglað hitastig að einhverju leyti. Telja verður líklegt að þar sem fram kemur mjög lágt viðnám, innan við 5 Ω m, sé hitastig trúlega upp undir 200 °C, en að viðnám á bilinu 5–10 Ω m endurspegli nokkuð lægri hita. Þetta er þó háð því að ummyndunarstig bergsins sé sambærilegt.

6.2 Útbreiðsla jarhitavirkinnar

Sameiginlegur grundvallarþáttur háhitakerfa hérlandis er að eldvirkni leggur til varmagjafa (kvikuhólf, innskot og ganga) á nokkurra kílómetra dýpi, sem valda hræringu grunnvatns. Grunnvatn næst varmagjöfunum hitnar og stígur upp og um leið streymir kaldara grunnvatn að varmagjöfunum frá hliðunum. Þannig myndast hræringarhringrás (e. convection cell) með uppstreymi yfir varmagjöfunum. Í raunveruleikanum er rennslismynstrið reyndar oft mun flóknara því að það stýrist verulega af lekt. Einnig mynda innskot, gangar og sprungur oft rennslishindranir og/eða stefnuháða lekt og á það ekki síst við um jarðhitakerfið í Kröflu.

Vegna hræringarinnar má, að öllum jafnaði, gera ráð fyrir að jarðhitavirknin sé öflugust og rísi hæst í uppstreyminu yfir varmagjöfunum. Viðnámsfrávik grunnt í jörðu gefa því oft vísbendingar um uppstreymissvæði. Á viðnámskortunum í 300 og 200 m hæð yfir sjó (myndir 28 og 29) sjást þrjú, að mestu aðskilin, viðnámsfrávik þar sem fram kemur lágt viðnám og með hærra undir. Það stærsta er frá suður- og vesturhlíðum Kröflu, Víti og þaðan undir Vítismó og Leirbotnum, vestur fyrir Leirhnúk. Austan við austurbrún öskjunna kemur einnig fram grunnstætt viðnámsfrávik undir sunnanverðum Hágöngum. Þetta frávik er, vegna skorts á mælingum, ekki afmarkað til norð-austurs. Þriðja afgerandi viðnámsfrávik er í Leirhnúkshrauni, frá Sátu og vestnverðum Þríhyrningum og suður undir Dalfjalli, eins langt og mælingar ná.

Mest öll jarðhitavirkni á yfirborði á Kröflusvæðinu fellur innan fráviksins frá Kröflu og vestur fyrir Leirhnúk. Suður af Sátu í Leirhnúkshrauni gufar víða upp úr hrauninu. Þarna eru ung hraun á yfirborði og trúlega nokkuð djúpt á grunnvatnsborð. Því má gera ráð fyrir að á þessum slóðum kæmi fram nokkuð umfangsmikil yfirborðsvirkni, væri ungu yfirborðshraununum flett ofan af. Engin merki um jarðhitavirkni sjást hinsvegar á yfirborði yfir viðnámsfrávikinu undir Hágöngum og því kom verulega á óvart að þar skyldi koma fram jafn afgerandi frávik. Þetta var ekki ljóst fyrr en undir lok mæliúthalds og því gafst ekki tími til að afmarka það til norð-austurs. Viðnámsfrávik er undir Hágöngum hefur öll einkenni háhitavirkni og viðnám í lágviðnámskápunni er þar víða svo lágt að telja verður allar líkur á að þar sé nú hár hiti. Að þessu verður nánar viki síðar.

Vitað er að undir viðnámsfrávikinu frá Kröflu og vestur fyrir Leirhnúk er uppstreymissvæði jarðhita. Meginuppstreymin eru talin vera undir Hveragili og norður fyrir Víti annarsvegar og undir Leirhnúk hinsvegar. Þetta er í góðu samræmi við viðnámsmælingarnar því á þessum slóðum er viðnámsfrávik er, grunnt í jörðu, hvað mest afgerandi og rís einna hæst. Eflaust er einnig eitthvert uppstreymi undir Vítismó, en þar er streymi djúpvökva til yfirborðs nú hindrað af innskotunum sem skilja að efra og neðra kerfið. Þar til annað kemur í ljós, verður að gera ráð fyrir því sem líklegasta möguleikanum að undir Leirhnúkshrauni og Hágöngum séu sjálfstæð uppstreymissvæði með eigin varmagjöfum.

Neðan sjávarmáls er farið að sjá í viðnámsfrávik undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og austanverðu Sandabotnaskarði. Reyndar hafði komið fram staðbundið lágt viðnám nærri yfirborði við Leirhól (mæling K9320, snið AV86, mynd 17), en hækkaði aftur á bili þar fyrir neðan. 100 m neðan sjávarmáls kemur þarna fram slitrótt, en sjálfstætt frávik, en

tengist þar fyrir neðan suður-framhaldi fráviksins undir Hágöngum og Sandabotnum. Við Leirhól er gömul og kulnuð ummyndunarskella. Árið 1991 var boruð þar rúmlega 200 m djúp rannsóknarhola og mældist hiti í botni hennar um 175 °C. Þetta sýnir að á þessum slóðum er virkur jarðhiti, þó að þess sjáist lítil merki á yfirborði. Viðnámsfrávikkið undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og Sandabotnaskarði er ekki jafn afgerandi aðskilið frá öðrum viðnámsfrávikum og þau sem rætt var um hér að framan og er á meira dýpi. Það er því óvissara hvort hægt er að tala, í einhverjum skilningi, um sérstakt uppstreymissvæði með eigin varmagjafa á þessum slóðum, og eins er ekki vitað hvers vegna jarhitakerfið nær ekki eins nærri yfirborði og á hinum svæðunum.

Þegar kemur niður fyrir sjávarmál fara ofangreind viðnámsfrávik að tengjast eins og við er að búast, því eftir því sem dýpra kemur stækka jarðhitakerfin um sig og eins minnkar upplausn viðnámsmælinganna með dýpi. Á öllum þeim fjórum svæðum sem hér hafa verið talin hafa að nokkur leyti aðskilin viðnámsfrávik kemur fram við nám lægra en 5 Ωm, sem bendir til þess að þar sé vel þroskað smektít-zeolíta belti og hitastig í jafnvægi við ummyndun. Milli svæðanna er annaðhvort, eða hvort tveggja, dýpra á lágviðnámskápuna eða hún með hærri viðnámi (5–10 Ωm; sjá t.d. snið NS17, NS21, NS22, AV88 og AV89; myndir 7, 11, 12, 19 og 20).

Þegar kemur niður á um 400 m undir sjávarmáli kemur fram stórt og samfellt viðnámsfrávik, með þungamiðju um miðja öskjuna. Það teygir sig til suðurs, suður undir Dalfjall, eins langt og mælingar ná, til SA um suðurhlíðar Kröflu og Leirbotna og út fyrir öskjubrúnina í Sandabotnaskarði og Sandabotnum og eins til NA undir Hágöng, eins langt og mælingar ná. Heildarflatarmál fráviksins (þar sem fram kemur lágt við nám með hærri viðnámi undir) er á þessu dýpi um 48 km². Um og neðan við 300 m neðan sjávarmáls eru áberandi tvö vik inn í viðnámsfrávikkið þar sem ekki sjást merki um jarðhitavirkni í efsta kílómetra skorpunnar. Annars vegar er vik í NA-hluta öskjunnar, afmarkað af Kröfluhálsi og Kröflu, austur í sunnanverð Hágöng og norður með vesturbrún þeirra. Hinsvegar er vik uppeftir Hlíðardal, vestan Halaskógarfjalls og til NA í SV-horn Sandabotnafjalls.

Nokkuð kemur á óvart hvað viðnámsmælingarnar sýna lítil ummerki um jarðhitavirkni í vesturhluta öskjunnar. Fyrirfram var búist við að viðnámsmælingarnar mundu sýna þar veruleg merki jarðhita. Þar er reyndar ekki að sjá virkan jarðhita á yfirborði núna, en ummerki um eldri jarðhitavirkni eru nokkur. Nokkur ummyndun sést SV af Hvannstöði og vestur af Bjarghól. Þar fyrir austan eru ung hraun frá Mývatnseldum á yfirborði, sem ef-laust hylja ummyndun í eldra bergi. Nokkuð er um sprengigíga og er Hvannstöð þeirra tilkomumest. Kristján Sæmundsson (1991) hefur ákvarðað aldur þeirra um 5000 ár og telur að gosið hafi einkum orsakast af gufusprengingu í jarðhitakerfi undir gígnum. Nokkrir minni sprengigígar eru SV af Hvannstöði og lengra til suðurs eru mun eldri sprengigígar (frá síðjökultíma) sem mynda Krókóttuvötn. Við Krókóttuvötn sjást merki um mikla hveravirkni. Út frá jarðfræðilegum aðstæðum hefur því almennt verið talið að líklegt væri að finna jarðhita kringum og suðvestur af Hvannstöði, því saman fer ummyndun á yfirborði og gosvirkni innan öskjunnar.

Viðnámsmælingarnar sýna ekki afgerandi merki um jarðhitavirkni í efsta kílómetra skorpunnar (ofan 500 m neðan sjávarmáls) vestan línu um Hvannstöð og austurrætur

Hlíðarfjalls. Í einni mælingu (mæling 140910, sjá snið AV91, mynd 22), sem er um 1 km VNV af Hvannstóði, kemur fram mjög staðbundið viðnám lægra en 10 Ω m á 200 m dýpi. Annars er viðnám víðast verulega hærra en 10 Ω m á þessum slóðum, eins djúpt og mælingarnar sjá (sjá snið NS13, NS14 og NS15, myndir 3, 4 og 5). Ofan sjávarmáls eru vesturmörk viðnámsfráviksins við Leirhnúk rúmlega 1 km austan Hvannstóðs, en um og neðan við sjávarmáls fer það að teygja sig vestur undir Hvannstóð.

Viðnámsskipanin vestast í öskjunni ber þó nokkur einkenni dæmigerðrar viðnámskipanar í háhitakerfum (snið NS13, NS14 og NS15, myndir 3, 4 og 5). Fram kemur lag með frekar lágu viðnámi sem hvelfist upp og hærra viðnám fyrir neðan. Þetta líkist nokkuð hefðbundinni lágviðnámskápu og háviðnámskjarna, en viðnámið í "kápunni" er verulega hærra, víðast á bilinu 15–30 Ω m. Ef þarna hefur verið þroskað háhitakerfi, eins og almennt er talið, þá hefur það runnið sitt skeið á enda og kulnað.

Ekki eru margir staðir á landinu þar sem viðnámsmælingar hafa verið gerðar á gömlum háhitasvæðum sem kólnað hafa niður, en eru ekki rofin niður í rætur. Eina dæmið, þar sem með vissu er að finna öll ummyndunarbelti gamals háhitakerfis, er á vinnslusvæði Orkuveitu Reykjavíkur í Mosfellsbæ, sem nú er lághitasvæði með hitastig um og innan við 100 °C. Þar sýna eldri viðnámsmælingar (Schlumbergermælingar) eðlisviðnám á bilinu 8-10 Ω m í smektít-zeolíta beltinu við hitastig á bilinu 80-90 °C og verulega hærra í klórít beltinu fyrir neðan (Lúðvík S. Georgsson, 1985; Jens Tómasson, 1995). Sé þetta borið saman við viðnámsgildin í vestasta hluta Kröfluöskjunnar, verður að draga þá ályktun að núverandi hitastig í smektít-zeolítabeltinu þar sé verulega lægra en í Mosfellsdal, trúlega um eða innan við 50 °C. Samkvæmt reynslujöfnum um samband eðlisviðnáms og hitastigs, sem áður hafa verið nefndar (Axel Björnsson o.fl., 1985, Drury og Hindman, 1979), má gera ráð fyrir að eðlisviðnámið hækki fjór- til fimmfallt við það að hitastig lækkar úr 200 °C og niður í 50 °C. Núverandi "lágviðnámslag" undir svæðinu kringum Hvannstóð gætu því svarað til smektít-zeolíta beltis sem mundi hafa um 5 Ω m eðlisviðnám við 200 °C.

Hér ber að hafa í huga að erfitt er að bera saman í smátriðum viðnámsgildi milli mismunandi svæða og sem fengin eru með mismunandi viðnámsmæliaðferðum. Vitað er að Schlumbergermælingar geta, við sömu aðstæður, gefið nokkuð önnur viðnámsgildi en TEM-mælingar. Eins er eðlisviðnámið háð ummyndunarstigi bergsins (hversu mikið af frumsteindum bergsins hafa ummyndast). Gamla háhitakerfið í Mosfellsbæ er nokkuð rofið og sá hluti þess sem enn er til staðar er leifar af langlífu og mikið ummynduðu háhitakerfi. Háhitavirknin við Hvannstóð hefur trúlega verið mun skammlífari og ummyndunarstigið því lægra.

Með því að skoða hvernig útbreiðsla viðnámsfrávikanna breytist með dýpi má gera sér nokkra grein fyrir jarðfræðilegum aðstæðum sem áhrif hafa á streymi jarðhitavökvans. Aukist útbreiðsla jafnt og þétt með dýpi er ástæða til að ætla að lárétt lekt sé nokkuð góð og jarðhitavökvinn geti breitt úr sér út frá uppstreymissvæðunum. Ef hinsvegar koma fram skörp mörk, sem breytast lítið með dýpi, bendir það til þess að til staðar séu torgegndræpir veggir sem hindra lárétt rennsli.

Almennt séð eykst útbreiðsla viðnámsfrávika á Kröflusvæðinu með dýpi. Þó má greina ákveðin mörk, eða drætti, sem haldast lítið breytt á nokkur hundruð metra dýptarbili. Þar ber fyrst að nefna norðaustur mörk viðnámsfrávíksins frá Kröflufjalli, norður um Kröfluháls og þaðan til NV um 1,5 km sunnan við öskjujaðarinn við Hreindýrahól. Þessi mörk eru vel staðfest af mælingunum og haldast nánast óbreytt frá því við 200-300 m yfir sjávarmáli og eins djúpt og mælingarnar skynja (500 m neðan sjávarmáls). Þetta hlýtur að þýða að þarna séu torgegndræpir veggir sem hindra lárétt rennsli jarðhitavökvna til norðausturs og/eða aðrennsli kalds grunnvatns úr ganstæðri átt. Þessi útmörk falla nokkuð saman við um 10000 ára gamlar gossprungur á Kröfluhálsi og gossprungur sunnan við Hreindýrahól frá Hólseldum fyrir um 2000 árum (Kristján Sæmundsson, 1991). Við þessi gos hafa trúlega myndast þéttir gangar sem stemma rennsli jarðhitavökvans af. Í Hólseldum gaus einnig á sprungu í rótum Grænagils og er talið að þá hafi myndast gangur sem draga verulega úr rennsli í átt til holu KJ-18, eins og áður er rakið.

Vesturmörk viðnámsfrávíksins undir Hágöngum, sem eru um öskjujaðarinn vestan í Hágöngum, breytast einnig lítið með dýpi. Þarna hljóta einnig að vera rennslistemmar við öskjujaðarinn, sem hugsanlega tengjast gosvirkni á þessum slóðum samtímis gosinu í Kröfluhálsi fyrir 10000 árum (Kristján Sæmundsson, 1991).

Þriðju áberandi mörkin, sem lítið breytast með dýpi á ákveðnu dýptarbili, eru suðvestur mörk viðnámsfrávíksins undir Kröflu, Vítismó og Leirhnúk og tengingarinnar yfir að austurjaðri öskjunnar. Þessi mörk eru þegar komin fram 400 m yfir sjávarmáli og breytast nánast ekki fyrr en um og undir sjávarmáli. Þau eru, eins og hin fyrri, talin tilkomin vegna þess að gangar hefti lárétta útbreiðslu jarðhitavökvna. Við fyrstu sýn kemur það nokkuð á óvart að jarðhitavökvi skuli ekki eiga greiða leið í meiginbrotasefnuna, sem er N-10°-A, og að til staðar skuli vera stemmar sem eru verulega þverlægir á hana. Í suðurhlíðum Kröflu má sjá misgengi með VNV-ASA-læga stefnu, samsíða suðurmörkum frávíksins. Merki um sömu brotastefnu sjást einnig í Leirhnúk og í ásnum vestan við skemmur Kröfluvirkjunar.

Þyngdarkort of Kröflusvæðinu (Ragna Karlsdóttir o.fl., 1978; Gunnar V. Johnsen, 1995) sýnir þyngdarlægð (létt efni) í sunnanverðri öskjunni, sem endurspeglar öskjufyllinguna, sem er að miklu leyti móberg. Þyngdarsvið eykst hinsvegar snögglega til norðurs um VNV-ASA læga línu sem fellur saman við suðurmörk viðnámsfrávíksins. Mikill munur er á dýpi á innskotaberg í holum í Leirbotnum og uppi á stallinum annarsvegar og í holu KJ-6, í dalnum austan stöðvarhússins hinsvegar. Innskotin koma fram um 600 m neðar í KJ-6 en í holunum fyrir norðan (Halldór Ármannsson o.fl., 1987). Holurnar í og norðan Leirbotna eru um eða norðan við suðurmörk viðnámsfrávíksins, en hola KJ-6 er sunnan þeirra. Öll rök hníga því að því að mikið sé um innskot og ganga undir þyngdarhæðinni og viðnámsfrávikinu milli Kröflu og Leirhnúks. Hin skörpu suðurmörk sýna að þar hafa skotist inn gangar í ASA-VNV læg brot, þó að þeirra sjáist ekki mikil merki á yfirborði. Þessir gangar hindra rennsli jarðhitavökvans eftir meginsprungustefnunni. Neðan sjávarmáls fer viðnámsfrávikinn frá Kröflu og vestur fyrir Leirhnúk að tengjast frávikum sunnar. Eins og við var að búast, tengist það fyrst á þeim slóðum þar sem sprungusveimurinn er nú virkastur, þ.e. suður af Leirhnúk.

7. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR OG ALMENN UMRÆÐA

Niðurtöður viðnámsmælinganna benda til þess að á Kröflusvæðinu séu fjögur, að einhverju leyti aðskilin, meginviðnámsfrávik (lágt viðnám með hærra fyrir neðan) tengd jarðhitavirkni. Það stærsta er frá suðurhlíðum Kröflu, norður um vesturhlíðar fjallsins, vel norður fyrir Víti og þaðan til VNV undir Leirbotnum og Vítismó, um Leirhnúk og vestur undir Hvannstöð. Annað frávik er undir Leirhnúkshrauni, suður af Sátu og suðvestur af Þríhyrnigum. Frávikid teygir sig austur undir Hvíthólaklif og til suðurs eftir Dalfjalli, eins langt og mælingar ná. Þriðja frávikid er undir sunnanverðum Hágöngum, austur fyrir norðan Jörund og suður um Sandabotna. Öll þessi þrjú viðnámsfrávik eru grunnstöð. Það fyrsttalda nær til yfirborðs við Kröflu og Leirhnúk, en annars eru efir mörk þeirra víða á 100-300 m dýpi. Undir suðaustanverðu Sandabotnafjalli og Sandabotnaskarði er nokkuð djúpstæðara frávik eða á 300-500 m dýpi. Þegar kemur niður fyrir sjávarmál fara frávikin að tengjast og 400 m neðan sjávarmáls (á 800-900 m dýpi) kemur fram samfellt viðnámsfrávik, um 48 km² að flatarmáli. Í lágviðnámskápu allra frávikanna kemur fram viðnám lægra en 5 Ωm og er getum leitt að því að svo lágt viðnám endurspegli smektíteolítabelti með núverandi hitastig kringum 200 °C.

Líklegt er talið að viðnámsfrávikin endurspegli að einhverju leyti sjálfstæð uppstreymisvæði með eigin varamgjöfum. Í forðafraeðilíkani af jarðhitakerfinu í Kröflu er, út frá gögnum úr borholum og jarðfræðilegum aðstæðum, gert ráð fyrir að í viðnámsfrávikinu frá Kröflu og vestur fyrir Leirhnúk séu meginuppstreymi undir Hveragili og Leirhnúk. Þetta er í samræmi við niðurstöður viðnámsmælinganna, því þar er viðnámsfrávikid grynnt og ákveðnast og á þessum slóðum hefur eldvirki á nútíma verið einna mest. Nokkurt hik er í norðurmörkum viðnámsfrávisins undir norðanverðum Vítismó, sem gæti bent til aðrennslis kaldara grunnvatns inn í efra-kerfið ofan láréttu innskotanna á 1000-1200 m dýpi. Skörp suðurmörk viðnámsfráviksins, samfara skarpri hækkun í þyngdar sviði og auknu magni innskota í djúpbergi frá Hlíðardal og norður í Leirbotna benda til þess að frá Kröflu og til VNV í Leirhnúk sé til staðar mikið magn innskota. Hluti af innskotunum hafa myndað ASA-VNV læga ganga sem hindra rennsli jarðhitavökva til suðurs eftir sprungusveimnum.

Viðnámsfrávikid undir Leirhnúkshrauni, vestur og suðvestur af Þríhyrnigum, er innan þess hluta sprungusveimsins þar sem brota og eldvirkni hefur verið mest seinustu 1000 árin. Því kann að virka nærtækast að ætla að þar sé um að ræða afrennsli eftir sprungusveimnum frá Leirhnúk í norðri. Viðnámsfrávikid er hinsvegar, allar götur niður fyrir sjávarmál, það afgerandi aðskilið frá viðnámsfrávikinu við Leirhnúk að telja verður mun líklegra að um sjálfstætt uppstreymi sé að ræða. Eftir Hólselda, fyrir um 2000 árum, hefur eldvirkni verið bundin við miðrein sprungusveimsins. Í Daleldum, fyrir um 1100 árum, gaus á sprungum vestast í Hlíðardal, norðan Hvíthóla, og einnig sunnar í Dalfjalli og sunnan Námafjalls. Eftir það hefur gosvirknin einskorðast við þann hluta sprungukerfisins sem liggur í gegnum Leirhnúk og hefur gosvirknin á yfirborði einkum verið frá Leirhnúk og til norðurs. Í Mývatnseldum gaus þó lítilllega í Bjarnarflagi og Hrossadal þ.a. kvika hefur einnig hlaupið til suðurs frá kvikuhólfinu undir Leirhnúk, þó að megingosvirknin væri til norðurs. Í Kröflueldum var gosvirknin á yfirborði einnig frá

Leirhnúk og til norðurs. Í september 1977 varð hinsvegar kvikuhlaup til suðurs án þess að kvika kæmi til yfirborðs (utan smá gjall úr borholu í Bjarnarflagi). Samfara þeim atburði sýndu skjálftamælingar mikla skjálftavirkni á tiltölulega þröngu belti undir viðnámsfrávikinu í Leirhnúkshrauni (Páll Einarsson, 1991). Sunnan öskjunnar voru skjálftar á mun breiðara belti í sprungusveimnum suður til Bjarnarflags. Við kvikuhlaup til norðurs sást lítil skjálftavirkni innan öskjunnar, en þegar kom norður fyrir öskjuna var skjálftavirkni á breiðu belti í sprungusveimnum. Þetta bendir til þess lítil fyrirstaða sé innan öskjunnar fyrir kviku að hlaupa til norðurs, en að til suðurs sé fyrirstaða þar sem skjálftavirknin var undir Leirhnúkshrauni og þar safnist fyrir innskot.

Viðnámsfrávikid undir Sandabotnafjalli og Sandabotnaskarði er á mun meira dýpi en hin frávikin þrjú. Ekki er fyrir hendi nein augljós skýring á því hvernig á því stendur. Þar er engann virkan jarðhita að sjá á yfirborði, en við Leirhól er kulnuð ummyndunarskella og rannsóknaborun þar staðfesti að háhiti er undir. Sandabotnafjall myndaðist á síðasta jökulskeiði og hryggirnir ofan á því undir lok síðasta jökulskeiðs (Kristján Sæmundsson, 1991). Einu merkin um eldvirkni á Sandabotnafjalli á nútíma eru gossprunga austan við Hrafninnuhrygg, frá eldum fyrir um 10 þús. árum, sem Kristján kennir við Kröfluháls, og síðan gossprungur við hrygginn sunnan við austurdrög Grænagils, frá Hólseldum fyrir um 2000 árum. Ekki sjást brot eða misgengi í gegnum Sandabotnafjall, en móbergs- og líparíthryggirnir ofan á fjallinu eru þó nokkuð greinilega í framhaldi misgengja sunnan öskjunnar. Brotakerfið í gegnum Sandabotnafjall hefur því verið mun minna virkt síðustu 10000 árin en brot um miðbik og vesturhluta öskjunnar. Jarðhitavökvi á því ef til vill ógreiðari leið upp um þétt jarðlög og/eða innskot á þessum slóðum en annars staðar.

Viðnámsfrávikid undir sunnanverðum Hágöngum og Sandabotnum kom nokkuð á óvart. Í samantektarskýrslu um viðnámsmælingar í austanverðri Kröfluöskjunni fram til 1993, kemur fram að ein mæling á höllunum suðvestur af Hágöngum, við austurjaðar öskjunnar, sýnir lágt viðnám nærri yfirborði og hærra viðnám undir. Talið var að þarna væri um staðbundið fyrirbæri að ræða. Í tengslum við viðnámsmælingarnar 1999, sem einkum var ætlað að kortleggja vestari hluta öskjunnar, átti í lokin að afmarka þetta frávik. Í ljós kom hinsvegar að um var að ræða mun víðáttumeira frávik en talið hafði verið og svo fór að ekki vannst tími til að afmarka það innan þess tímaramma sem mælingunum var settur. Útmörk þessa fráviks í norðri og austri eru því ekki þekkt. Til þess þarf frekari mælingar. Þarna er um að ræða umfangsmikið viðnámsfrávik, sem rís hæst (á þeim hluta þess sem kortlagður hefur verið) utan öskjujaðarsins undir suðursproði Háganga. Í um 200 m hæð yfir sjó (á 300-400 m dýpi) tengist það austurenda fráviksins frá Kröflu og vestur fyrir Leirhnúk. Þegar neðar kemur breiðir frávikid sig til austurs, norðan Jörundar, eins langt og mælingar ná og eins til suðurs undir Sandabotnum og rennur að lokum saman við viðnámsfrávikid undir Sandabotnafjalli og Sandabotnaskarði.

Hér er um að ræða stórt viðnámsfrávik með afgerandi lágviðnámskápu, með viðnámi víða um og innan við 5 Ωm, og hærra viðnámi undir. Þetta kom á óvart því að á þessum slóðum er engin merki um jarðhitavirkni að sjá á yfirborði; austustu ummerki jarðhita eru í Hrafninnuhrygg og ummyndun í austurhlíðum Sandabotnafjalls, upp af Sandabotnum. Eldvirkni á þessum slóðum er mjög gömul (Kristján Sæmundsson, 1991). Hágöngin sjálf

eru æfaforð á tímaskala Kröflusvæðisins, eða um 130-150 þús. ára, Jörundur um 60 þús. ára og á síðjökultíma myndast móbergshryggir í Sandabotnum. Eina gosvirknin frá nútíma, sem er í einhverjum námunda, eru um 10 þús. ára gamlar gossprungur (samtímis gosvirkni í Kröfluhálsi) milli Hágangna og Kröflu. Þær eru skammt vestan við mjög skörp vesturmörk viðnámsfráviksins undir Hágöngum. Ekki er heldur að sjá sprungur og misgengi á þessum slóðum sem bendi til nýlegrar brotavirkni. Jarðfræðilegar aðstæður á yfirborði gefa því ekki ástæðu til að ætla að þarna sé nú veruleg jarðhitavirkni. Það er á hinn bóginn erfitt að útskýra hið afgerandi viðnámsfrávik á þessum slóðum á annan hátt en þann að þarna sé jarðhitakerfi í jörðu.

Nokkuð kom á óvart að viðnámsmælingarnar sýna ekki viðnámsfrávik sem benda til virks jarðhita um og suðvestur af Hvannstöði. Út frá jarðfræðilegum aðstæðum, sprengigígum, ummyndun á yfirborði og ummerkjum eftir öflugum hveravirkni er talið nánast víst að þarna hafi verið virkt jarðhitakerfi, a.m.k. þar til fyrir 5000 árum, en þá myndaðist Hvannstöð í sprengigosi. Viðnámsskipan á þessum slóðum ber nokkur einkenni dæmigerðrar viðnámsskipanar tengdri háhita, en með verulega hærri viðnámsgildum í "lágviðnámskápu" á 300-600 m dýpi. Sé þarna um að ræða ummyndun eftir gamalt háhitakerfi, hefur orðið mikil kæling og núverandi hitastig í hinu forna smektít-zeolítatableti er trúlegast ekki mikið herra en 50 °C. Kælingin hefur þá átt sér stað á síðustu 5000 árum, sem sýnir að háhitavirkni getur verið mjög hverful ef henni er ekki viðhaldið af innskotum. Eldvirkni og upphleðsla hefur verið mun minni í vesturhluta öskjunnar en í austur hlutanum. Vesturrein sprungusveimsins hefur hinsvegar verið nokkuð virk og er talin hafa verið mjög virk um og upp úr því að Hvannstöð myndaðist. Ef til vill hefur aukið aðgengi kalds grunnvatns, vegna brotavirkni, og ónóg innskotavirkni orðið til þess að háhitakerfið á þessum slóðum kólnaði niður.

Sé ofangreind túlkun á viðnámsskipaninni í vestasta hluta öskjunnar rétt, verður enn erfiðara að útskýra viðnámsfrávikinu undir Hágöngum öðruvísi en svo að þar sé nú virkt háhitakerfi, þrátt fyrir að engin merki sjáist um það á yfirborði. Hugsanlega hafa safnast þarna innskot í skorpuna, mun yngri en eldvirknin á yfirborði. Hugsanlega á jarðhitavökvi erfitt uppdráttar til yfirborðs í gegnum þétt og lítið brotinn jarðlög og/eða að honum sé haldið niðri af köldu grunnvatnsstreymi úr Hágöngunum. Úr þessu verður ekki skorið, svo óyggjandi sé, nema með rannsóknarborunum.

Á nokkrum stöðum eru útmörk viðnámsfrávikanna mjög skörp og breytast lítið með dýpi. Þetta á við um norðaustur mörk viðnámsfráviksins frá Kröflu, um Vítismó og yfir Leirhnúk. Þessi mörk liggja frá Kröflufjalli, norður um Kröfluháls og til norðvesturs, um 1,5 km sunnan við Hreindýrahól. Einnig eru vesturmörk á norðurhluta fráviksins undir Hágöngum mjög skörp við öskjujaðarinn. Í báðum tilfellum breytast mörkin nánast ekkert frá því um 200 m yfir sjó og niður á 500 m undir sjó, eins djúpt og mælingar skynja. Á báðum stöðum hefur verið gosvirkni á nútíma og er talið að þarna séu til staðar þéttir gangar sem hindra lárétt streymi vatns, bæði jarðhitavatns út frá jarðhitakerfinu og eins kalds grunnvatns að því. Suðvestur mörk viðnámsfráviksins frá Kröflu og yfir Leirhnúk, sem eru á línu frá sunnanverðum Leirhnúk, um Leirbotna og Græanagil, breytast nánast ekki frá yfirborði og niður undir sjávarmál. Þyngdarkort af Kröflusvæðinu og verulega

meira magn innskota í borholum norðan markanna sýnir að á þessum slóðum eru innskot á beltí með VNV-ASA stefnu og hin skörpu mörk viðnámsfrávisins sýna að þarna eru til staðar þéttir veggir, trúlega gangar, sem hindra rennsli eftir meginsprungustefnunni.

Eftirtektarvert er að viðnámsmælingarnar benda ekki til jarðhitavirkni í Hlíðardal, sunnan Hvíthóla. Í framhaldinu er, eins djúpt og mælingar sjá, vík inn í annars samfelld viðnámsfrávik jarðhitakerfisins til norðausturs undir vestanvert Sandabotnafjall. Hlíðardalurinn er innan meginsigdalsins í gegnum öskjuna, en þar hefur greinilega verið minna um eldvirkni og upphleðslu. Þarna er ef til vill minna um innskot og á þessum slóðum gæti því verið aðstreymi kalds grunnvatns eftir sprungum að djúpri hluta jarðhitakerfisins. Þessi túlkun fær nokkurn stuðning af hitamælingum í 166 m djúpri rannsóknarholu, sem boruð var í vesturmynni Sandabotnaskarðs, en þær sýndu aðeins um 40 °C hita á 160 m dýpi (óbirt gögn Orkustofnunar).

8. HEIMILDIR

- Axel Björnsson, Kristján Sæmundsson, Knútur Árnason, Grímur Björnsson, Gylfi Páll Hersir og Gunnar V. Johnsen, 1985: *Nesjavellir-Yfirborðsrannsóknir. Samantekt jarðfræði- og jarðeðlisfræðigagna. Rannsóknaráætlun fyrir árið 1985*. Orkustofnun, OS-85030/JHD-07, 97 s.
- Deer W. A., Howie R. A. og Zussman J., 1962: *Rock-Forming Minerals, Vol. 3, Sheet Silicates*, Longmans, Green and Co Ltd, London, 270 s.
- Drury, M.J. og Hindman R.D., 1979: *The electrical resistivity of oceanic basalts*. J. Geophys. Res., 84: 4537-4545.
- Gunnar V. Johnsen, 1995: *Þyngdarkort af Kröflusvæði í Eyjar í Eldhafi*. Ritnefnd: Björn Hróarsson, Dagur Jónsson og Sigurður S. Jónsson, 93-100.
- Gylfi Páll Hersir, Grímur Björnsson og Axel Björnsson, 1990: *Eldstöðvar og jarðhiti á Hengilssvæði, jarðeðlisfræðileg könnun*. Orkustofnun, OS-90031/JHD-06, 93 s.
- Halldór Ármannsson, Ásgrímur Guðmundsson og Benedikt Steingrímsson, 1987: *Exploration and development of the Krafla geothermal area*. JÖKULL, No. 37, 13-30.
- Hjalte Franzson, 1988: *Nesjavellir. Borholujarðfræði. Vatnsgengd í jarðhitageymi*. Orkustofnun, OS-88046/JHD-09, 58 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: *Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C*. International Clay conference 1978. Ritstj. Mortland og Farmer. Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam 1979, 277-288.
- Jens Tómasson, 1995: *Ummyndun á Norðurreykjum og í Helgadal, Mosfellsbæ*. Orkustofnun, OS-95053/JHD-34B, 63 s.
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í Kröflu*. Orkustofnun, OS-96005/JHD-03, 96 s.
- Knútur Árnason, Brynjólfur Eyjólfsson, Karl Gunnarsson, Kristján Sæmundsson og Axel Björnsson, 1984: *Krafla-Hvíthóll. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðikönnun 1983*. Orkustofnun, OS-84033/JHD-04, 61 s.
- Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986: *Nesjavellir. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1985*. Orkustofnun, OS-86017/JHD-02, 125 s.

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: *Nesjavellir - Ölkelduháls. Yfirborðsrannsóknir 1986*. Orkustofnun, OS-87018/JHD-02, 112 s.

Knútur Árnason, Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Gylfi Páll Hersir, 1987a: *Resistivity Structure of High-Temperature Geothermal Systems in Iceland*. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) XIX General Assembly, Vancouver, Kanada, 9.-22. ágúst. Abstracts V.2: 447.

Knútur Árnason, 2001: *Some 3D-effects in central-loop TEM-soundings*. Skýrsla Orkustafnunar; í útgáfu.

Kristján Sæmundsson, 1991: *Jarðfræði Kröflukerfisins í Náttúra Mývatns*. Ritstj. Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson. Hið íslenska náttúrufræðifélag, 25-95.

Lúðvík S. Georgsson, 1985: *Höfuðborgarsvæði-Borgarfjörður. Niðurstöður viðnámsmælinga*. Orkustofnun, OS-85111/JHD-14, 41 s.

Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Knútur Árnason 1985: *Resistivity Structure of the Upper Crust in Iceland*. J. Geophys. Res. Vol. 90, No. B12, 10136-10150.

Páll Einarsson, 1991: *Umbrotin við Kröflu 1975-1989*. í Náttúra Mývatns. Ritstj. Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson. Hið íslenska náttúrufræðifélag, 97-139.

Ragna Karlsdóttir, Gunnar Johnsen, Axel Björnsson, Ómar Sigurðsson og Egill Haukson, 1978: *Jarðhitasvæðið við Kröflu, Áfangaskýrsla um jarðeðlisfræðilegar rannsóknir 1976-1978*. Orkustofnun, OS JHD 7847, 112 s.

ENGLISH SUMMARY

This report contains the results of resistivity measurements in the Krafla geothermal field, NE Iceland. It presents the resistivity structure of the uppermost 1 km of the Krafla caldera and vicinity. The results are mainly based on one-dimensional inversion of central-loop TEM data collected in 1991, 1993 and 1999. The data set is, in some cases, augmented by older Schlumberger and head-on-resistivity data.

Above sea-level, the results show three, largely separated anomalies of low resistivity which is underlain by higher resistivity. The largest anomaly extends from mount Krafla and its southern slopes and Kröfluháls in the south-east and to the north-west over Leirhnúkur and towards Hvannstóð. The eastern boundaries of the anomaly, north of mount Krafla, are sharp and near vertical. The same applies to the south-west boundaries of the anomaly, under Grænagil, Leirbotnar and southern part of Leirhnúkur. They are sharp and near vertical down to sea level. Another resistivity anomaly is found under Leirhnúkshraun, west of the mountains Þríhyrningar, and extending to the south under Dalfjall. The third anomaly is under Sandabotnar and the southern part of Hágöng. At 200 m above sea-level, it connects weakly, west of Sandabotnar, with the anomaly under the southern slopes of Krafla. A part of this anomaly lies outside the caldera and extends outside the surveyed area so that its north-east boundaries are not defined. At sea-level, an anomaly starts to appear under the southern part of Snadabotnafjall and Sandabotnaskarð. At and right below sea-level this anomaly appears to be mostly separated from other anomalies.

The above discussed anomalies are thought to reflect, in some respect, distinct up-flow zones. At greater depths, the anomalies start to merge together and at 400 m below sea-level, a continuous anomaly of high resistivity below low resistivity is observed, covering an area of about 48 km². The resistivity soundings do not show signs of geothermal activity in a wedge into the main anomaly, under the valley Hlíðardalur and the western part Sandabotnafjall.

Contrary to what was expected, the resistivity soundings did not show resistivity anomalies below and south-west of Hvannstóð. It is generally believed that a geothermal system was active there, some thousand years ago. The observed resistivity structure does not indicate geothermal activity in this area, at present. The prominent and extensive resistivity anomaly under Hágöng was likewise unexpected. No indications of geothermal activity are found at the surface, but the anomaly has all characteristics of high-temperature geothermal system. Whether this is the case, needs to be answered by test drilling.

VIÐAUKI

Mæliferlar TEM-mælinga á Kröflusvæði og einvíð túlkun þeirra. Fyrir hvern sýndarviðnámsferil er bæði sýnd túlkun með lagskiptu líkani (vinstramegin á síðu) og samfelldu líkani (hægramegin á síðu).

