



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Í Torfajökli



TEM-Viðnámsmælingar

Ragna Karlsdóttir

ÚTLÁN

Bókasafn Orkustofnunar

Unnið fyrir Auðlindadeild Orkustofnunar

2001

OS-2001/031



Skýrsla nr: OS-2001/031	Dags: Maí 2001	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
-----------------------------------	--------------------------	---

Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Í TORFAJÖKLI TEM-viðnámsmælingar	Upplag: 25
Höfundar: Ragna Karlsdóttir	Verkefnisstjóri: Ragna Karlsdóttir
Gerð skýrslu / Verkstig: Könnun háhitasvæðis, viðnámsmælingar	Verknúmer: 8-720102

Unnið fyrir: Auðlindadeild Orkustofnunar
Samvinnuaðilar:

Útdráttur: Gerð er grein fyrir TEM-viðnámsmælingum sem gerðar voru sem liður í könnun á umfangi jarðhitakerfisins í Torfajökli. Mælingar með þessari aðferð ná niður á um kílómetars dýpi. Mælingar hófust 1993 og lauk vorið 2000, alls voru gerðar 123 mælingar. Jarðhitasvæðið í Torfajökli er stærsta slíkt svæði sem rannsakað hefur verið með viðnámsmælingum hér á landi. Miðað við dýpi við sjávarmál er flatarmál svæðis með háhitauummyndun tæpir 400 ferkilómetrar. Niðurstöður viðnámsmælinganna sýna flókna viðnámsmynd. Tvöföld lágvíðnámskápa kemur fram á sumum svæðum og einnig eru svæði þar sem engin merki eru um lágvíðnámskápu. Það sýnir að jarðhitakerfið undir sjálfum Torfajökli greinist frá jarðhitakerfi sem nær yfir alla vestan- og norðanverða öskjuna og út fyrir hana. Þetta vestara kerfi nær yfir svæðin sem kennd eru við Hrafntinnusker, Reykjadalí og Landmannalaugar.

Lykilorð: Háhitasvæði, jarðeðlisfræðilegar mælingar, eðlisviðnám, jafnviðnámskort, viðnámssnið, Torfajökulssvæði	ISBN-númer:
	Undirskrift verkefnisstjóra: <i>Ragna Karlsdóttir</i>
	Yfirlit af: KÁ, VS, PI

Ragna Karlsdóttir

Í Torfajökli

TEM-Viðnámsmælingar

Unnið fyrir Auðlindadeild Orkustofnunar

OS-2001/031

Maí 2001

ISBN 9979-68-068-7

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

TEM-viðnámsmælingum var beitt á Torfajökulssvæði til að kanna umfang jarðhitakerfisins niður á um kílómetres dýpi. Mælingar hófust 1993 og þeim lauk vorið 2000. Farið var í fimm vetrarferðir til mælinga, 10 -12 daga langar svo og eina stutta haustferð. Alls urðu mælingarnar 123.

Jarðhitasvæðið í Torfajökli er stærsta jarðhitasvæði sem til þessa hefur verið rannsakað með viðnámsmælingum á Íslandi. Land umhverfis Torfajökulshálendið er gjarnan í 500-600 metra hæð en uppi á háleindinu innan Torfajökulsöskjunnar er land í 800-1100 metra hæð. Við sjávarmál er flatarmál þess svæðis sem orðið hefur fyrir háhitaum-myndun tæplega 400 ferkílómetrar.

Niðurstöður viðnámsmælinganna sýna flókna viðnámsmynd. Tvöfold lágvíðnámskápa kemur fram á sumum svæðum, einkum um miðbik og vestanverða öskjuna. Einnig eru svæði þar sem engin merki eru um lágvíðnámskápu, en þau eru: Við öskjubrotið við Laufafell; við öskjubrotið norðaustan Torfajökuls og stórt svæði sem fleygast inn í öskjuna norðan við Torfajökul og tengist mjórra hafti sem liggur norður-suður um Háskerðing. Þetta sýnir að jarðhitakerfið undir sjálfum Torfajökli greinist frá jarðhitakerfi, sem nær yfir alla vestan- og norðanverða öskjuna og út fyrir hana. Þetta vestara kerfi nær yfir svæðin, sem kennd eru við Hrafntinnusker, Reykjadalí og Landmannalaugar.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. VIÐNÁMSMÆLINGAR	6
3. SAMBAND eðlisviðnáms og jarðhita	9
4. FRAMKVÆMD mælinga	11
5. TÚLKUN TEM-mælinganna	17
6.1 Jafnviðnámskort	17
6.2 Viðnámssnið	29
6. LOKAORD	63
7. MEIMILDIR	65
8. VIÐAUKI 1: TEM-mæliaðferðin	67
9. VIÐAUKI 2: Túlkun einstakra mælinga	69

TÖFLUR

Tafla 1. UTM-hnit og hæð (m y.s.) TEM-mælinga í Torfajökli	12
Tafla 2. UTM-hnit og hæð (m y.s.) TEM-mælinga í Torfajökli	13
Tafla 3. UTM-hnit og hæð (m y.s.) TEM-mælinga í Torfajökli	14

MYNDIR

Mynd 1. Jarðhitakort	7
Mynd 2. Afstöðumynd - Helstu kennileiti	15
Mynd 3. Staðsetning og númer viðnámsmælinga	16
Mynd 4. Viðnám á 1000 m y.s.	19
Mynd 5. Viðnám á 900 m y.s.	20
Mynd 6. Viðnám á 800 m y.s.	21
Mynd 7. Viðnám á 700 m y.s.	22
Mynd 8. Viðnám á 600 m y.s.	23
Mynd 9. Viðnám á 500 m y.s.	24
Mynd 10. Viðnám á 400 m y.s.	25
Mynd 11. Viðnám á 300 my.s.	26
Mynd 12. Viðnám á 200 m y.s.	27

Mynd 12. Viðnám á 200 m y.s.	27
Mynd 13. Viðnám á 100 m y.s.	28
Mynd 14. Lega viðnámssniða - vesturhluti	31
Mynd 15. Lega viðnámssniða - austurhluti	32
Mynd 16. Viðnámssnið AV81	33
Mynd 17. Viðnámssnið AV82	34
Mynd 18. Viðnámssnið AV84	35
Mynd 19. Viðnámssnið AV86	36
Mynd 20. Viðnámssnið AV88	37
Mynd 21. Viðnámssnið AV90	38
Mynd 22. Viðnámssnið AV92	39
Mynd 23. Viðnámssnið AV94	40
Mynd 24. Viðnámssnið AV96	41
Mynd 25. Viðnámssnið AV98	42
Mynd 26. Viðnámssnið AV100	43
Mynd 27. Viðnámssnið NS77	44
Mynd 28. Viðnámssnið NS79	45
Mynd 29. Viðnámssnið NS81	46
Mynd 30. Viðnámssnið NS83	47
Mynd 31. Viðnámssnið NS85	48
Mynd 32. Viðnámssnið NS87	49
Mynd 33. Viðnámssnið NS89	50
Mynd 34. Viðnámssnið NS90	51
Mynd 35. Viðnámssnið NS91	52
Mynd 36. Viðnámssnið NS93	53
Mynd 37. Viðnámssnið NS95	54
Mynd 38. Viðnámssnið NS96	55
Mynd 39. Viðnámssnið NS97	56
Mynd 40. Viðnámssnið NS99	57
Mynd 41. Viðnámssnið NS101	58
Mynd 42. Viðnámssnið NS102	59
Mynd 43. Viðnámssnið NS104	60
Mynd 44. Viðnámssnið S1	61
Mynd 45. Viðnámssnið S2	62

1. INNGANGUR

Tilgangur verksins var að kanna umfang jarðhitakerfisins í Torfajökli eins og unnt er með TEM-viðnámsmælingum.

Helstu rannsóknir sem farið hafa fram á Torfajökulssvæði til þessa eru rannsóknir Kristjáns Sæmundssonar á jarðhita, jarðlagaskipan og gosmyndunum svæðisins (1988). Björn Gunnarsson athugaði efnasamsetningu nútímahrauna (1987) og McGarvie athugaði kvíkublöndun nútímahrauna (1985). Gretar Ívarsson kannaði efnasamsetningu bergs í nyrsta og austasta hluta svæðisins (1992) og Stefán Arnórsson o.fl. (1987) athuguðu efnainnihald jarðhitans á norður- og vesturhluta svæðisins.

Árið 1992 var ráðist í samvinnuverkefni Orkustofnunar og orkufyrirtækja sem var nefnt: *Rannsókn jarðhita til raforkuvinnslu* (Valgarður Stefánsson, 1992). Stór hluti af þessu viðamikla verkefni var yfirborðsrannsókn á Torfajökulssvæði. Helstu þættir þeirrar rannsóknar voru:

- **Jarðfræði:** Kortlagning á jarðfræði Torfajökulssvæðis; útgáfa jarðhitakorts svo og jarðfræðikorts af svæðinu og samantekt um jaðlagaskipan, gosmyndanir og þróun jarðhitans.
- **Jarðefnafræði:** Athuganir á eftum í jarðgufu og heitu vatni til að meta virkni jarðhitans. Þessum þætti er lokið með skýrslunni *Í Torfajökli - Efni í jarðgufu og heitu vatni* eftir Jón Örn Bjarnason og Magnús Ólafsson (2000).
- **Jarðeðlisfræði:** Rannsókn á stærð jarðhitakerfisins með TEM-viðnámsmælingum. Skýrsla sú sem hér birtist fjallar um niðurstöður þeirrar rannsóknar.

Mynd 1 sýnir jarðhitakortið af Torfajökulssvæði.

Jarðhitasvæðið í Torfajökli er að jafnaði talið hið öflugasta á Íslandi að Grímsvötnum undanskildum. Land í Torfajökli liggar hátt og er mjög gilskorið, einkum austantil, og er því mjög erfitt yfirferðar.

2. VIÐNÁMSMÆLINGAR

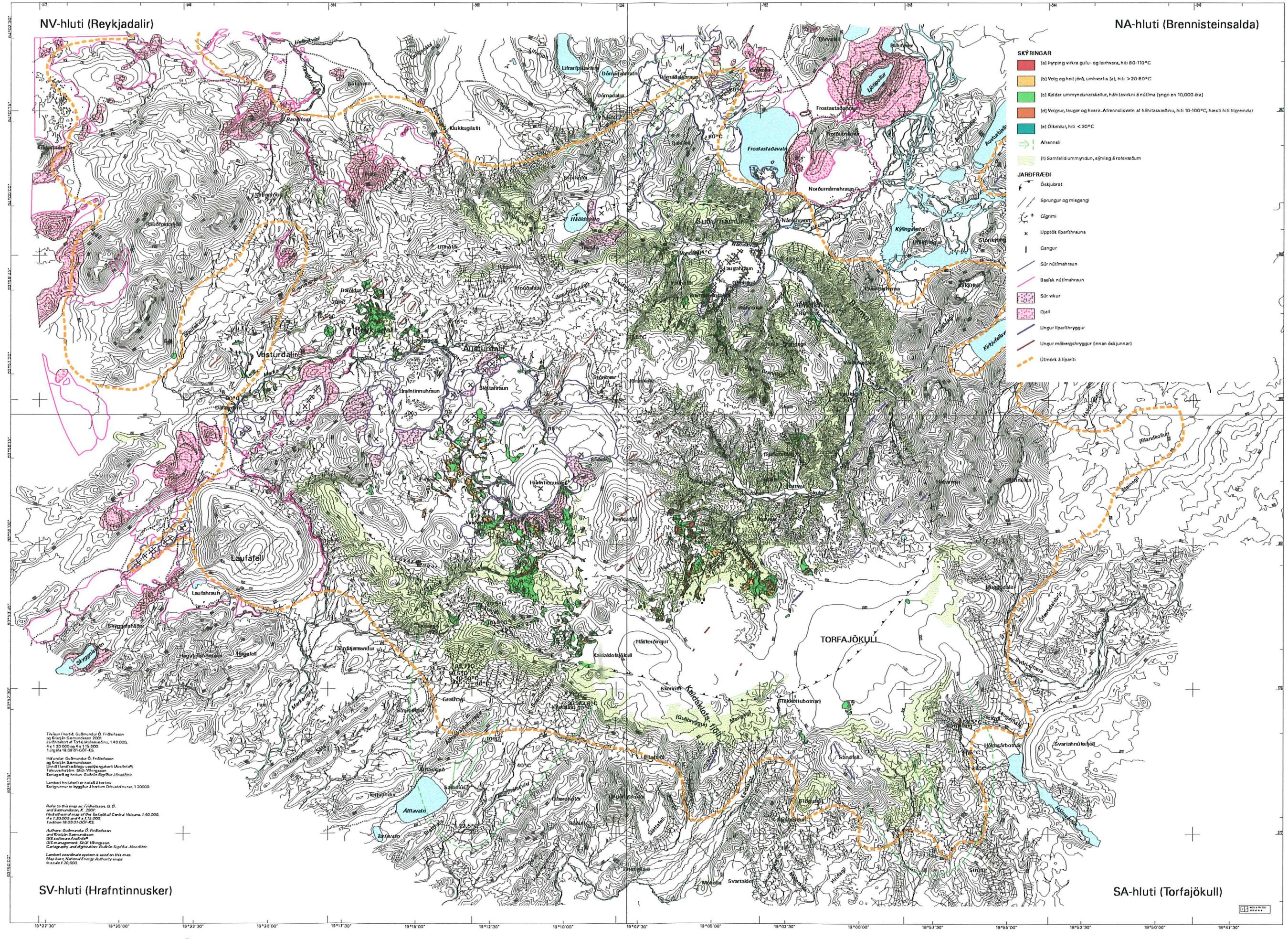
TEM-mælingar hafa rutt sér til rúms sem viðnámsmælingaaðferð til jarðhitaleitar á síðustu árum. Þær eru ódýrari í framkvæmd og gagnasöfnun fljóttlegri en með eldri viðnámsmælingaaðferð (Schlumberger-mælingum). Nánari lýsing á TEM-mæliaðferðinni og túlkun er í viðauka 1.

Framan af voru TEM-mælingar einkum notaðar til rannsókna á háhitavæðum hér á landi en nú er farið að nota þær í auknum mæli til rannsókna utan gosbeltanna. Samsvörum milli Schlumberger- og TEM-mælinga á háhitavæðunum er allgóð en þar háttar þannig til að viðnámsmælingar "sjá" þykk viðnámslög með miklum mun í viðnámi. Munur á milli mæliaðferða kemur þó oft fram í efstu 100 metrunum þar sem Schlumbergermælingar eru viðkvæmari fyrir lágvíðnámi í yfirborði. Dýptarskynjun var álitin mjög samþærileg í báðum mæliaðferðum.

Þegar farið var að bera saman niðurstöður Schlumberger- og TEM-mælinga utan gosbeltanna kom fram allnokkur munur. Utan gosbeltanna eru jarðlög mjög lagskipt og er bergrunnurinn gjarnan samsettur úr mörgum þunnum hraunlögum með karga á milli. Fræðileg úttekt var gerð á mæliaðferðunum fyrir lagskiptan stafla. Kom þá í ljós að mæliaðferðirnar gefa mismunandi þykkt og meðal-eðliviðnám fyrir syrpur, sem gerðar eru úr mörgum þunnum lögum með breytilegu viðnámi. Einnig þykir ljóst að TEM-mælingar hafi betri upplausn með dýpi, þ.e. hafi betri möguleika á að greina lagskiptar syrpur upp í einstök lög en Schlumbergermælingar (Knútur Árnason, 1995).

Við TEM-mælingar í Eyjafirði 1995 sást í raun í fyrsta skipti að TEM-mælingar sjá dýpra og hafa betri upplausn en Schlumberger-mælingar utan gosbeltisins. Schlumberger-mælingarnar gefa að jafnaði betri upplausn efstu 100-200 metrum mælingar en TEM-mælingarnar. Hins vegar sjá TEM-mælingarnar lagskiptingu á 500-1300 metra dýpi þar sem Schlumberger-mælingarnar sjá aðeins meðalviðnám (Ólafur G. Flóvenz og Ragna Karlssdóttir, 2000).

Jarðhitakort af Torfajökulssvæðinu



3. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA

Ástæða þess að viðnámsmælingum er beitt við jarðhitarannsóknir er sú að berg, mettað heitu vatni leiðir betur rafstraum en þurrt kalt berg. Eðlisviðnám í vatnsmettuðu bergi er háð poruhluta bergsins, viðnámi vatnsins, hitastigi og ummyndun bergsins. Þessir þættir spila saman á flókinn hátt og er það samspil ekki skilið að fullu. Settar hafa verið fram reynslujöfnur til að lýsa áhrifum einstakra þátta og byggja þær yfirleitt á mælingum á eðlisviðnámi bergsýna við mismunandi aðstæður. Ólafur G. Flóvenz o.fl. (1985) gerðu tilraun til að kanna áhrif þessarra þátta á eðlisviðnám bergs í efsta kílómetra jarðskorpu Íslands utan gosbeltanna. Niðurstöður voru þær, að eðlisviðnám vatnsmettaðs bergs er nánast óháð eðlisviðnámi vatnsins ef vatnið er ósalt, þ.e. ef eðlisviðnám vatnsins er hærra en h.u.b. 1 Ωm við stofuhita. Eðlisviðnám vatnsmettaðs bergs er hins vegar háð poruhluta og hitastigi. Í efsta kílómetra skorpunnar utan gosbeltanna eru leirsteindir og zeolítar ráðandi ummyndunarsteindir. Veggir poranna eru þaktir ummyndunarsteindum og virðist rafleiðnin vera mest eftir ummyndunarþekjunni.

Við rannsóknir á háhitasvæðinu á Nesjavöllum 1985 og 1986 fíkkst allítarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins og var sú mynd borin saman við umfangsmikil gögn úr borholum (Knútur Árnason o. fl., 1986, 1987, 1987a). Sá samanburður leiddi í ljós góða fylgni milli hitastigs, ummyndunar og eðlisviðnáms. Þar sem ríkir jafnvægi á milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndunarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979). Við hitastig frá 50-100°C og upp í 200°C er smektít og zeolítar ráðandi ummyndunarsteindir. Frá 200°C upp í 230°C hverfa zeolítar og smektít þróast yfir í blandlagssteindir. Ofan við 230°C hafa blandlagssteindirnar þróast yfir í klórít og um ofan við 250°C eru klórít og epidót ráðandi ummyndunarsteindir.

Samanburður ummyndunarbeltna við niðurstöður viðnámsmælinganna leiddi í ljós góða fylgni. Einkennandi viðnámsmynd af háhitasvæði er hátt viðnám 10000-20000 Ωm í yfirborði (ógróiðhraun), viðnámslækkun niður í 500-1000 Ωm við vatnsborð, lágvíðnámskápa með < 10 Ωm utan á háviðnámskjarna með viðnámi allt að því stærðargráðu hærra. Samanburður á eðlisviðnámi og berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu leiddi í ljós að lágvíðnámskápan svarar til smektít-zeolítabeltisins við hitastig 50-200°C. Háviðnámskjarninn svarar til klórít-epidótbeltsins við hitastig > 240°C. Orsök mismunandi leiðni í ummyndunarbeltnu liggar í jónaskiptaeiginleikum einstakra steinda. Smektít og blandlagssteindirnar eru lagsílíköt með lausbundnar jónir og því mikla jónaskiptaeiginleika og þar af leiðandi mikla leiðni. Í klóríti eru jónirnar hins vegar bundnar í kristalgrind og viðnámið því miklu hærra en í leirsteindunum (Deer o.fl., 1962)

Ljóst er að viðnámsmælingarnar gefa mynd af ummyndun kerfisins. Samsvörun á milli eðlisviðnáms og berghita er því aðeins fyrir hendi að jafnvægi ríki milli ummyndunar og berghita. Samsvarandi rannsóknir á öðrum háhitakerfum gefa sömu niðurstöður (Ragna Karlsdóttir, 1993; Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996), en rétt er að hafa hugfast að í öllum tilfellum er um háhitakerfi að ræða þar sem ríkjandi bergtegundir eru basískar.

Um samband ummyndunar og viðnáms í jarðhitakerfum þar sem ríkjandi bergtegundir eru súrar er minna vitað. Athugun sem gerð var á viðnámsgögnum frá Berlin-jarðhitavæðinu í El Salvador benda til samsvarandi viðnámsmyndar á súrum háhitavæðum (Santos L.; 1995). Ummyndunarsteindirnar eru aðrar en gefa sömu svörun í viðnámi, þ.e. lágvíðnámskápu utan á háviðnámskjarna. Þó geta þau skil gerst við annað hitastig en í basískum kerfum. Torfajökulssvæði er í raun fyrsta háhitavæðið á Íslandi, þar sem viðnámsmælingum er beitt á landssvæði þar sem súrar bergtegundir eru mjög ráðandi. Eins og síðar kemur í ljós í skýrslunni eru niðurstöður viðnámsmæliganna á Torfajökulssvæði talsvert flóknari en áður hefur sést.

Svo aftur sé vitnað til tilraunar Ólafs G. Flóvenz o.fl. (1985), var haldið fram að ummyndunleiðnin væri ráðandi í ósoltum jarðhitakerfum en í söltum jarðhitakerfum væri leiðni jarðhitavökvans ráðandi og því sæist ekki háviðnámskjarni. Á þeim tíma var að eins um Sclumbergermælingar að ræða sem mæliaðferð, en eins og vikið er að áður er dýptarskynjun þeirra lítil í söltu umhverfi. TEM-mælingarnar 1996 virðast geta "séð" lagksiptingu allt niður á 1000-1200 metra dýpi í þessu umhverfi. Þær greina lágvíðnámskápu og háviðnámskjarna á jarðhitavæðunum á utanverðum Reykjanesskaga svo ljóst er að leiðni jarðhitavökvans í söltum jarðhitakerfum er ekki einráð, eins og haldið hefur verið fram til þessa. TEM-mælingarnar "sjá" mismunandi leiðni í ummyndunarbeltum jarðhitakerfanna líkt og í ferskvatnskerfum. Hins vegar er eðlisviðnám í háviðnámskjarna og lágvíðnámskápu mun lægra í söltum kerfum en ferskvatnskerfum svo leiðni jarðhitavökvans hefur veruleg áhrif í háviðnámskjarnanum.

4. FRAMKVÆMD MÆLINGA

TEM-mælingar eru gjarnan stundaðar að vetri, með aðstoð vélsleða á snjó og því auðveldara að komast leiðar sinnar. Á móti kemur að veður er oft rysjótt á hálendinu og gerir mælingarnar oft og tíðum mjög erfiðar.

TEM-mælingarnar hófust árið 1993, en þá var fyrsta úthaldið. Síðan var farið 1994 og 1995, en þá varð hlé um nokkurra ára skeið. Síðustu þrjár mæliferðir voru farnar árin 1999 (tvær ferðir) og 2000 (ein ferð). Allar ferðirnar voru vetrarferðir nema ein, en haustið 1999 var farið og mælt í Jökulgili því einungis er hægt að treysta á færð þangað að haustlagi. Má segja að menn hafi hreppt öll veður í þessum ferðum, allt frá glampandi sól og stillum í kolvitlaust hríðarveður. Þeir mælingamenn sem hafa tekið þátt í þessum mælingum eru:

- 1993: Knútur Árnason, jarðeðlisfræðingur og Einar Hrafnkell Haraldsson, verkfræðingur.
- 1994: Hjálmar Eysteinsson, jarðeðlisfræðingur og Einar Hrafnkell Haraldsson, verkfræðingur.
- 1995: Hjálmar Eysteinsson, jarðeðlisfræðingur og Einar Hrafnkell Haraldsson, verkfræðingur.
- 1999, vetrarferð: Hjálmar Eysteinsson, jarðeðlisfræðingur, Knútur Árnason, jarðeðlisfræðingur og Steingrímur Benediktsson, nemi.
- 1999, haustferð: Knútur Árnason, jarðeðlisfræðingur, Hjálmar Eysteinsson, jarðeðlisfræðingur og Einar Hrafnkell Haraldsson, verkfræðingur.
- 2000: Hjálmar Eysteinsson, jarðeðlisfræðingur, Einar Hrafnkell Haraldsson, verkfræðingur.

Alls hafa náðst 123 TEM-mælingar við erfiðstu aðstæður, sem menn hafa unnið við fram til þessa. Má þar bæði kenna erfiðu landi og vondum veðrum.

Afstöðumynd og staðsetning mælinganna er sýnd á myndum 2 og 3 og hnit þeirra og hæð sýnd í eftirfarandi töflum 1, 2 og 3.

Tafla 1. UTM-hnit og hæð (m y.s.) TEM-mælinga í Torfajökli.

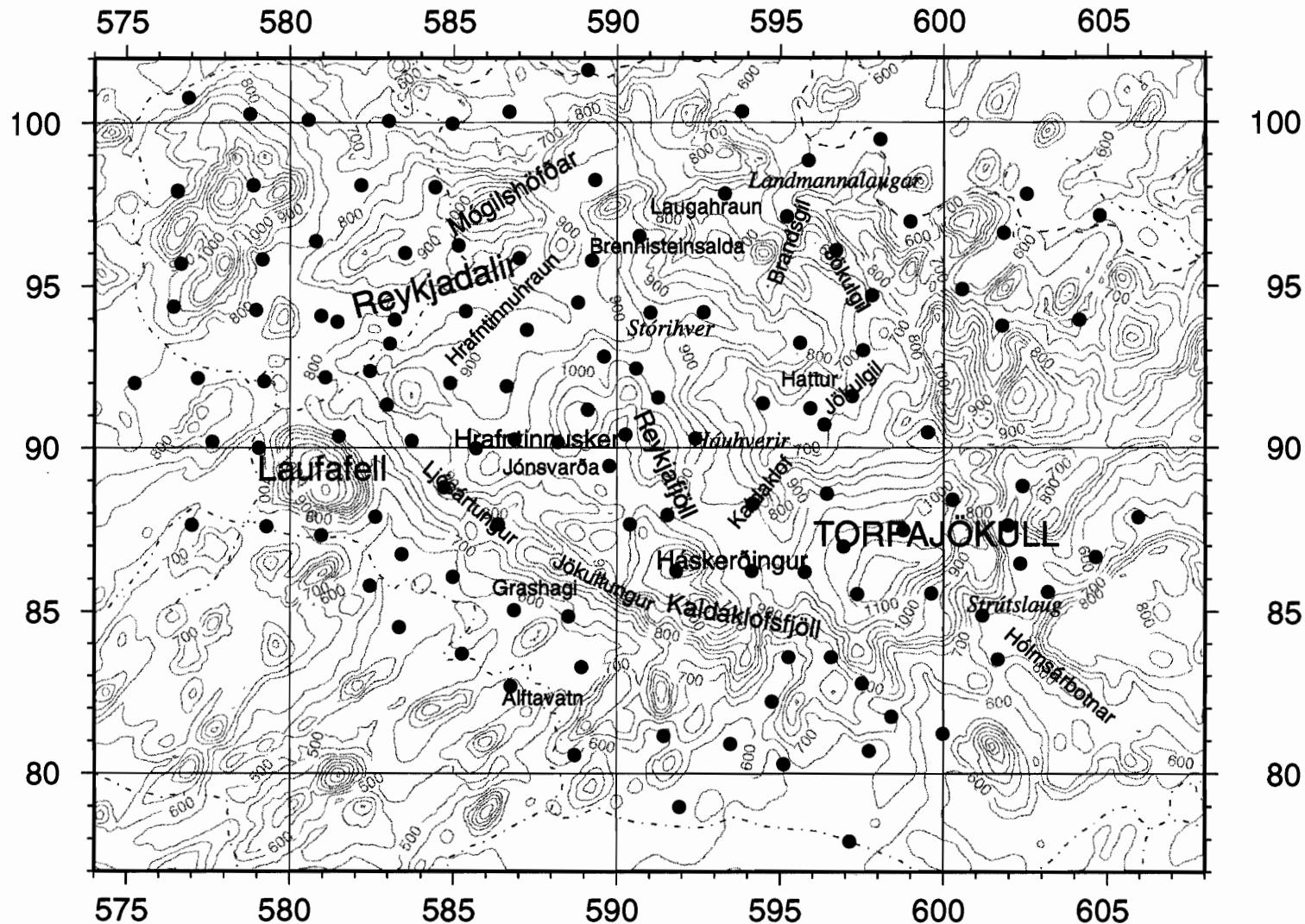
Mæling	Breidd	Lengd	Hæð yfir sjó
000811	7599947	7081217	580
004884	7600240	7088405	1060
012848	7601157	7084863	620
017834	7601629	7083493	610
019875	7601922	7087619	660
020864	7602308	7086465	635
024887	7602373	7088827	760
025981	7602488	7097773	590
032854	7603143	7085595	640
046866	7604600	7086664	590
047973	7604715	7097114	600
058880	7605911	7087872	660
887802	7588708	7080560	570
905922	7590553	7092434	1020
907967	7590667	7096506	940
914811	7591430	7081140	600
917861	7591788	7086238	1130
918791	7591892	7078977	590
935811	7593451	7080895	600
941882	7594130	7088287	940
945915	7594427	7091363	680
948821	7594718	7082186	610
952803	7595084	7080284	600
952835	7595227	7083556	630
957863	7595715	7086196	960
962915	7595889	7091203	670
964886	7596396	7088591	960
964905	7596309	7090697	660
966836	7596528	7083562	750
972779	7597109	7077935	590
972916	7597161	7091575	630
973856	7597335	7085531	1040
974828	7597476	7082749	760
975932	7597504	7093006	630
977809	7597686	7080688	615
984818	7598372	7081741	750
987875	7598726	7087494	1060
996855	7599590	7085548	900
T0195	7600533	7094889	600
T0294	7601751	7093759	640
T0296	7601798	7096592	600

Tafla 2. UTM-hnit og hæð (m y.s.) TEM-mælinga í Torfajökli.

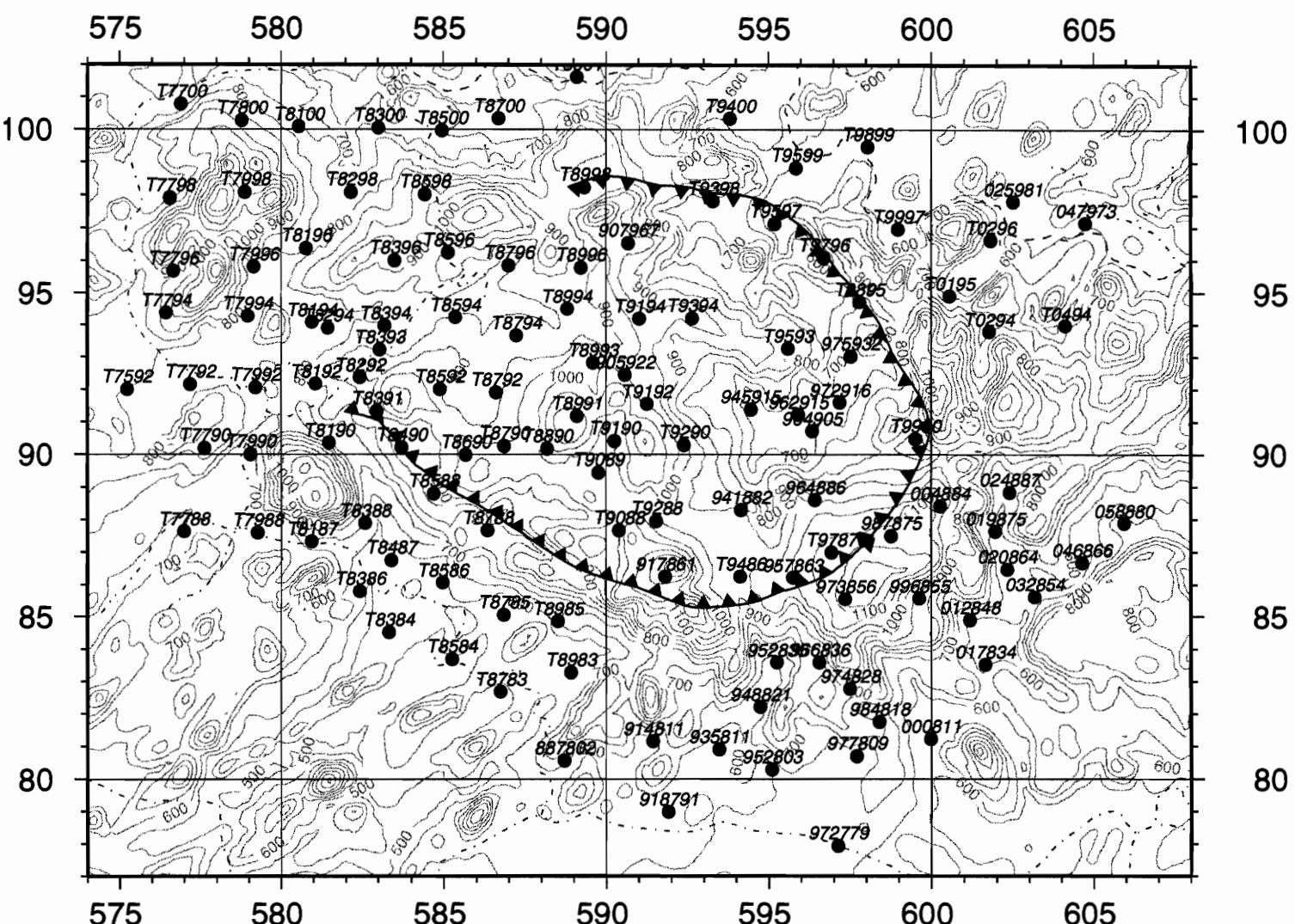
Mæling	Breidd	Lengd	Hæð yfir sjó
T0494	7604090	7093946	610
T7592	7575239	7091984	800
T7700	7576897	7100753	730
T7788	7576997	7087635	670
T7790	7577616	7090177	820
T7792	7577172	7092143	790
T7794	7576428	7094353	930
T7796	7576660	7095658	910
T7798	7576552	7097884	780
T7800	7578775	7100248	900
T7988	7579261	7087586	660
T7990	7579039	7089997	700
T7992	7579200	7092046	800
T7994	7578958	7094259	770
T7996	7579144	7095788	790
T7998	7578870	7098060	990
T8100	7580553	7100049	750
T8187	7580937	7087319	610
T8190	7581476	7090342	750
T8192	7581052	7092149	840
T8194	7580938	7094061	770
T8196	7580770	7096361	800
T8292	7582428	7092353	870
T8294	7581434	7093888	770
T8298	7582154	7098066	790
T8300	7582999	7100027	730
T8384	7583317	7084500	590
T8386	7582422	7085778	540
T8388	7582586	7087889	640
T8391	7582942	7091316	890
T8393	7583032	7093213	820
T8394	7583191	7093955	830
T8396	7583491	7095978	950
T8487	7583381	7086747	590
T8490	7583713	7090191	900
T8500	7584942	7099942	680
T8584	7585250	7083668	540
T8586	7584960	7086044	610
T8588	7584697	7088794	860
T8592	7584869	7091988	930
T8594	7585352	7094216	990

Tafla 3. UTM-hnit og hæð (m y.s.) TEM-mælinga í Torfajökli.

Mæling	Breidd	Lengd	Hæð yfir sjó
T8596	7585130	7096219	910
T8598	7584426	7097995	950
T8690	7585666	7089982	900
T8700	7586687	7100307	610
T8783	7586737	7082661	550
T8785	7586836	7085040	560
T8788	7586345	7087662	820
T8790	7586851	7090242	920
T8792	7586606	7091883	890
T8794	7587225	7093643	900
T8796	7586998	7095830	850
T8890	7588170	7090160	1010
T8901	7589081	7101601	600
T8983	7588902	7083266	560
T8985	7588497	7084828	610
T8991	7589094	7091167	1140
T8993	7589581	7092808	1010
T8994	7588778	7094470	840
T8996	7589213	7095766	880
T8998	7589307	7098213	830
T9088	7590367	7087661	1020
T9089	7589755	7089443	930
T9102	7590940	7102153	570
T9190	7590234	7090395	1000
T9192	7591242	7091525	1010
T9194	7590996	7094169	950
T9288	7591531	7087941	1030
T9290	7592375	7090278	990
T9394	7592620	7094183	950
T9398	7593263	7097794	630
T9400	7593793	7100316	570
T9486	7594103	7086244	950
T9593	7595564	7093249	970
T9597	7595170	7097104	610
T9599	7595821	7098802	580
T9787	7596905	7086989	1050
T9796	7596662	7096065	610
T9895	7597769	7094697	620
T9899	7598019	7099448	590
T9990	7599474	7090466	780
T9997	7598955	7096937	590



Mynd 2. Afstöðumynd - Helstu kennileiti. Punktar sýna staðsetningu viðnámsmælinga.
Hnitakerfi ásanna eru UTM-hnit í km.



Mynd 3. Staðsetning og númer viðnámsmælinga - Útlínur Torfajökulsöskjunnar.
Hnitakerfi ásanna eru UTM-hnit í km.

5. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA

Hver mæling er túlkuð sjálfstætt. Sett er fram líkan með "ótalmörgum" lögum og tölvu-forrit raðar viðnámsgildum í lögum þannig að líkanferillinn verður sem líkastur mæliferlinum. Síðan er lögum fækkað, oft í 4-6 þannig að þessi fáu lög sýna helstu drætti margлага líkansins. Túlkun hverrar mælingar er sýnd í viðauka 2 og þar sést bæði margлага lausnin svo og einfaldað líkan.

Niðurstöður túlkunarinnar eru settar fram sem jafnviðnámskort, sem sýnir viðnám á ákveðnu dýpi og nokkur þversnið í gegnum kerfið. Jafnviðnámskortin eru sýnd á 100 metra dýptarbili, allt frá 1000 m y.s. að 100 m y.s. Um túlkun viðnámsmælinga er vís-að í viðauka 1.

5.1 Jafnviðnámskort

Viðnám á 1000 m y.s. (mynd 4). Aðeins nokkrar mælingar eru hærra í landi en 1000 m y.s. Þær eru við Hrafntinnusker og þaðan að Háskerðingi svo og hátoppurinn á sjálfum Torfajökli. Þær sýna allar hátt viðnám á 1000 m y.s. nema aðeins sér í lækkandi viðnám sunnan í Hrafntinnuskeri.

Viðnám á 900 m y.s. (mynd 5) sýnir greinilega lágviðnámskápu á svæðinu við og suður af Hrafntinnuskeri. Einnig sér í lágviðnámskápu undir Stórahver, nokkru norðar og það sér í lágviðnámskápu undir austurhluta Torfajökuls.

Viðnám á 800 m y.s. (mynd 6) sýnir samfellt lágviðnám í vestari hluta öskjunnar og nær að suðurjaðri öskjunnar, teygir sig norður fyrir Stórahver og norð-vestur fyrir Reykjadal. Einnig sést vel í háviðnámskjarnann. Á þessu korti sést stækandi lágviðnámssvæði undir Torfajökli en þessi tvö lágviðnámssvæði eru greinilega aðskilin. Skilin eru mjög skörp og eru aðeins austan við Reykjafjöll, og hér virðast þau liggja N-S.

Viðnám á 700 m y.s. (mynd 7) sýnir stækandi tvö lágviðnámssvæði, en þó aðskilin. Vestara svæðið teygir sig vestur fyrir Reykjadal út fyrir mörk öskjunnar í norð-vestur. Svæðið við Torfajökul teygir sig nú lengra í norð-vestur. Enn eru greinileg skil á milli svæðanna. Á þessu korti er enn hátt viðnám í norð-austurhluta öskjunnar. Hér sést einnig hátt viðnám N-A við Laufafell, sem er eins og fleygur inn í vestara lágviðnámssvæðið.

Viðnám á 600 m y.s. (mynd 8) sýnir fleiri mælingar utan öskjunnar. Lágviðnámssvæðin tvö stækka en skilin eru enn á milli þeirra. Háviðnámið er til staðar í norð-austurhluta öskjunnar svo og háviðnámsfleygurinn við Laufafell. Skýrari mörk eru hér á lágviðnámssvæðinu undir Torfajökli.

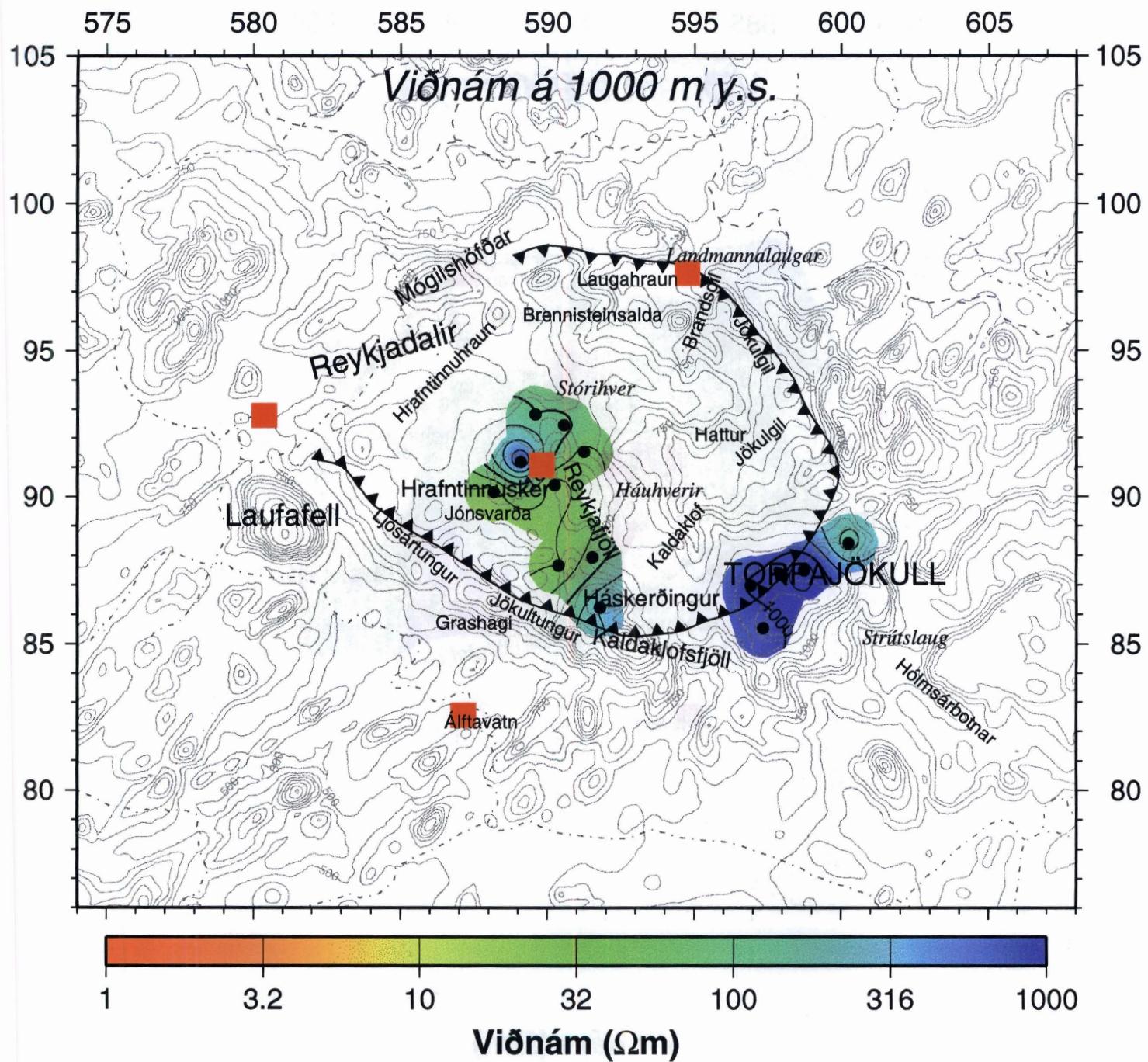
Viðnám á 500 m y.s. (mynd 9) sýnir allt mælisvæðið þar sem allar mælingar eru hærra í landi en 500 m y.s. Hér sjást fyrst niðurstöður mælinga við Landmannalaugar og þar er lágviðnám, sem tengist vestara lágviðnámssvæðinu. Við Háskerðing, syðst í öskjunni, virðast lágviðnámssvæðin við það að tengjast. Þó er eins og haft á milli þeirra. Háviðnámið í austurhluta öskjunnar er nú eins og stór fleygur inn í miðja öskju. Á aðra

vegu ná lágviðnámssvæðin vel út fyrir öskjuna. Háviðnámið við Laufafell er enn til staðar.

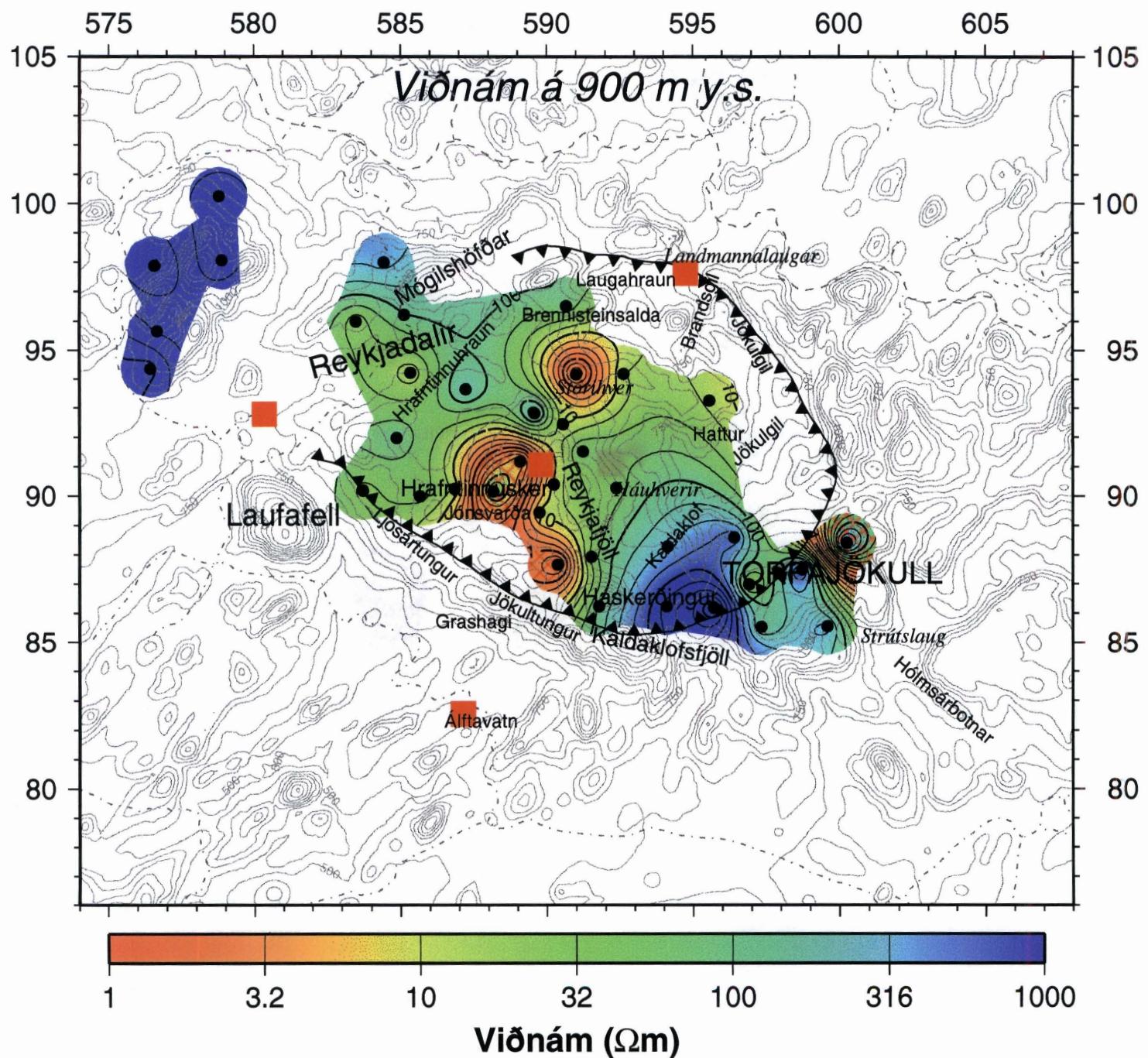
Viðnám á 400 m y.s. (mynd 10) sýnir að meginlágviðnámssvæðið stækkar til suðurs, allt suður undir Álftavatn. Lágviðnámið við Landmannalaugar teygir sig lengra í austur og suðaustur. Háviðnámsflekkirnir eru á sínum stað.

Viðnám á 300 m y.s. (mynd 11) sýnir helst þá breytingu að lágviðnámssvæðið undir Torfajökli stækkar til norðurs. Norður- vestur og suðurjaðrarnir virðast vera orðnir vel ákvarðaðir.

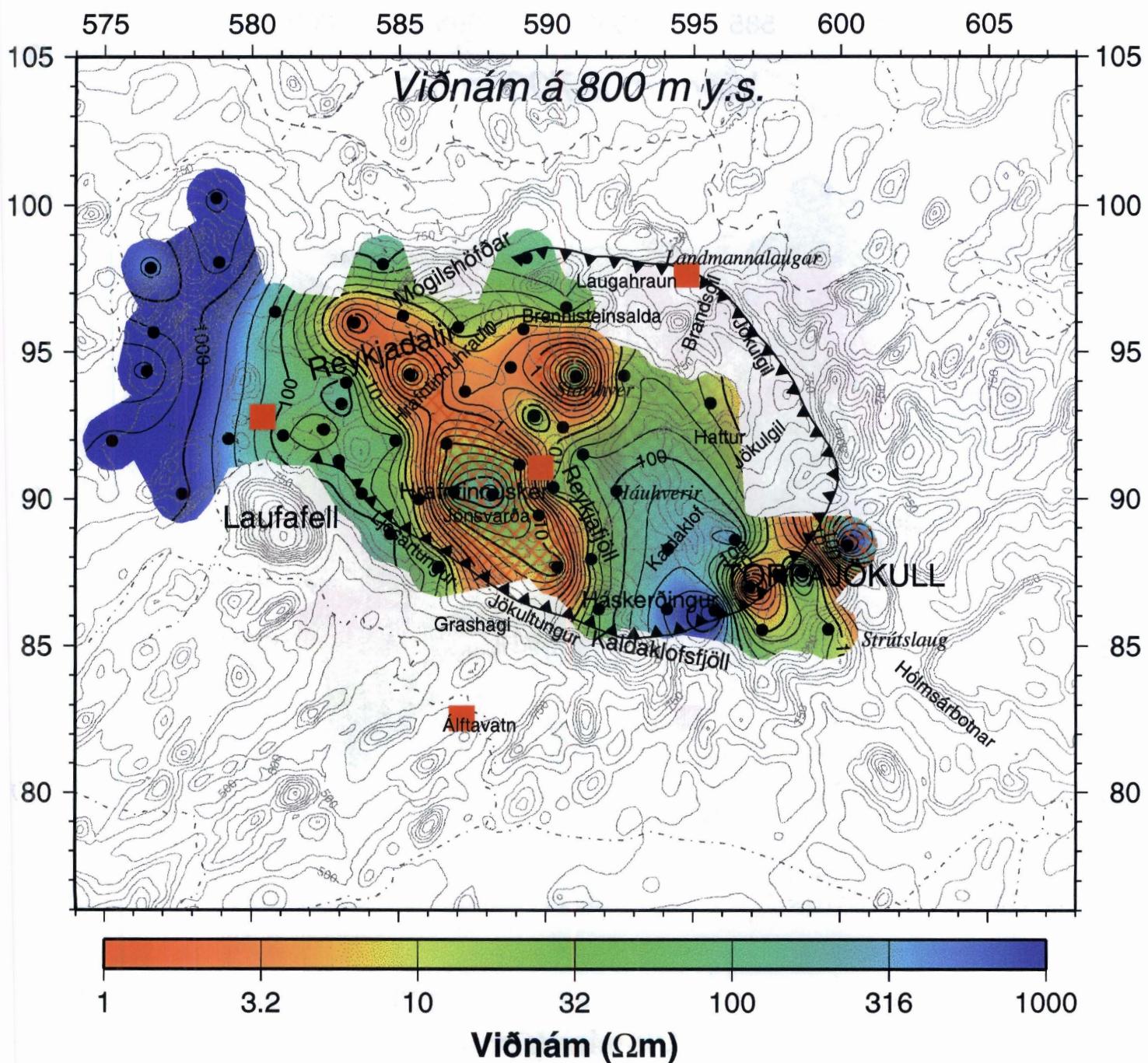
Viðnám á 200 m y.s. (mynd 12) og **Viðnám á 100 m y.s.** (mynd 13) sýna í raun litlar breytingar, en skýrari línur. Lágviðnámssvæðið og háviðnámskjarninn undir Torfajökli er aðskilinn frá hinu svæðinu. Að hluta til er það vegna háviðnámssvæðisins sem fleygast inn frá austri inn í miðja öskjuna og einnig er haft á milli við Háskerðing að sunnanverðu. Vestara lágviðnámssvæðið með samfelldum háviðnámskjarna undir, nær yfir allan vestur og norðurhluta öskjunnar og vel út fyrir hana. Þó er gat við öskjujaðarinn norðaustan við Laufafell.



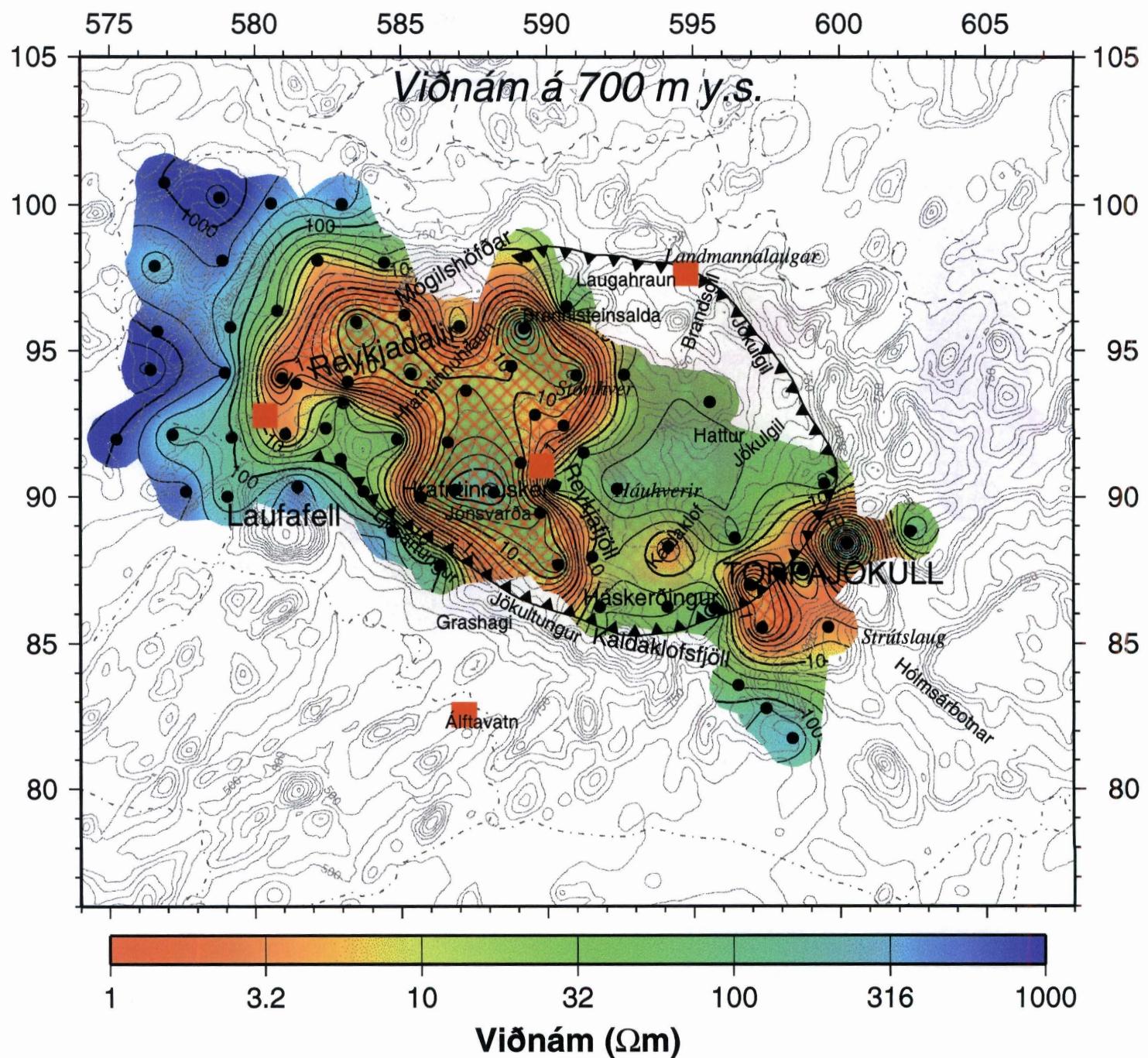
Mynd 4. Viðnám á 1000 m y.s.



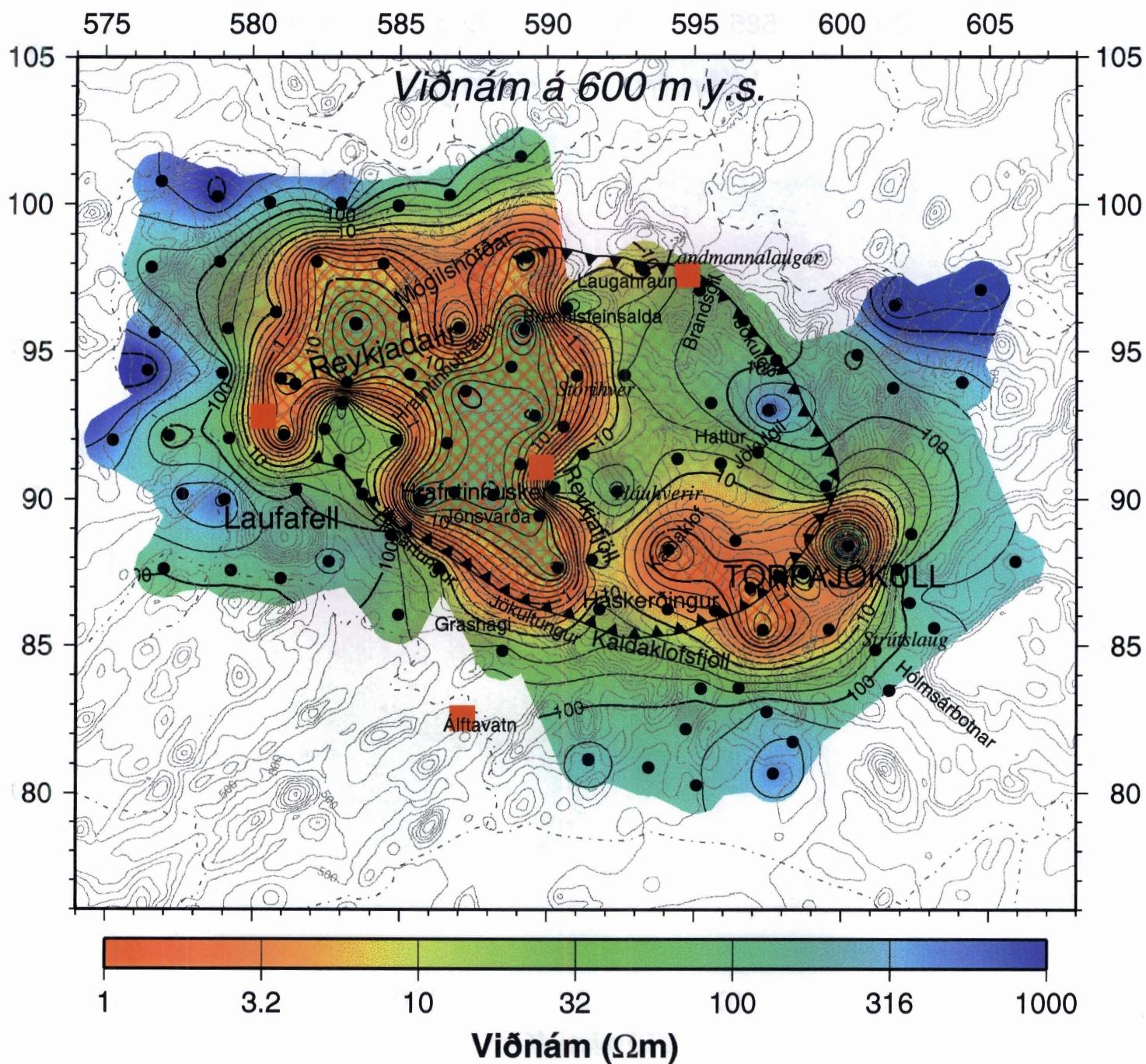
Mynd 5. Viðnám á 900 m y.s.



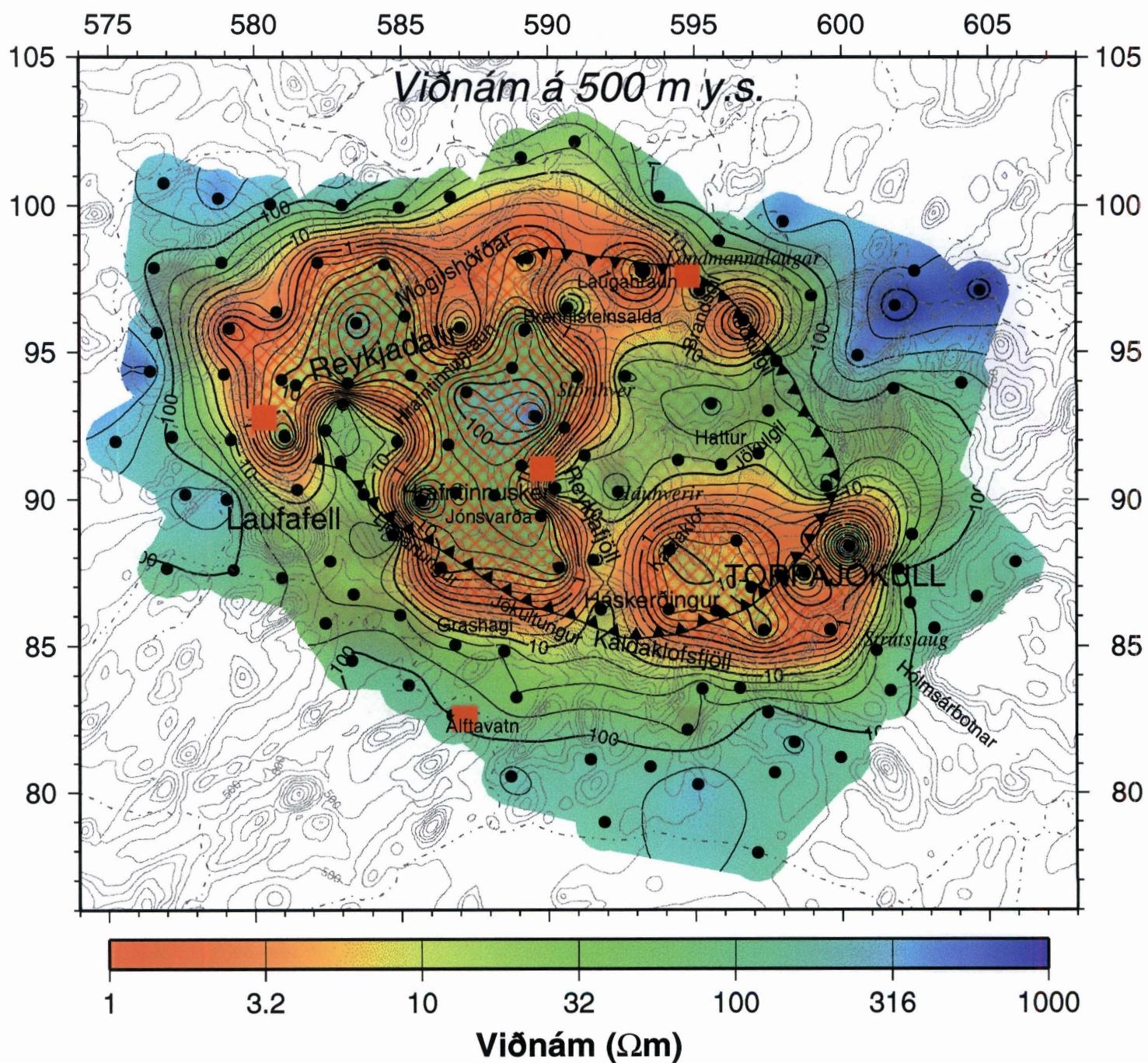
Mynd 6. Viðnám á 800 m y.s.



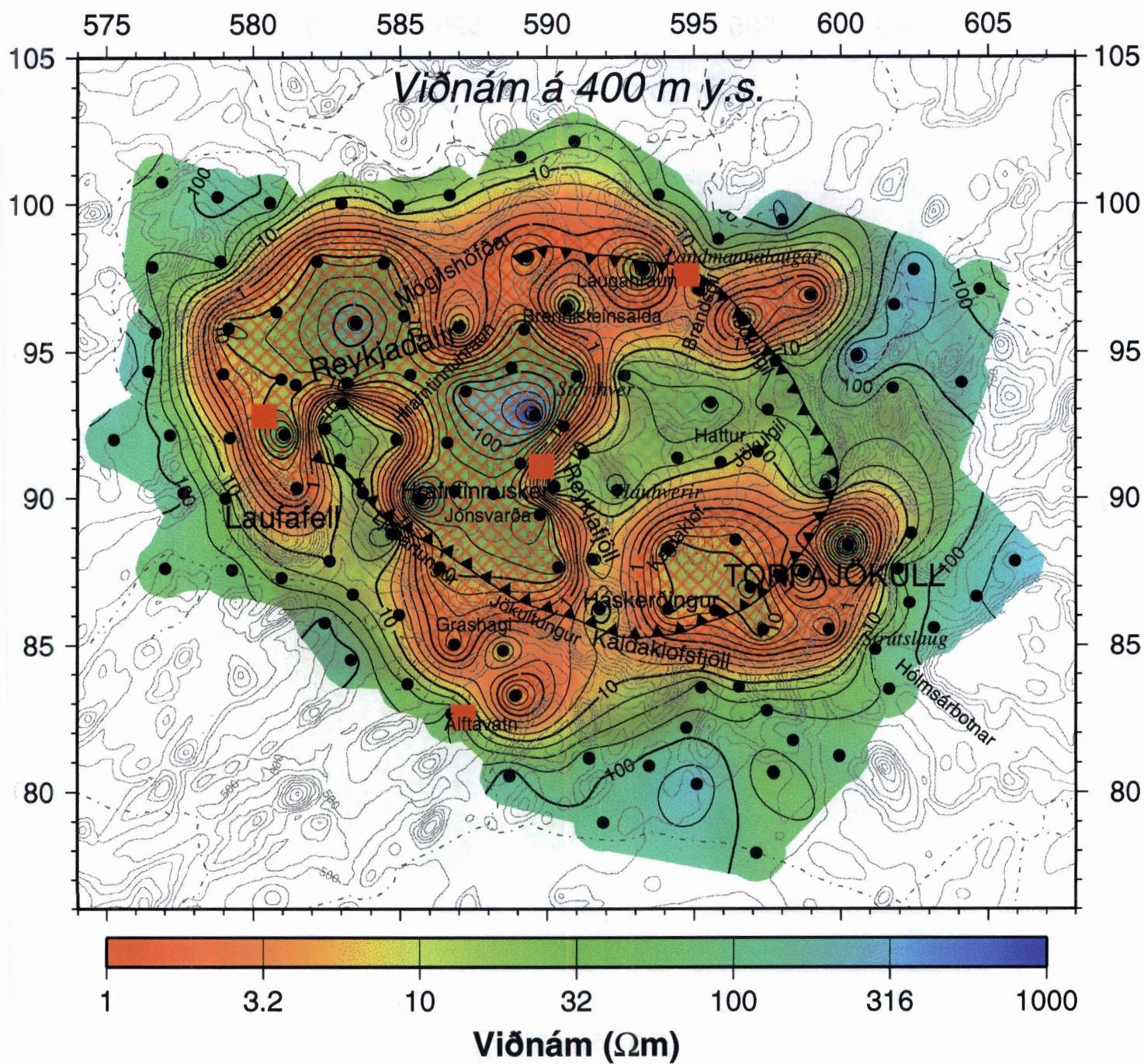
Mynd 7. Viðnám á 700 m y.s.



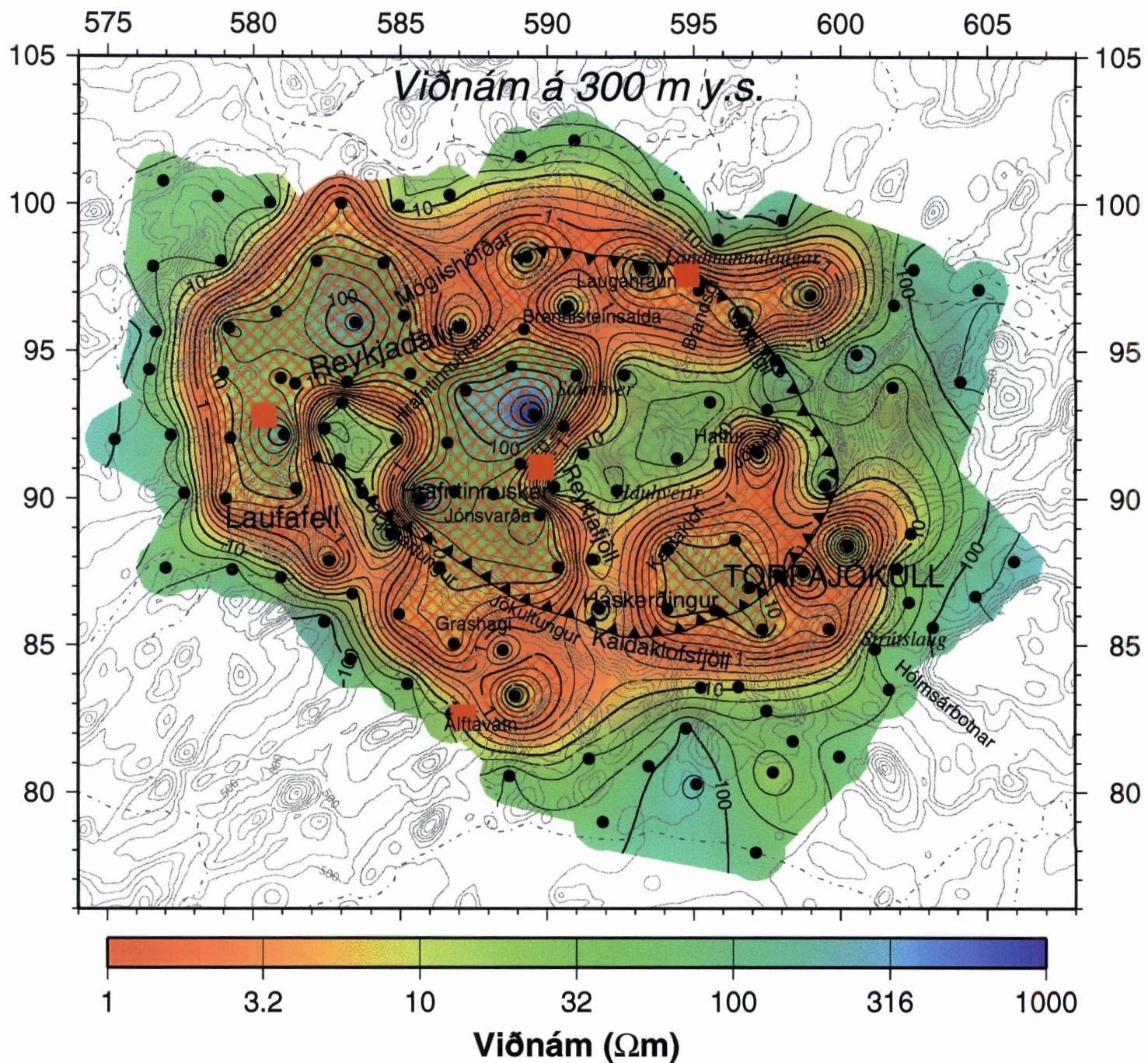
Mynd 8. Viðnám á 600 m y.s.



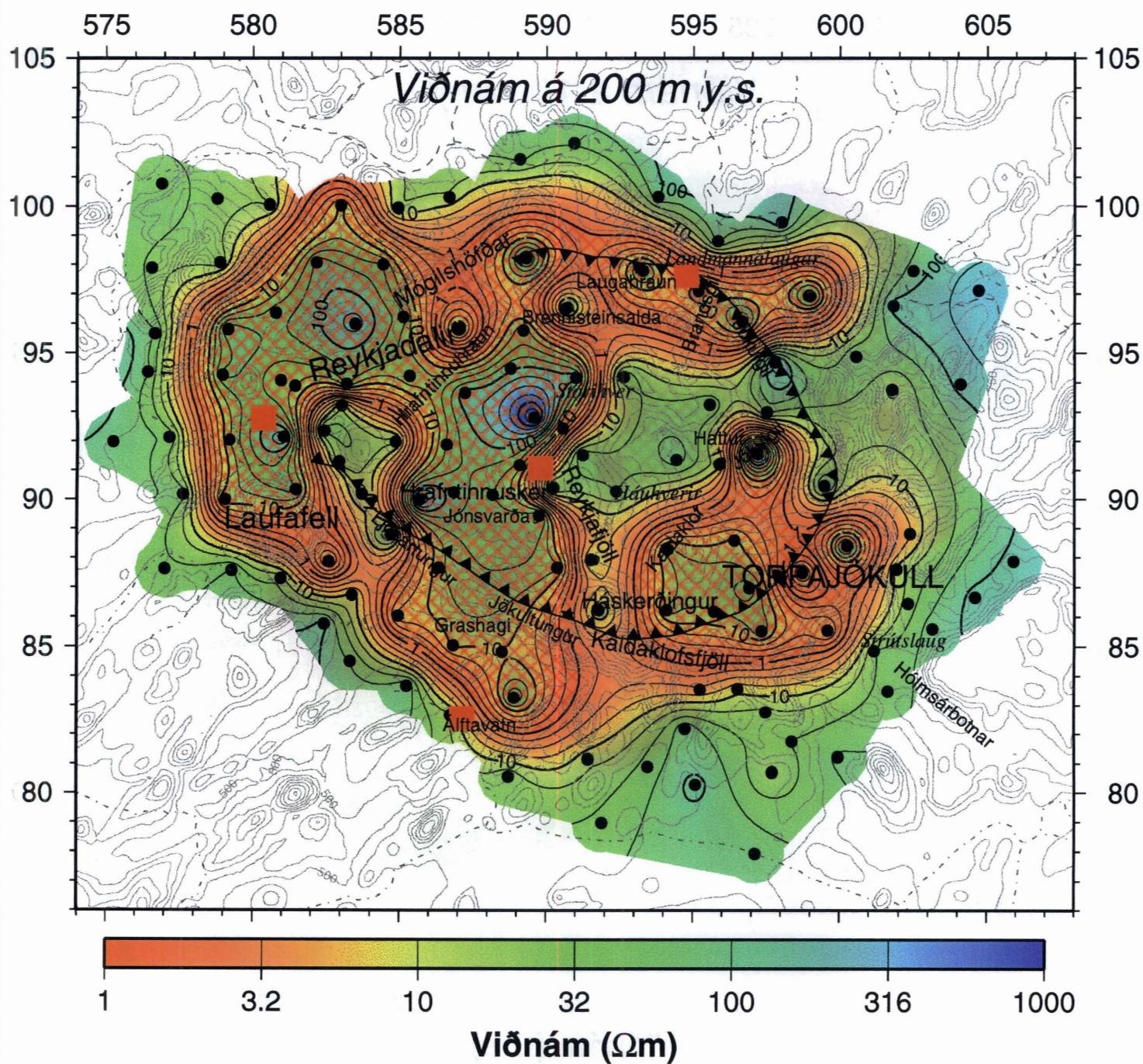
Mynd 9. Viðnám á 500 m y.s.



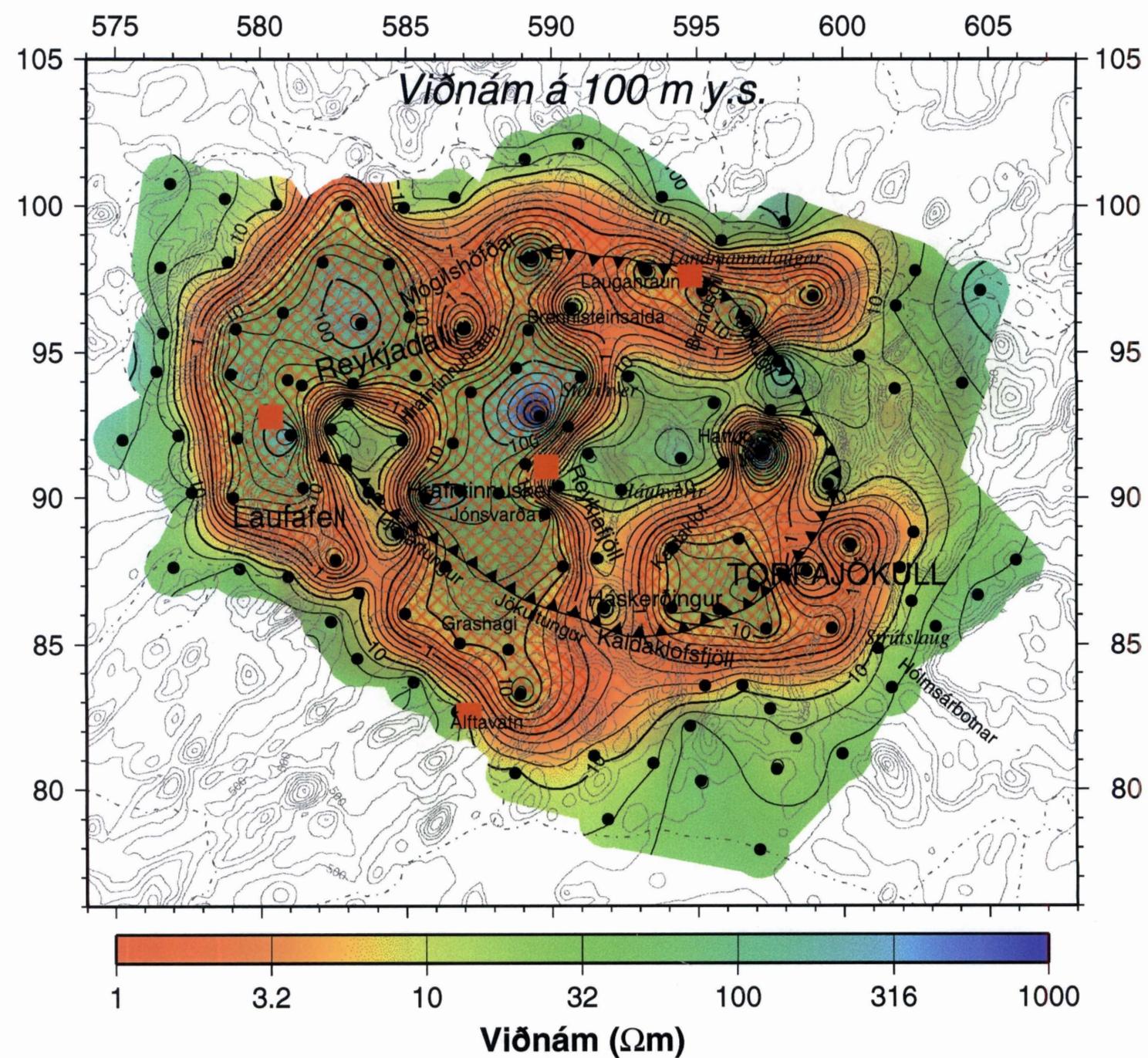
Mynd 10. Viðnám á 400 m y.s.



Mynd 11. Viðnám á 300 m y.s.



Mynd 12. Viðnám á 200 m y.s.



Mynd 13. Viðnám á 100 m y.s.

5.2 Viðnámssnið

Sett eru fram ellefu A-V viðnámssnið svo og sautján N-S snið. Sniðin eru auðkennd með stefnunni og tveimur síðustu stöfunum í viðkomandi A-V eða N-S hnitum UTM kerfisins, sem gefin eru upp á teikningunum. Mælingarnar í sniðunum sýna þá túlkun sem gerir ráð fyrir mörgum lögum eða "samfelldri" breytingu í viðnámi með dýpi. Efra borð sniðsins markast af landslagi, en sumum mælingum er varpað inn á sniðið og geta því verið í annarri hæð en yfirborð sniðsins. Sniðin sýna viðnám niður á 200 metra dýpi undir sjávarmáli. Sniðin (A-V) fylgja hnitunum og eru samsíða, sömuleiðis eru N-S sniðin hornrétt á þau. Yfirleitt eru tveir kílómetrar á milli sniðanna, en stundum einn, þegar fjöldi mælinga gefur tilefni til. Lega sniðanna er sýnd á myndum 14 og 15 og A-V sniðin á myndum 16-26 og N-S sniðin á myndum 27-43. Hér á eftir verður farið í gegnum helstu drætti í sniðunum.

Syðsta A-V sniðið (**AV81**) liggur sunnan við Álftavatn og um Hvanngil. Vestasta mælingin er í Hvanngili. Yfirborðið er í tæplega 600 metra hæð. Í þremur vestustu mælingunum glyttir í lágviðnámskápu á 500-600 metra dýpi. Snið **AV82** liggur um Álftavatn, einum kílómetra norðar. Um miðvik sniðsins, sem liggur rétt norðan við Hvanngil og um Kaldaklof, er lágviðnámskápan við sjávarmál eða á 500-600 metra dýpi. Snið **AV84** liggur rétt sunnan við hálandisbrúnina og þar sker sniðið lágviðnámskápuna á 300 m y.s. í mælingu 952835, sem er innst í Kaldaklofi.

Snið **AV86** sker hálandisbrúnina og Torfajökul sunnanverðan þar sem land er komið í 900-1100 metra hæð. Vestast í sniðinu er lágviðnámskápan á 200 m u.s. en hvelfist síðan upp í 300-400 m y.s. á næstu 5-6 kílómetrum til austurs. Í mælingu 917861 sem er á Kaldaklofsjökli sunnan við Háskerðing eru engin merki um eiginlega lágviðnámskápu, þ.e. með viðnám undir 10 Ωm. Í mælingu um 2 km austar og í mælingunum á Torfajökli er 100-200 m þykk lágviðnámskápa sem nær allt upp í 800 m y.s. Þegar komið er austur fyrir Torfajökul dýpkar á lágviðnámskápuna, eða hún tengist lágviðnámslagi með 13-16 Ωm viðnámi á 200 m u.s. Slíkt lágviðnámslag liggur oft utan á lágviðnámskápuni í útjaðri háhitakerfa.

Snið **AV88** er um 30 km að lengd. Vestan við Háskerðing er lágviðnámskápan upp undir yfirborði í 850-1000 m y.s. Það dýpkar á hana til vesturs og vestast í sniðinu er hún á 0-200 m u.s. og þar liggur utan á lágviðnámslag. Norðan við Háskerðing er mæling, T9288, sem ekki sýnir merki um lágviðnámskápu. Austan Háskerðings gerast hlutirnir flóknari. Láviðnámskápa á 500-600 m y.s er undir vestanverðum Torfajökli en austar sést smá lágviðnámskán upp undir yfirborði og svo lágviðnámskápan á 200-0 m y.s. Einnig er sérkennilegt hversu hátt viðnám er ofarlega í tveimur mælingum (987875, 004884) sem eru nærrí öskjubrúninni.

Í sniði **AV90** er lágviðnámskápan rofin á tveimur stöðum. Mæling T9290 sýnir ekki merki um lágviðnám, en þessi mæling er norður af Háskerðingi og er beint norður af "háviðnáminu" í sniðunum á undan. Vestar í sniðinu, í mælingu T8490 sem er við öskjubrúnina norð austan við Laufafell, vantar einnig lágviðnámskápu. Lágviðnámið í 964905 sem er í 100-400 h.y.s. tengist þykku lágviðnámskápuni undir vesturhluta

Torfajökuls, og virðist eins og er þarna að dýpka á lágviðnámskápuna til norðurs frá Torfajökli.

Í sniði AV92 sést að lágviðnámskápa er skorin af "háviðnámssvæðinu" við Laufafell. Beggja vegna þessa svæðis er lágviðnámskápan í um 800 m y.s.; það dýpkar á hana til vesturs, en austan við hækkar hún aðeins undir Hrafntinnuskeri (T8991). Autan við dýpkar mjög mjög á lágviðnámskápuna og er hún rofin frá lágviðnáminu, sem er í tengslum við Torfajökul og sést í austast í sniðinu.

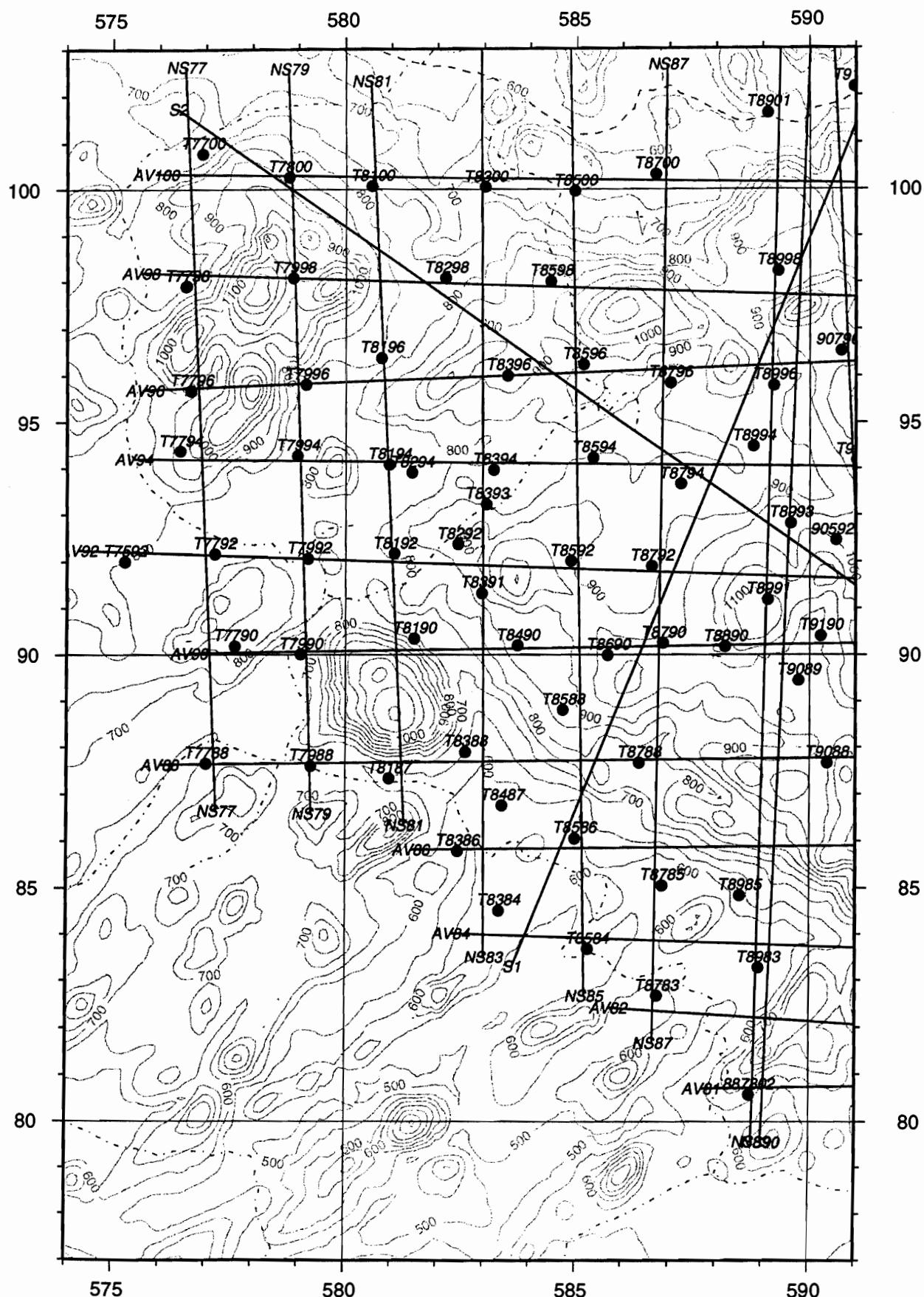
Í sniði AV94 sést lágviðnámskápa á vestursvæðinu, upp undir yfirborði en einnig sést önnur lágviðnámskápa, slitrótt, neðar í sniðinu. Háviðnámsskilin austan til eru nú orðin breiðari en í sniðunum á undan. Ekki sést lengur í lágviðnám sem hægt er að tengja Torfajökli, lágviðnámið austast í sniðinu tengist norðursvæðinu sem kenna má við Landmannalaugar.

Snið AV96 sýnir lágviðnámskápu sem nær hæst upp í 700-900 m y.s. og dýpkar á bæði til vesturs og austurs. Hún er rofin á tveimur stöðum. Annars végar í mælingu 907967 og er það hluti "háviðnámssvæðisins" sem skilur Torfajökul frá hinum svæðunum. Hins végar í einni stakri mælingu, T8796, sem ekki sýnir eiginlega lágviðnámskápu öfugt við allar mælingar umhverfis.

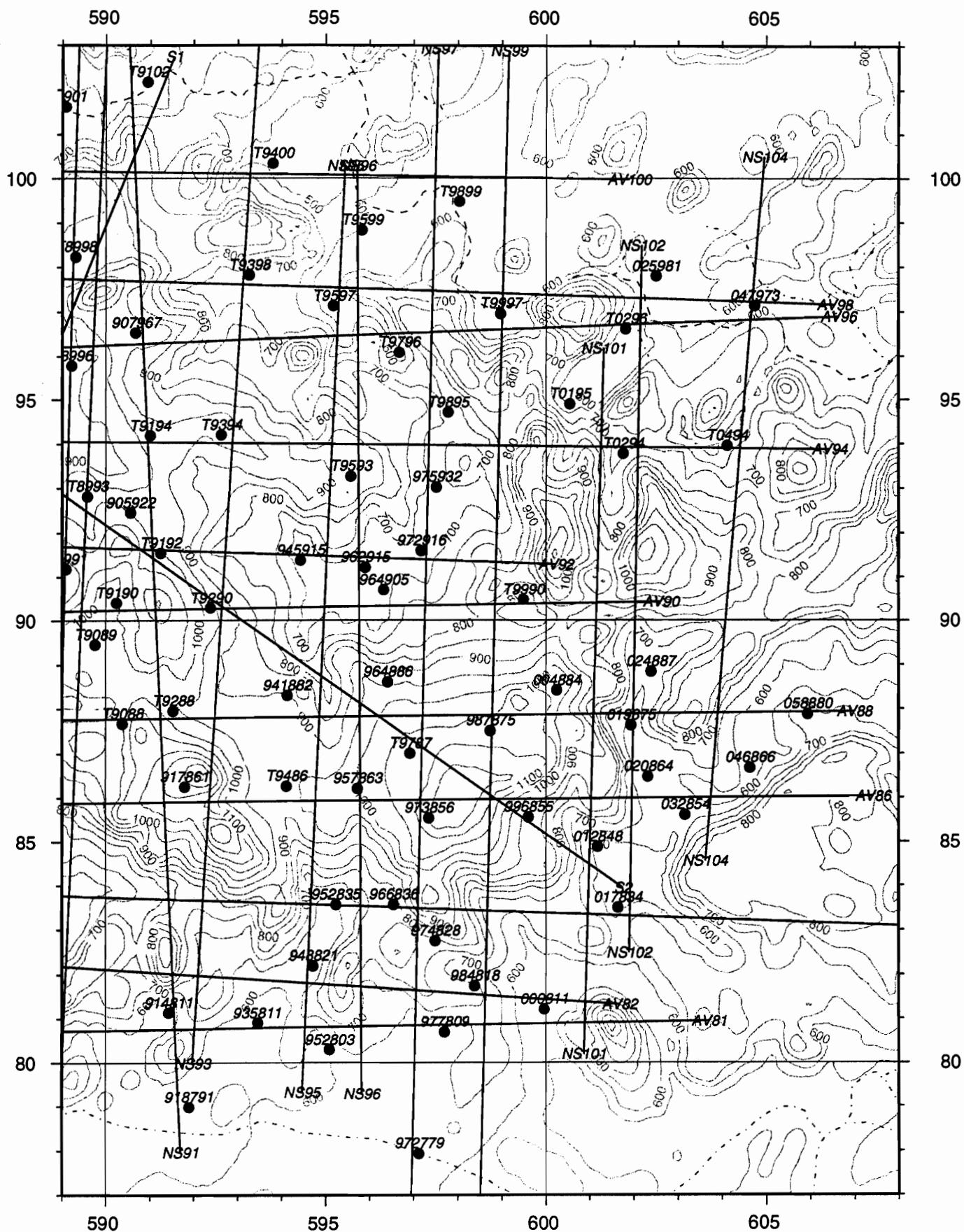
Snið AV98 liggur um Landmannalaugar (T9398), en þar er land í um 600 metra hæð og lágviðnámskápan aðeins á nokkurra tuga metra dýpi undir yfirborði. Austur af dýpkar á hana. Vestan við Landmannalaugar er tvöföld lágviðnámskápa, sem dýpkar á til vesturs undir Rauðfossafjöllum. Í raun getur verið að sniðið skeri lágviðnámskápuna þar sem dýpkar mjög hratt á hana til norðurs þ.e. hún sé ekki tvöföld heldur skeri sniðið kantinn á henni þar sem hún er á niðurleið, en í nyrsta sniðinu AV100 glyttir aðeins í lágviðnámskápu í einni mælingu T8300.

Til nánari skýringar eru sett fram NS snið. Þau liggja samsíða noður-suður, oftast með tveggja km millibili. Á stöku stað er skotið inn sniðið þannig að einn km er á milli þar sem mælipéttleiki gefur tilefni til. Það verður hins végar ekki farið í gegnum hvert snið lið fyrir lið enda er verið að lýsa sömu gögnum og í A-V sniðunum. N-S niðin eru á myndum 27-43.

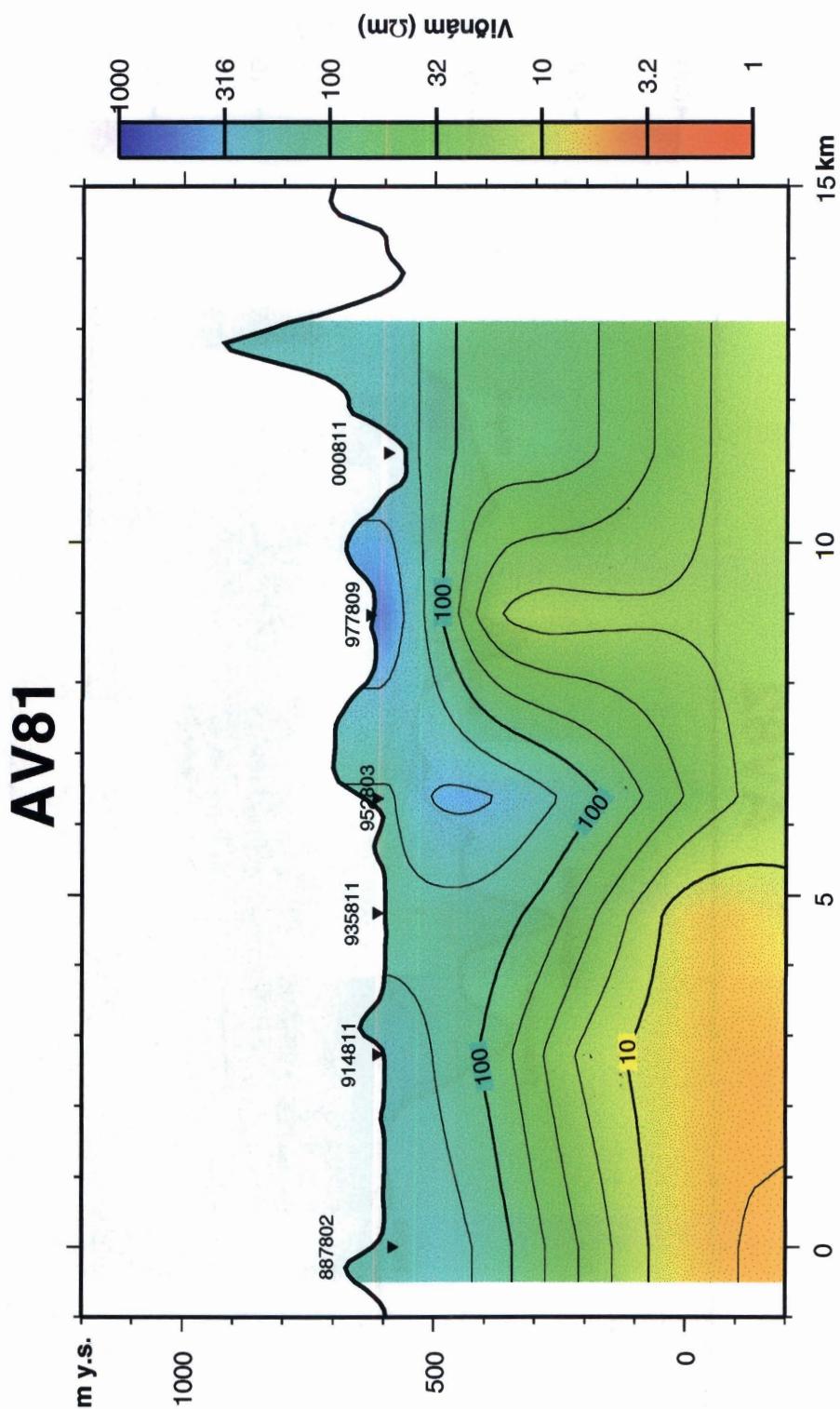
Að lokum eru tekin tvö skásnið, S1 og S2. Snið S1 (mynd 44) liggur SSV-NNA frá Launfit í suðvestri um öskjuna vestan við Hrafntinnusker að Dómadal í norðaustri. Þetta snið liggur um það svæði í vestanverðri öskunni þar sem tvöföld lágviðnámskápa kemur fram. Uppi á hálendinu liggur þunn lágviðnámskápa á 100-200 metra dýpi, en 300-400 metrum neðar sést í aðra lágviðnámskápu. Nauðsynlegt er að bera saman niðurstöður jarðfræðirannsóknanna og jarðeðlisfræðinnar og huga að því hvort tvöföld lágviðnámskápa geti verið háð berggerð á svæðinu. Hitt skásniðið (S2, mynd 45) liggur frá Rauðfossafjöllum í norðvestri að Hólmsárbotnum í suðaustri. Sniðið sker Torfajökul, Söðul og svæðið norðan Hrafntinnuskers svo og Reykjadal. Á sniðinu sjást greinilega skilin sem skera Torfajökulskerfið frá jarðhitakerfinu í mið- og vesturhluta öskjunnar og nær yfir svæðið umhverfis Hrafntinnusker og Reykjadal.



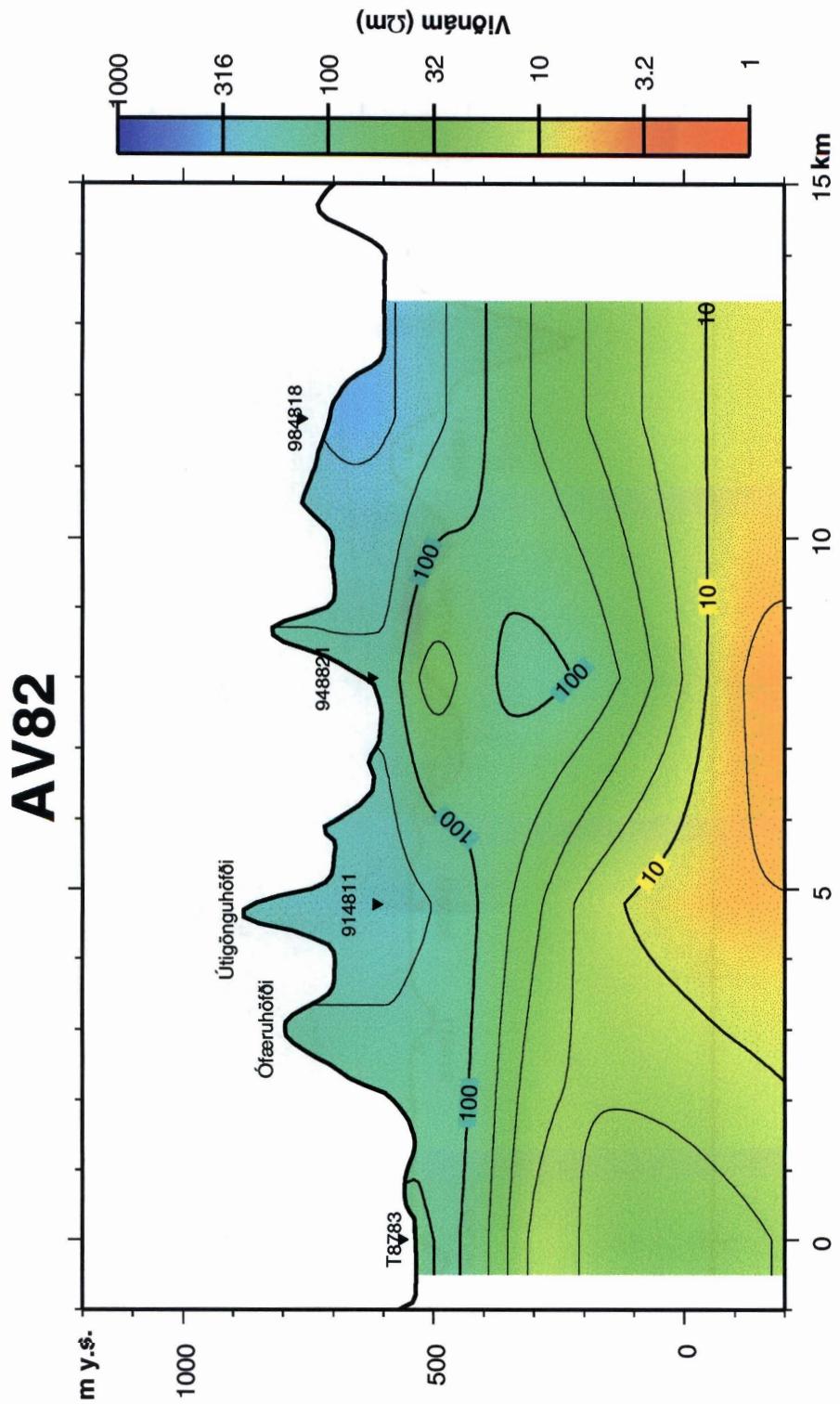
Mynd 14. Lega viðnámssniða - vesturhluti.



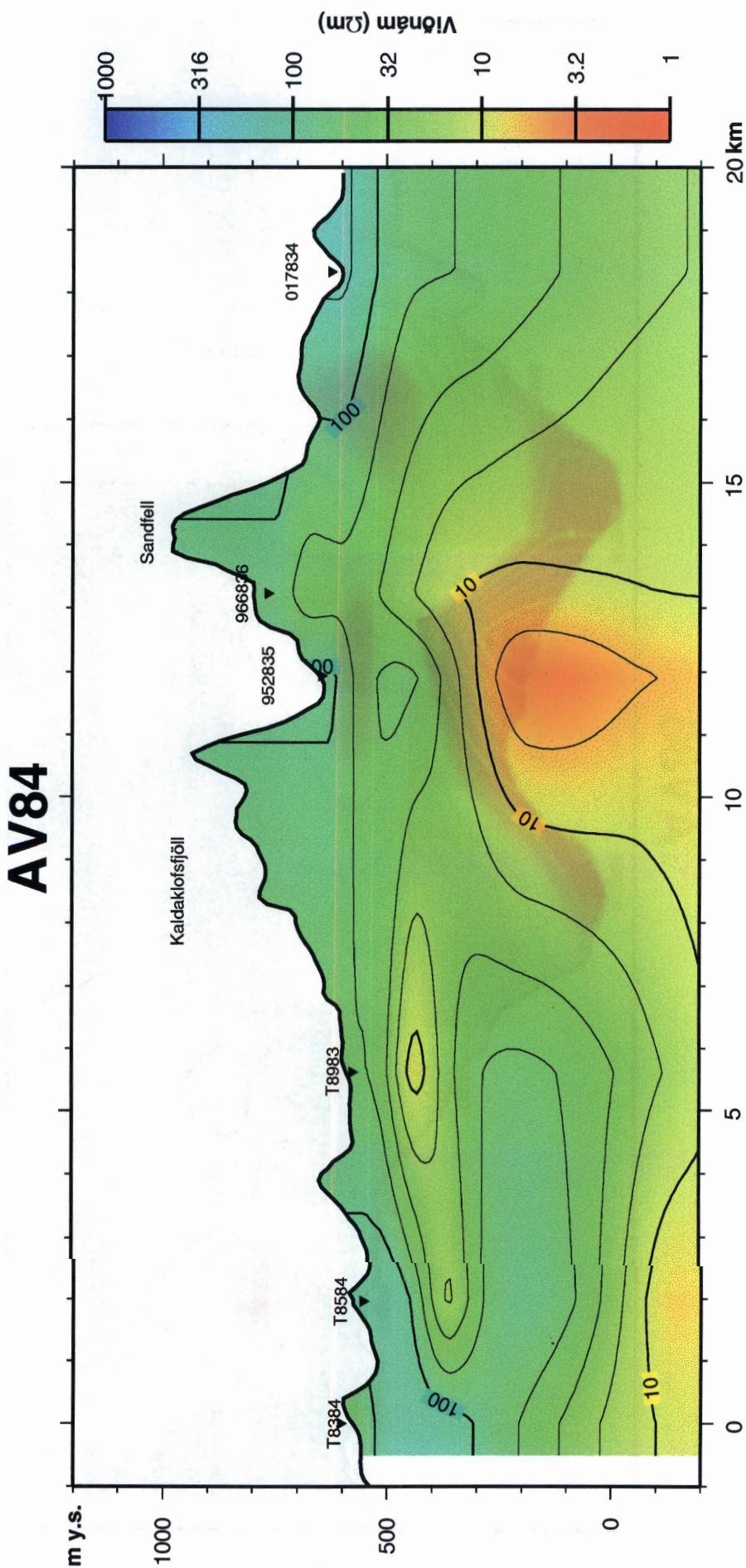
Mynd 15. Lega viðnámssniða - austurhluti.

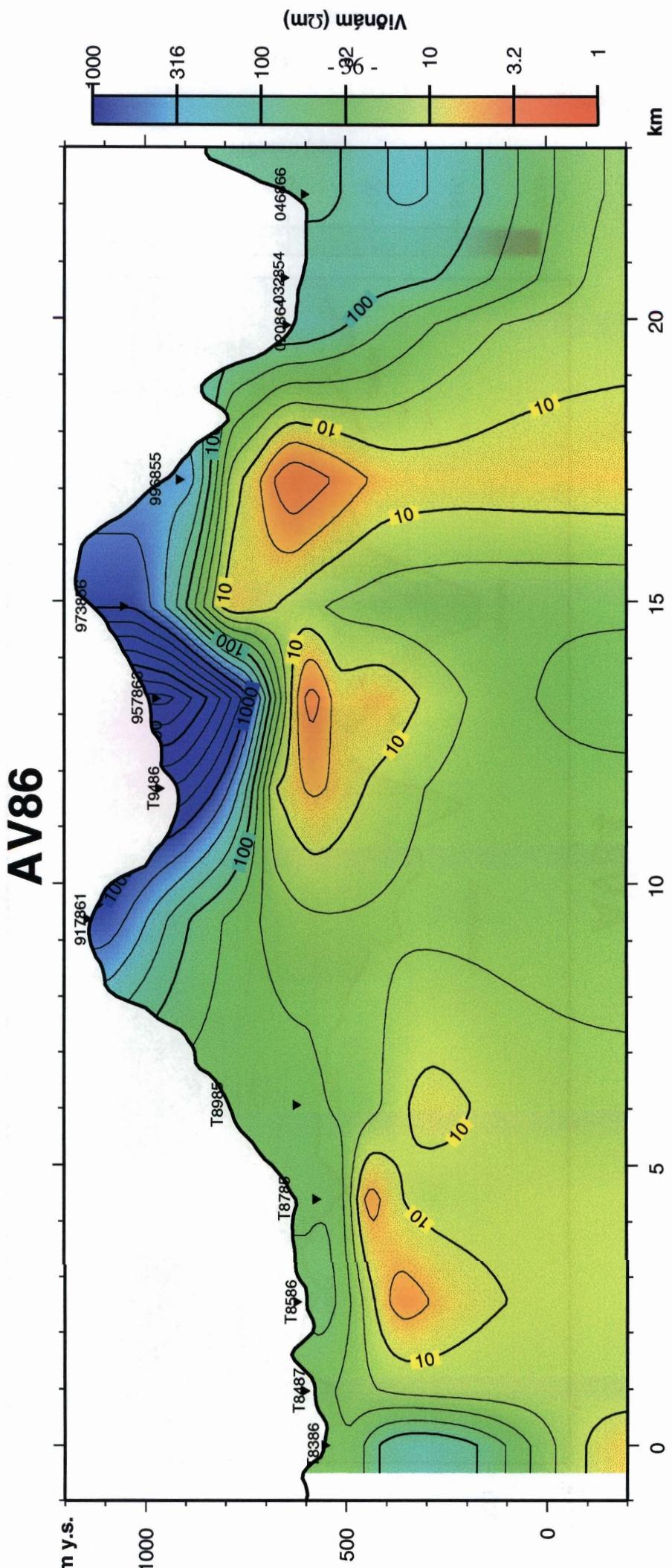


Mynd 16. Viðnámssnið AV81.

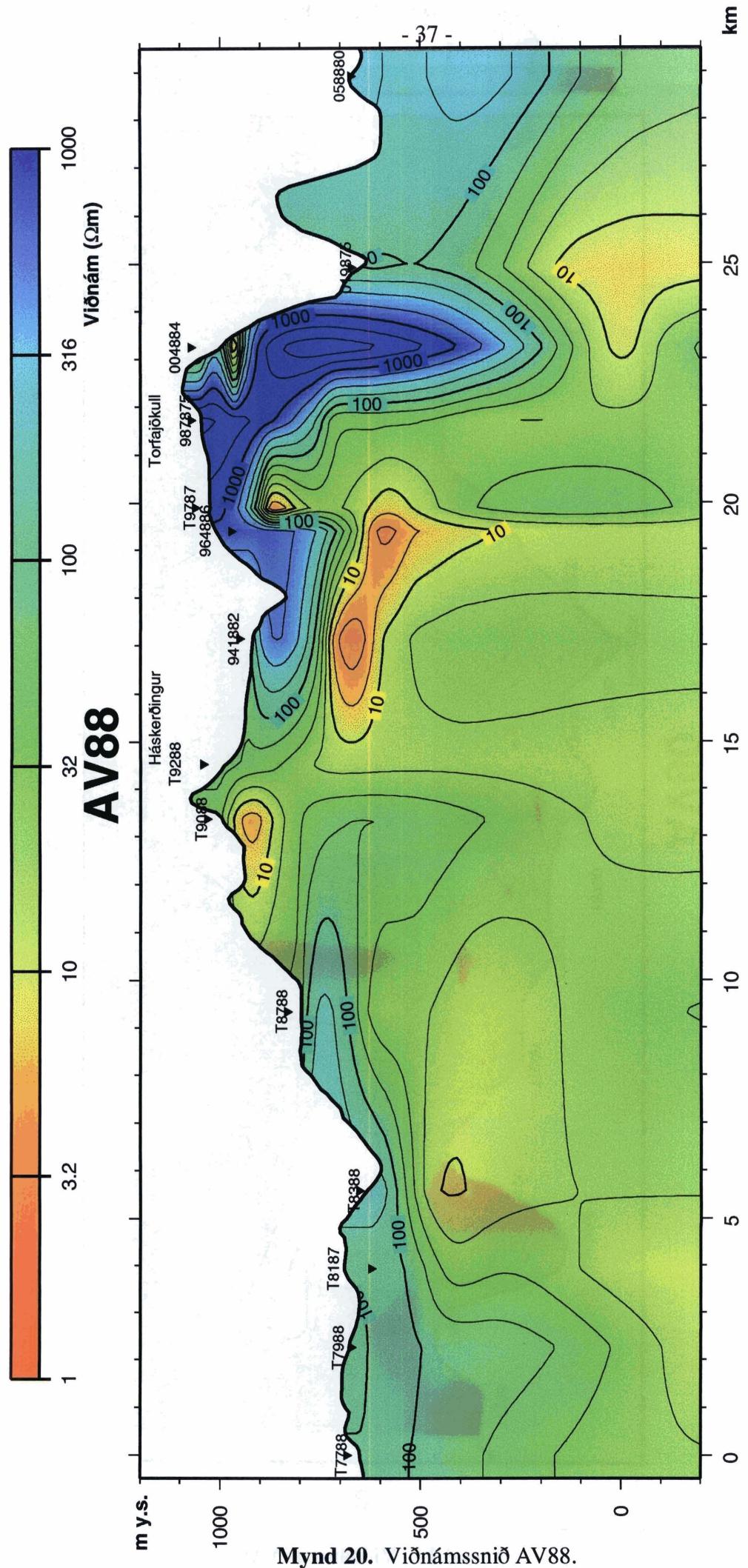


Mynd 17. Viðnámsnið AV82.

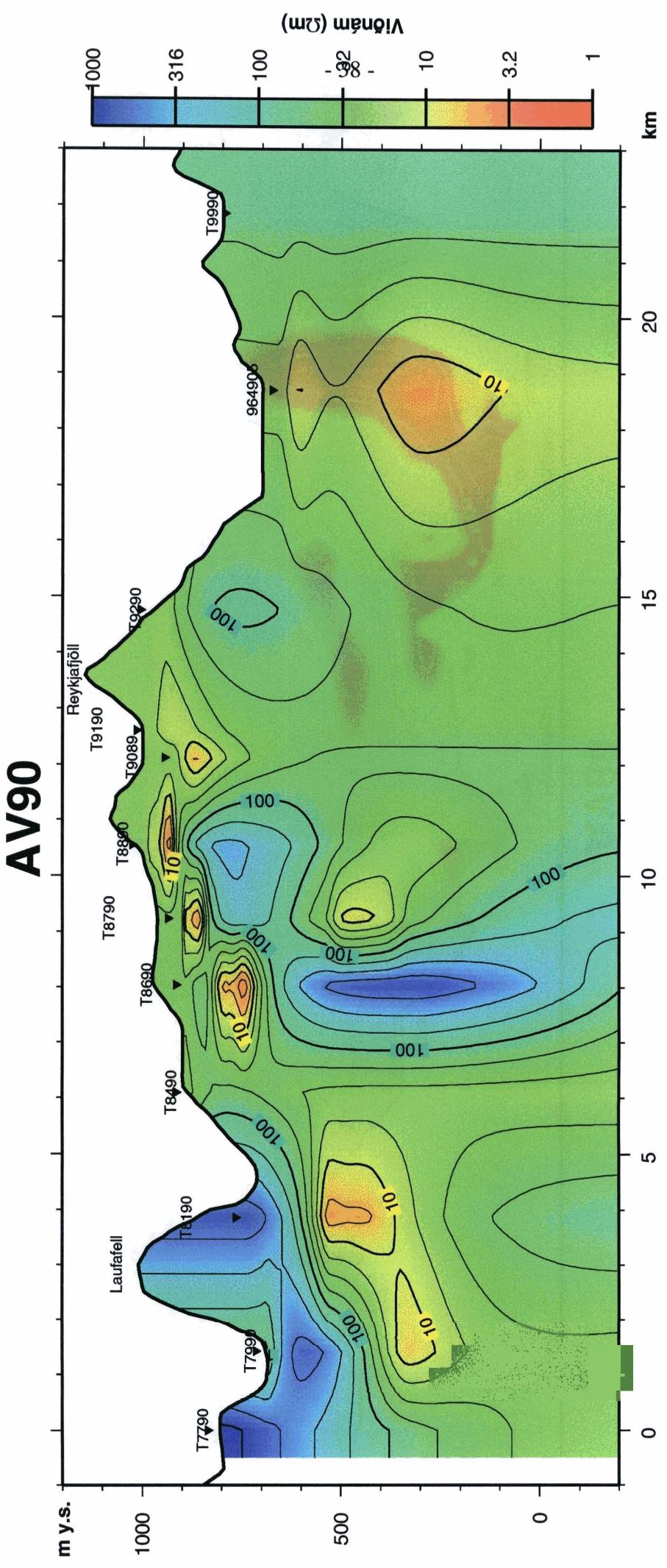




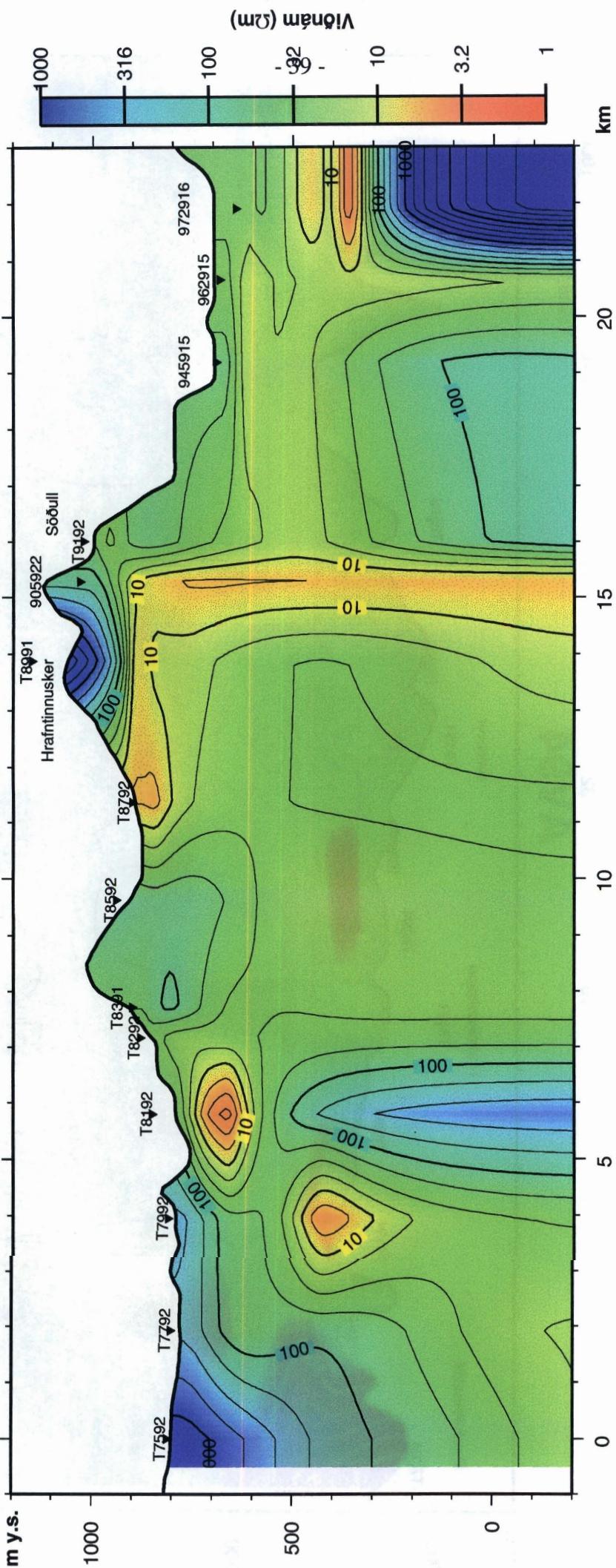
Mynd 19. Viðnámssnið AV86.



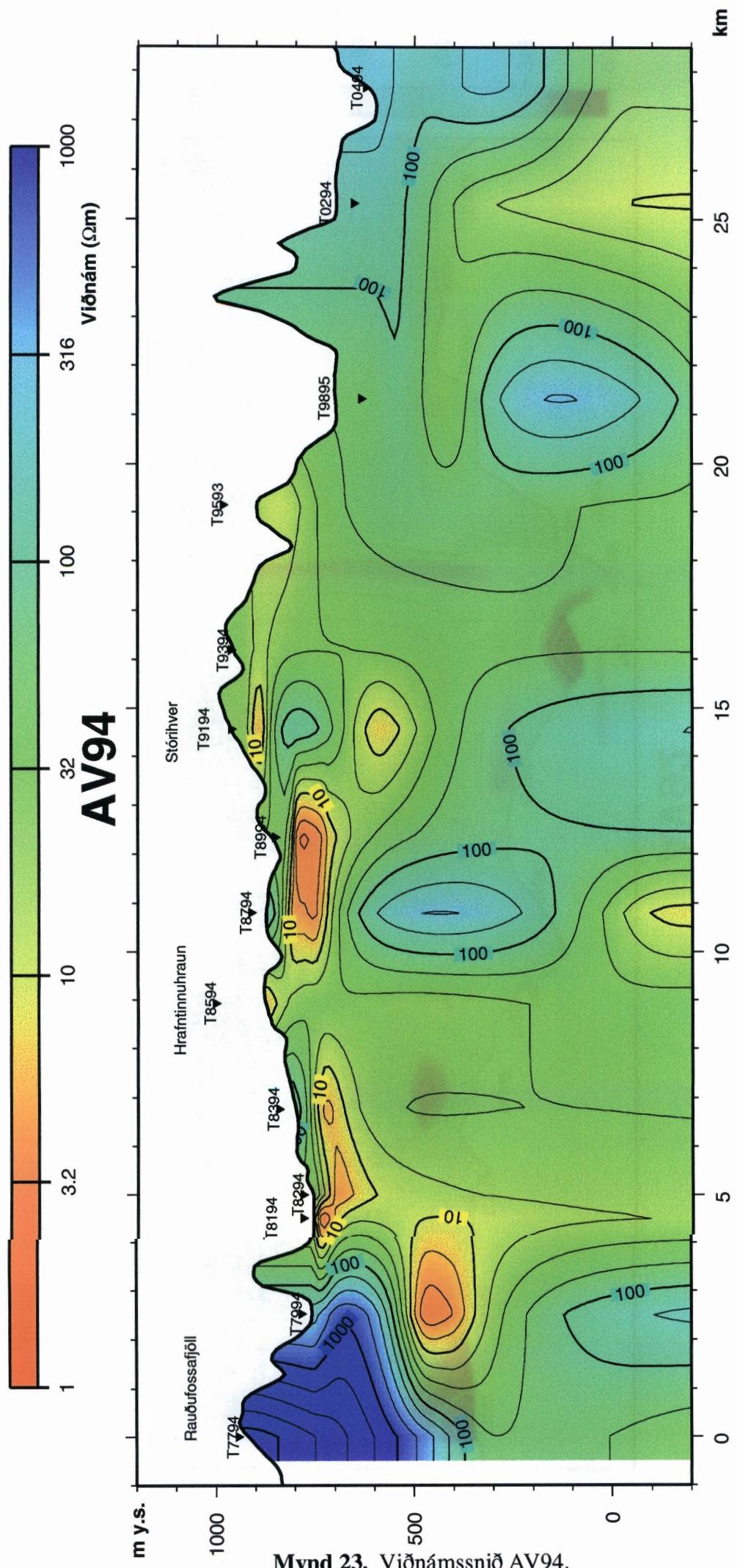
Mynd 20. Viðnámssnið AV88.



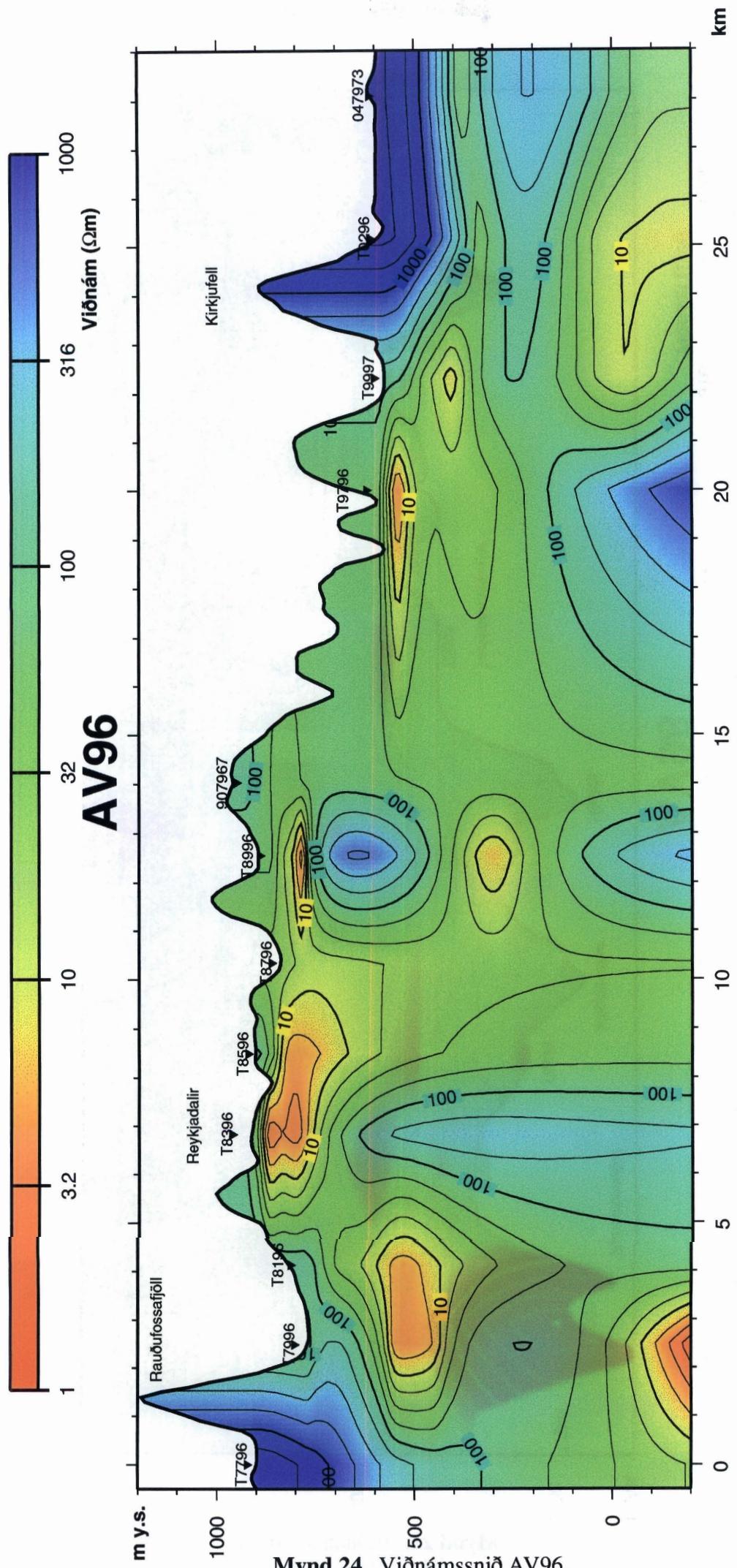
AV92



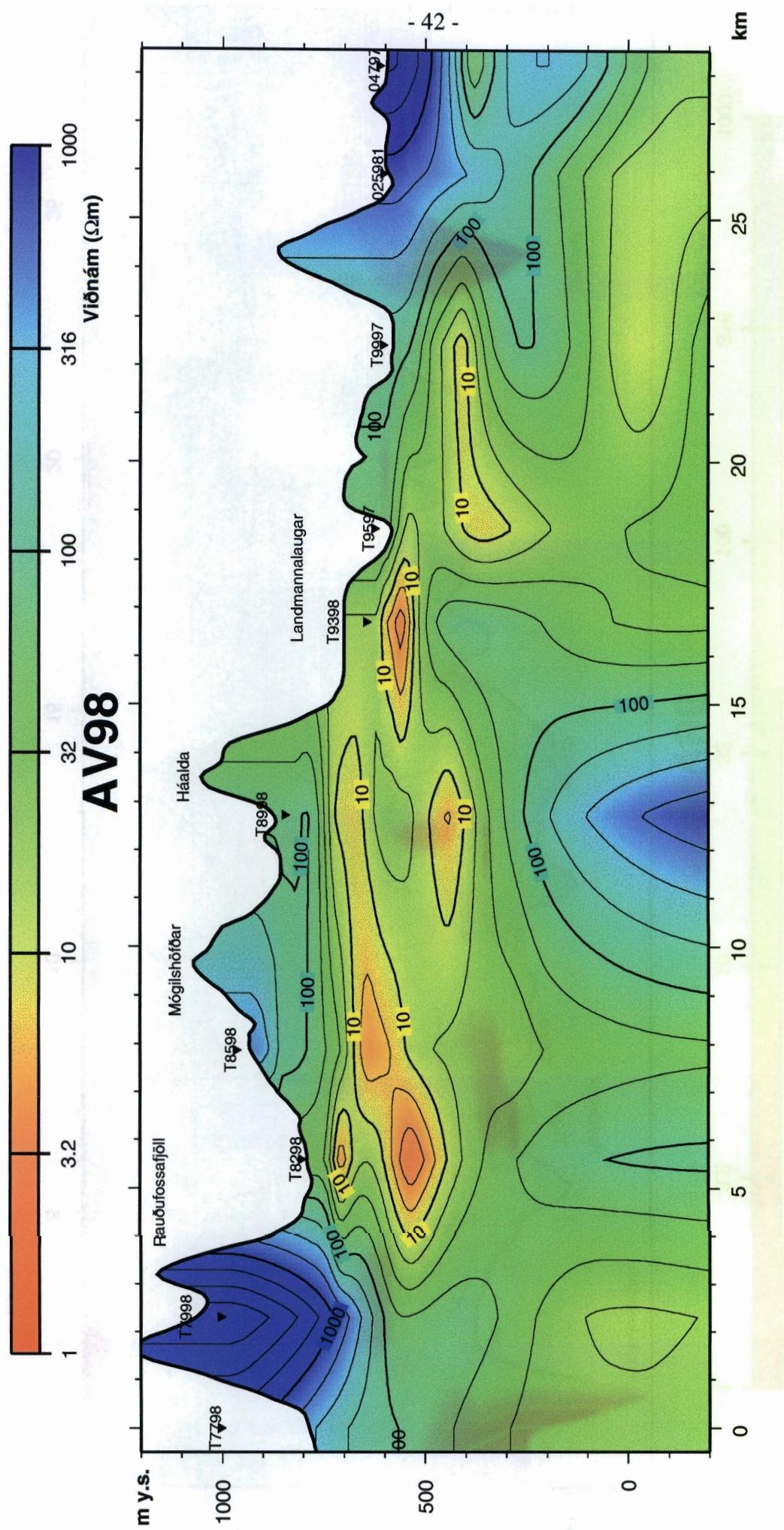
Mynd 22. Viðnámssnið AV92.



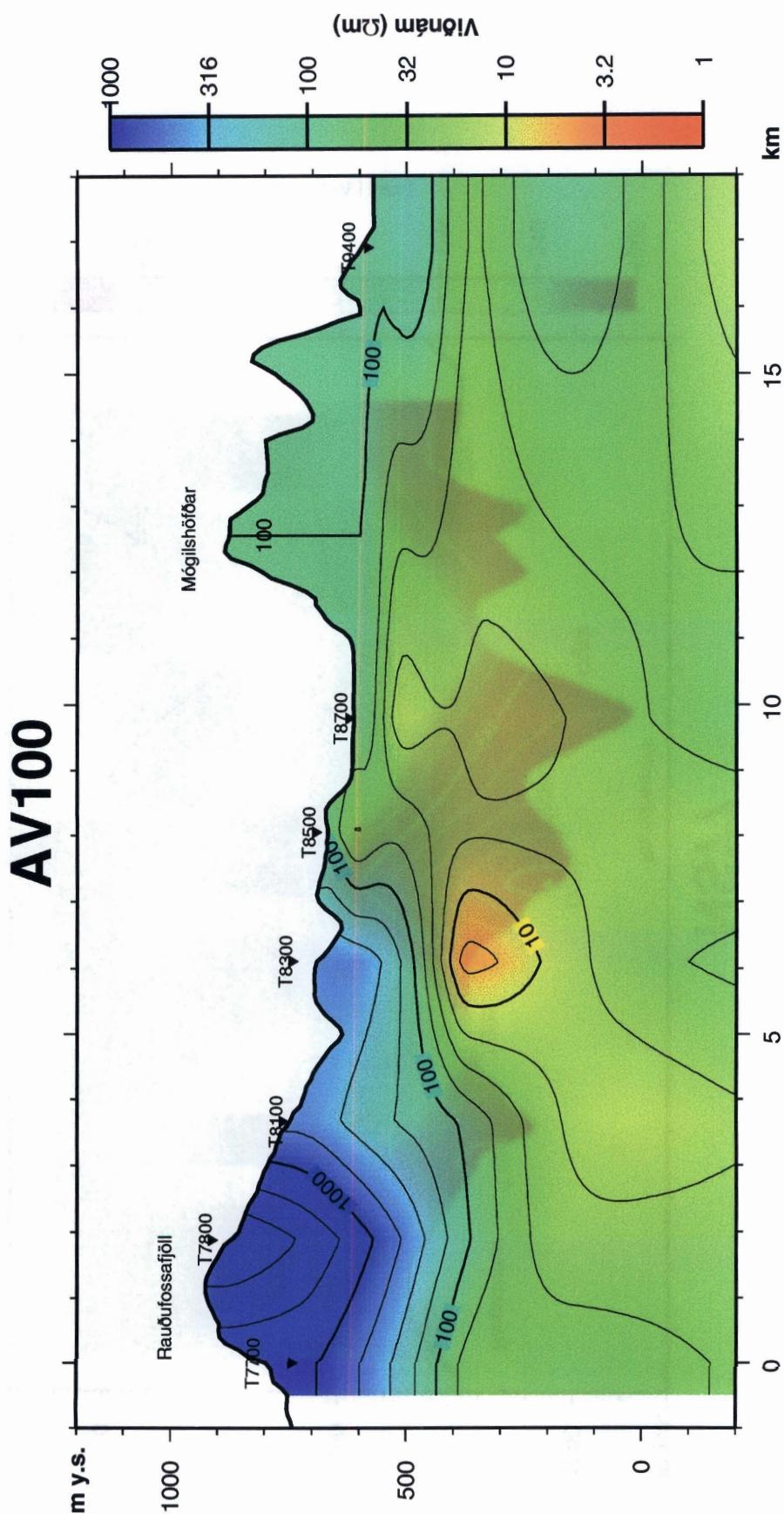
Mynd 23. Viðnámssnið AV94.



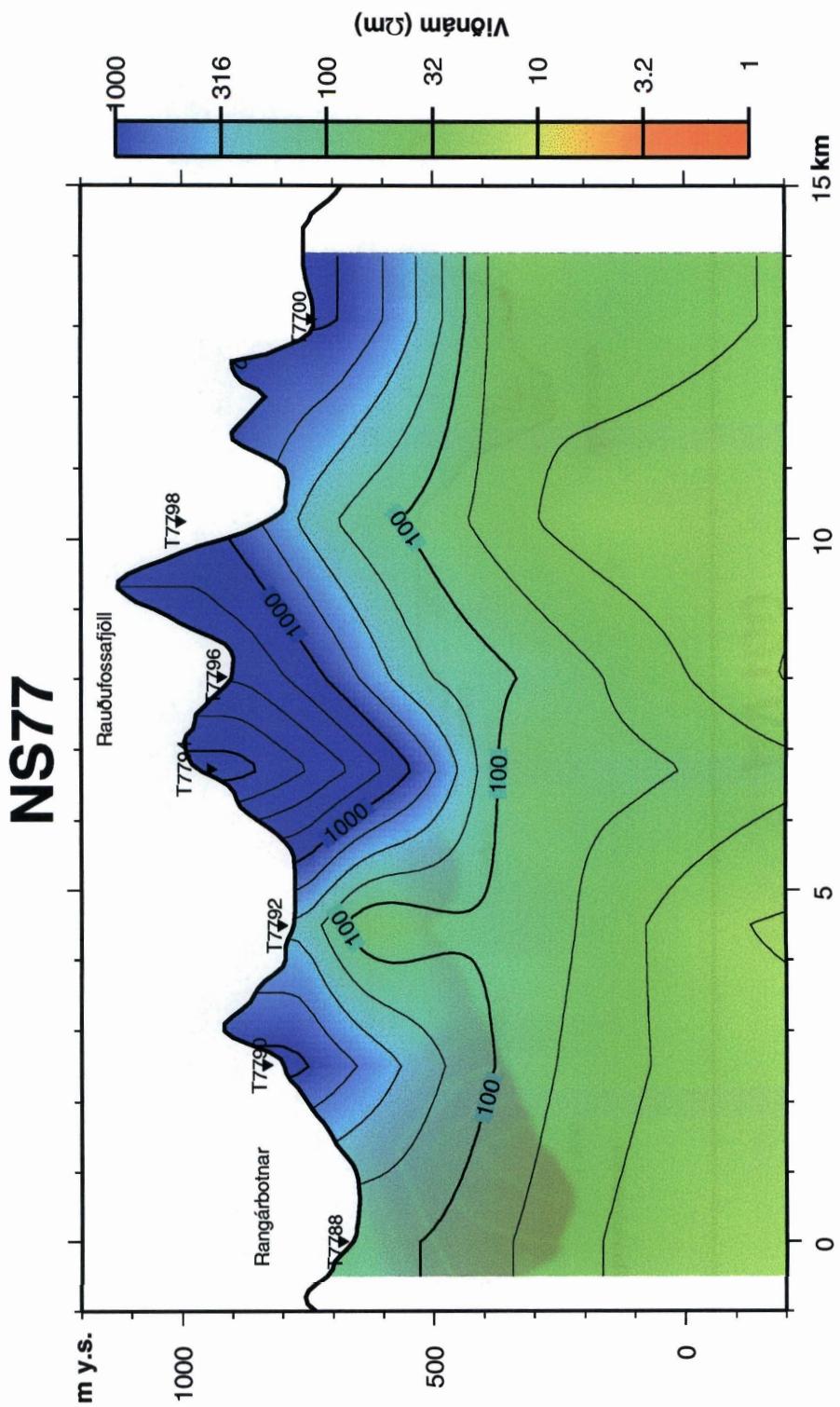
Mynd 24. Viðnámssnið AV96.



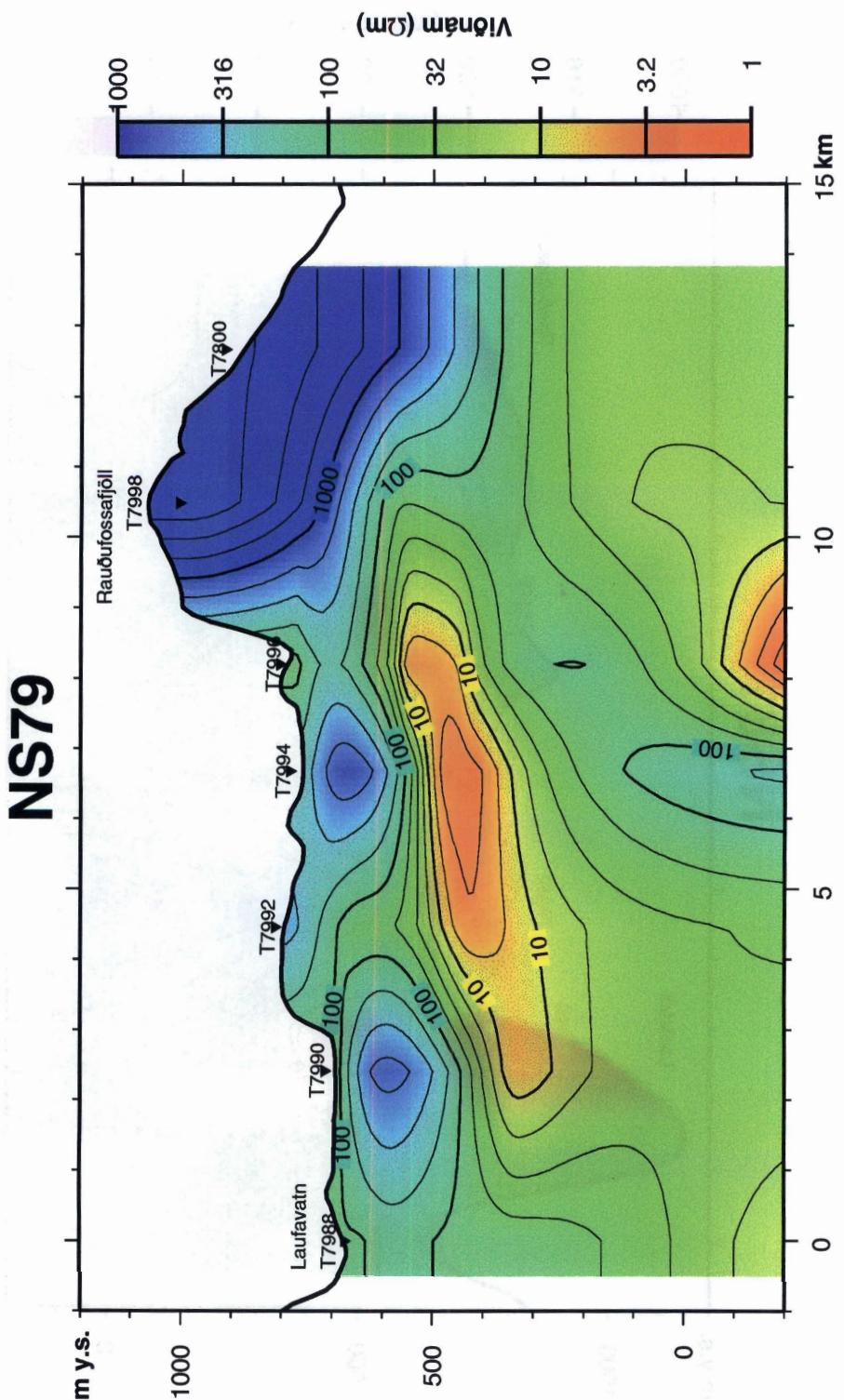
Mynd 25. Viðnámssnið AV98.



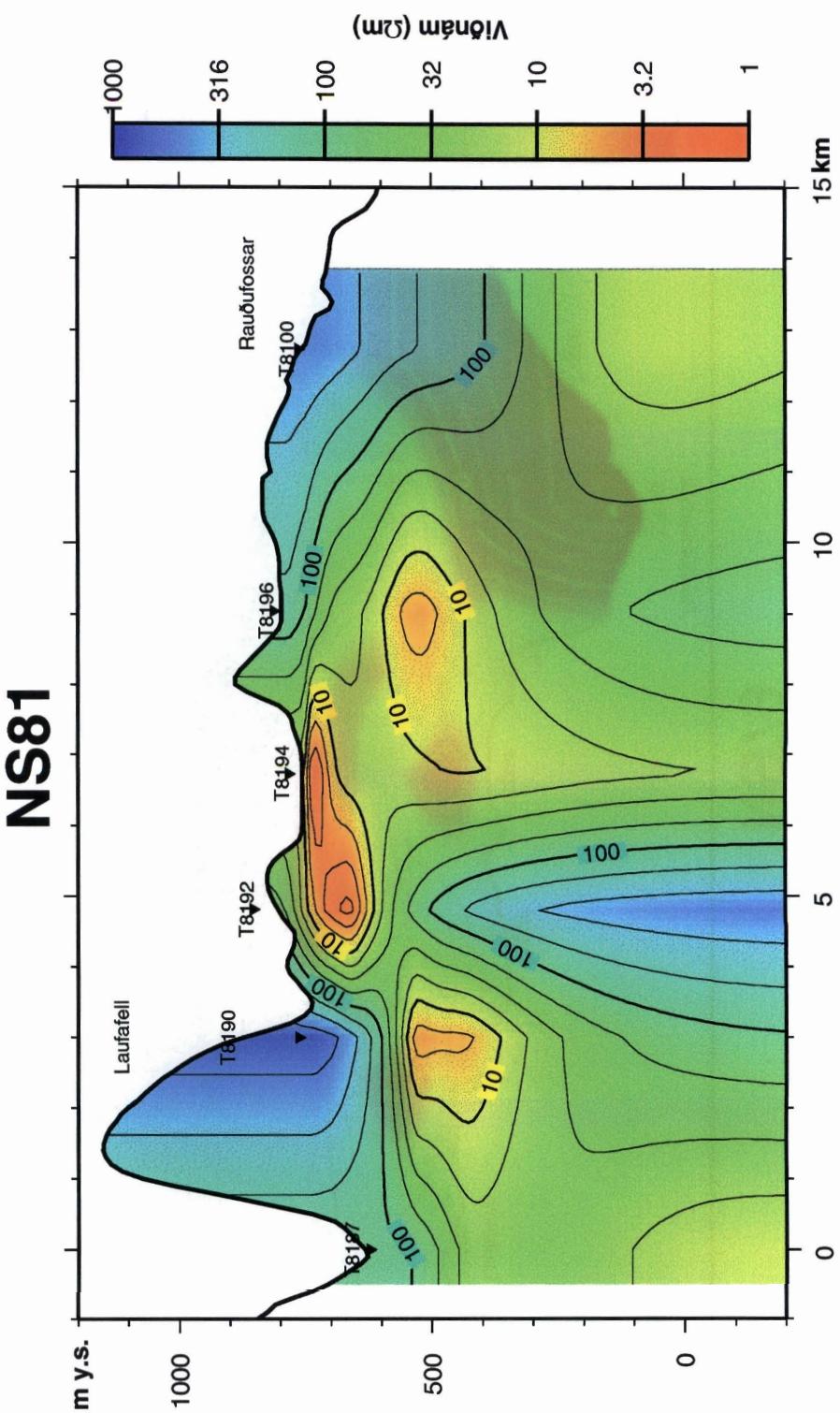
Mynd 26. Viðnámssnið AV100.



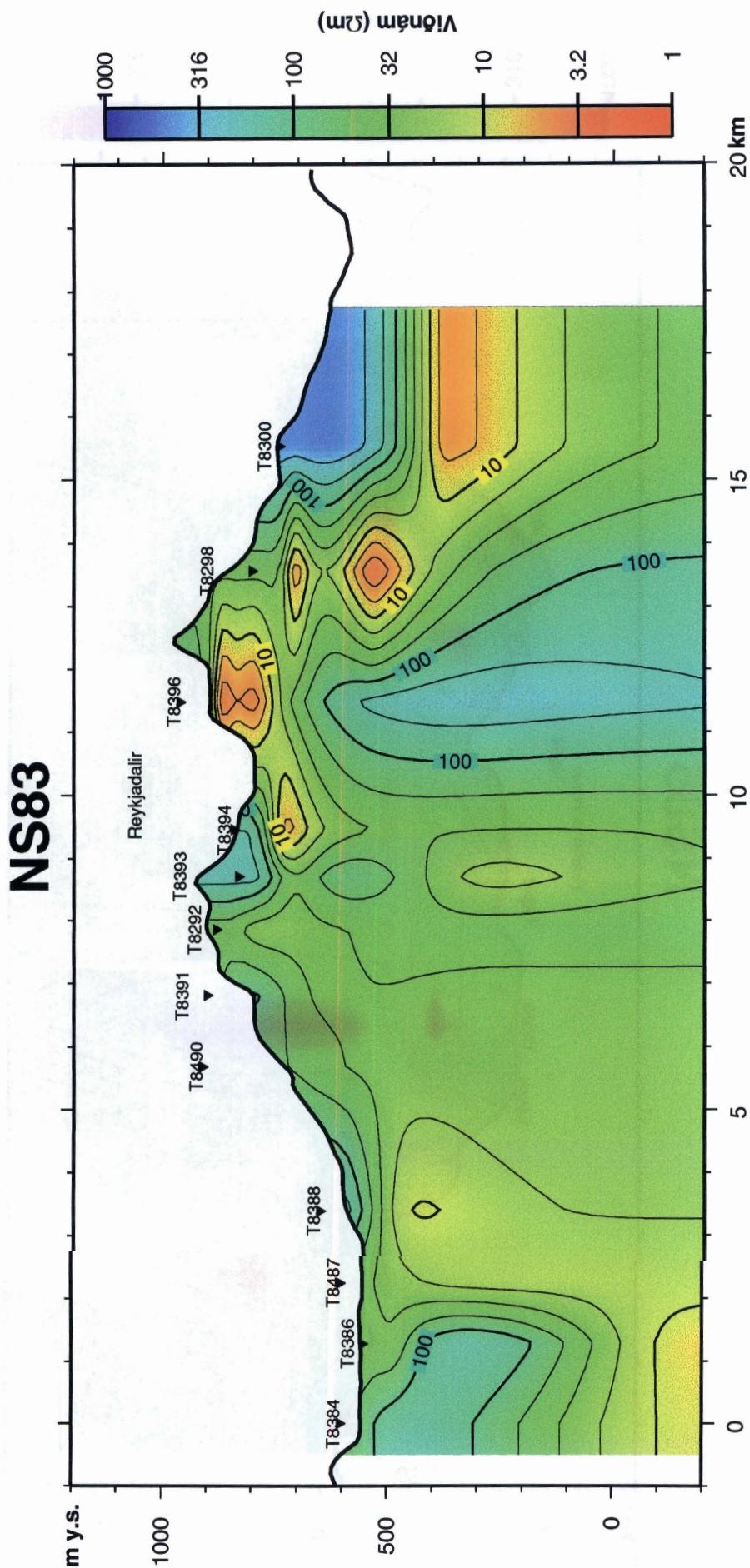
Mynd 27. Viðnálmssnið NS77.

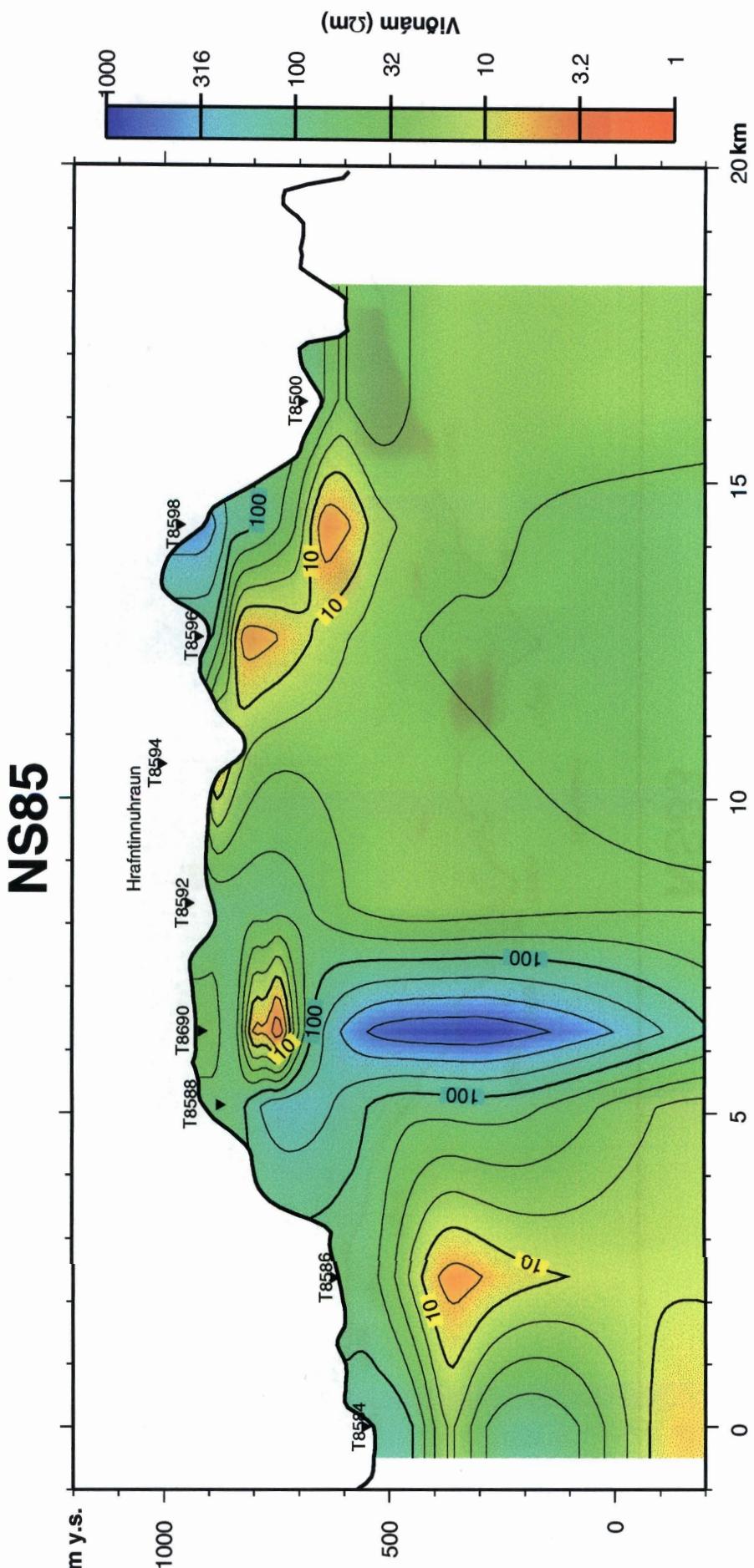


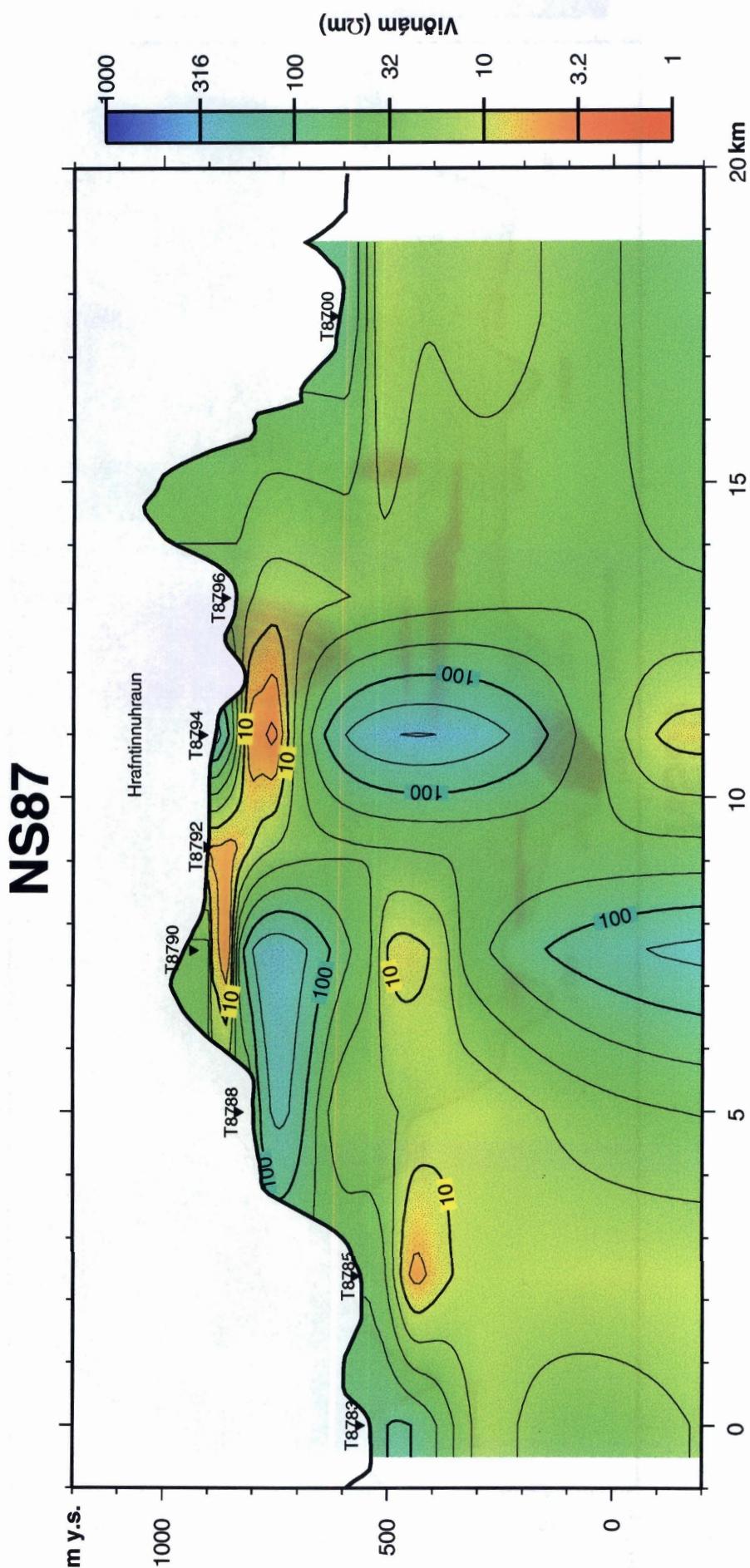
Mynd 28. Viðnámssnið NS79.



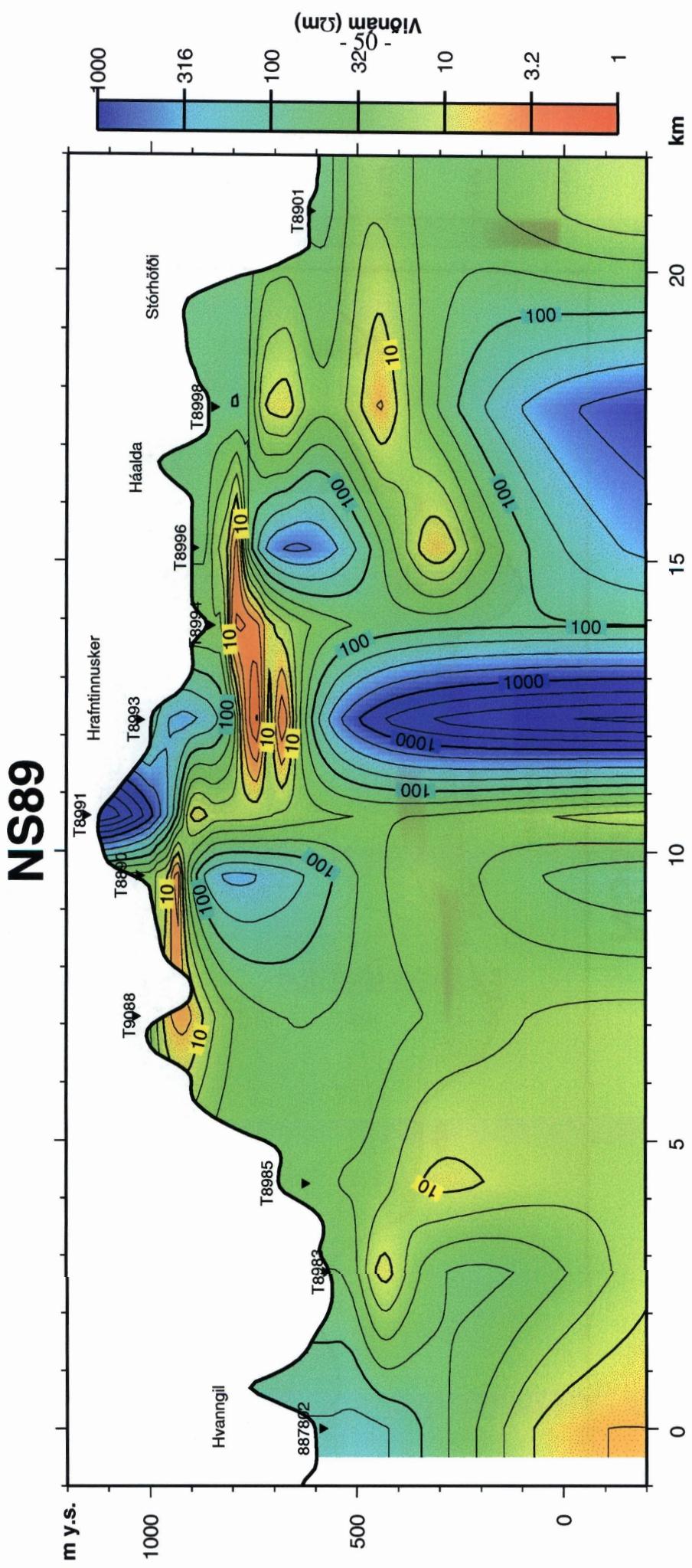
Mynd 29. Viðnámssnið NS81.



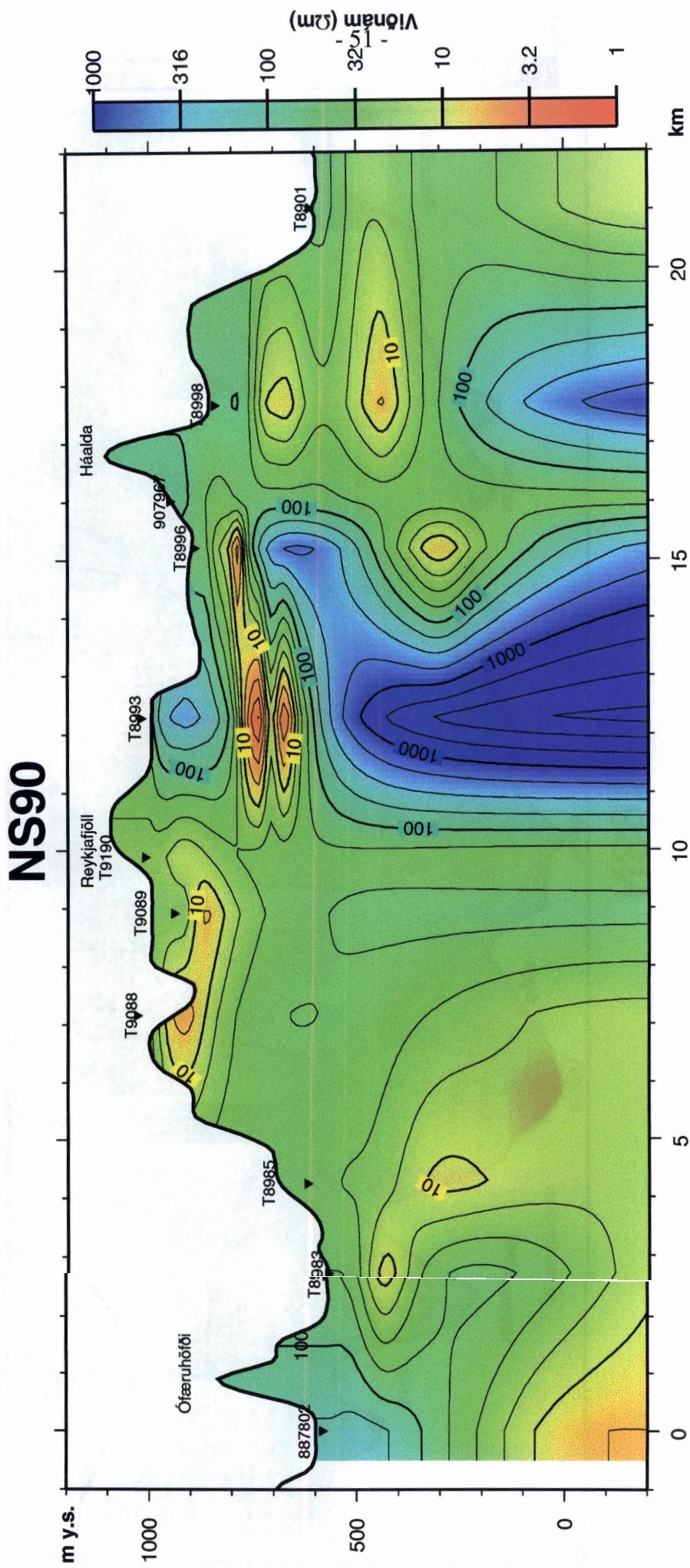




Mynd 32. Viðnámsnáð NS87.

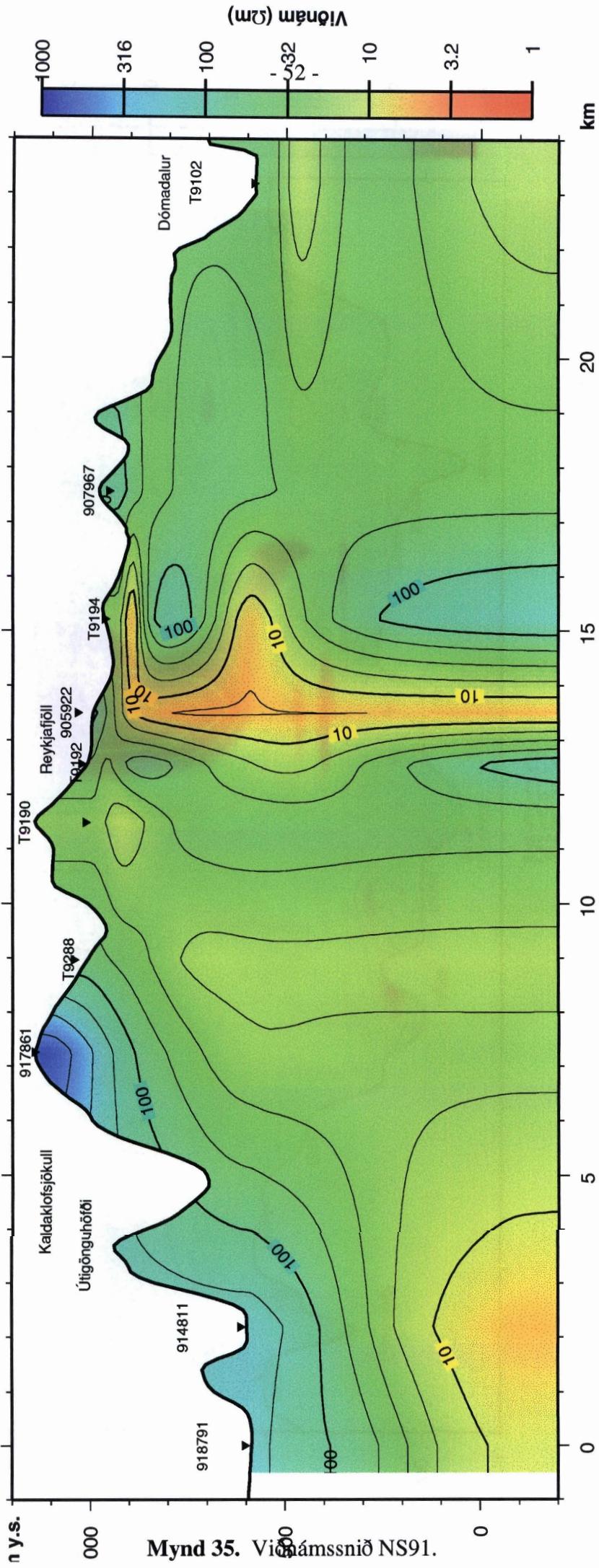


Mynd 33. Viðnámssnið NS89.



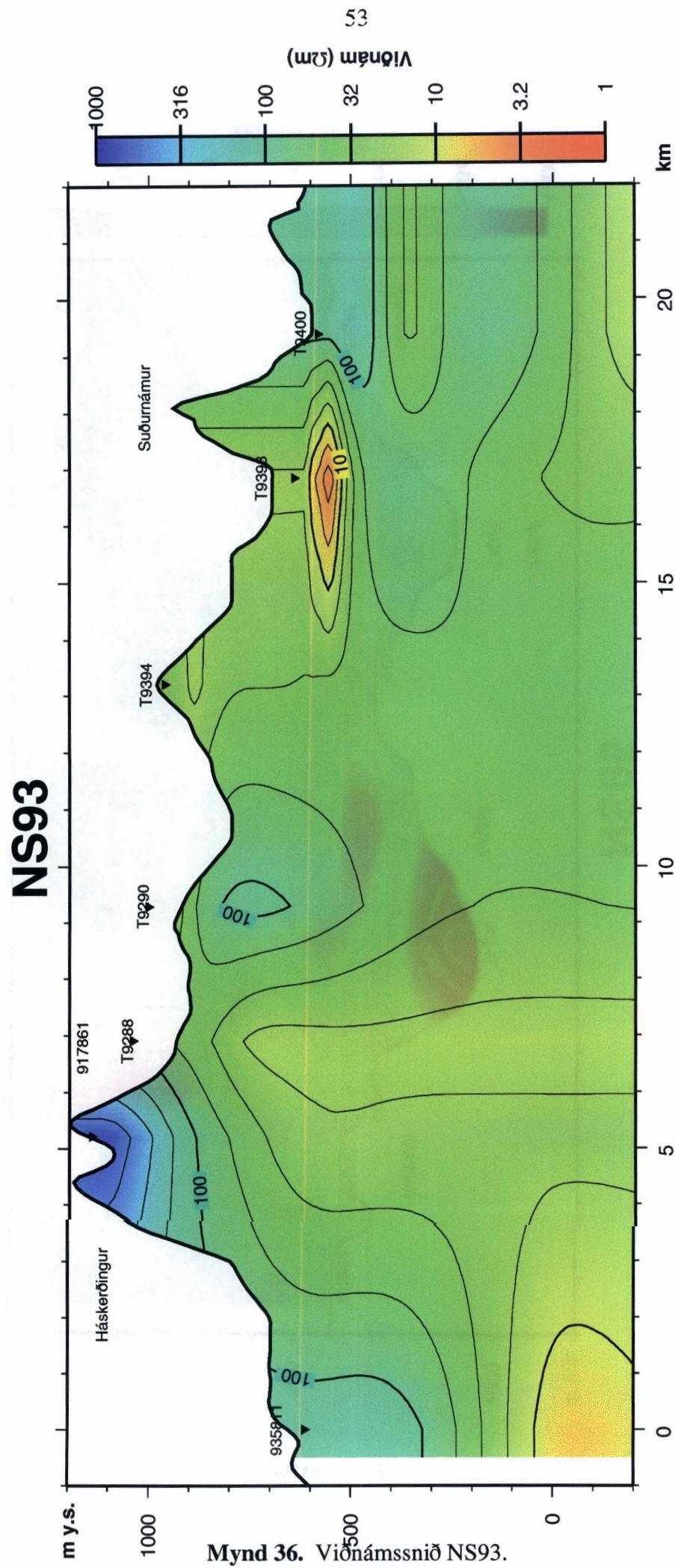
Mynd 34. Viðnámssnið NS90.

NS91

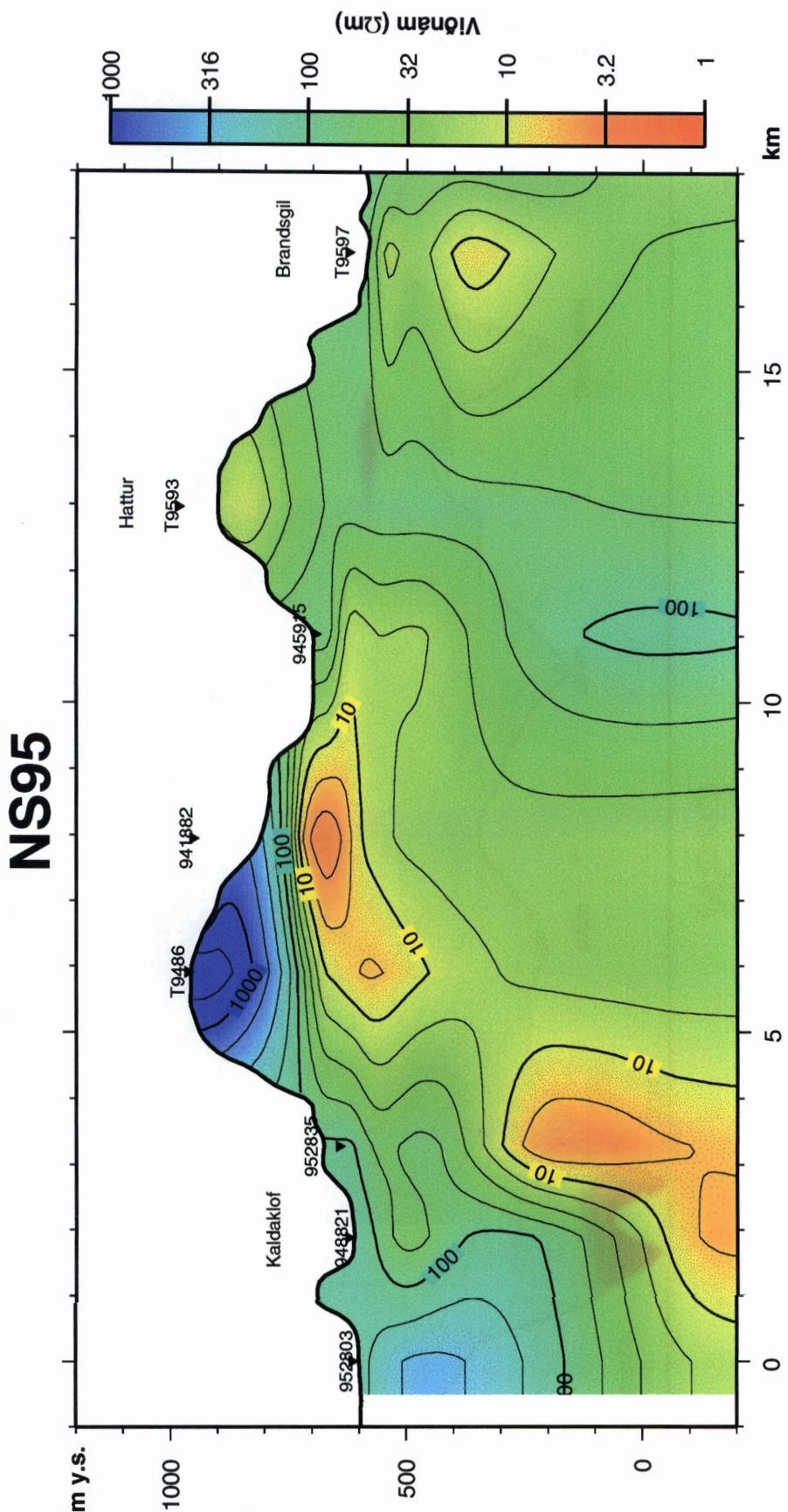


n y.s.

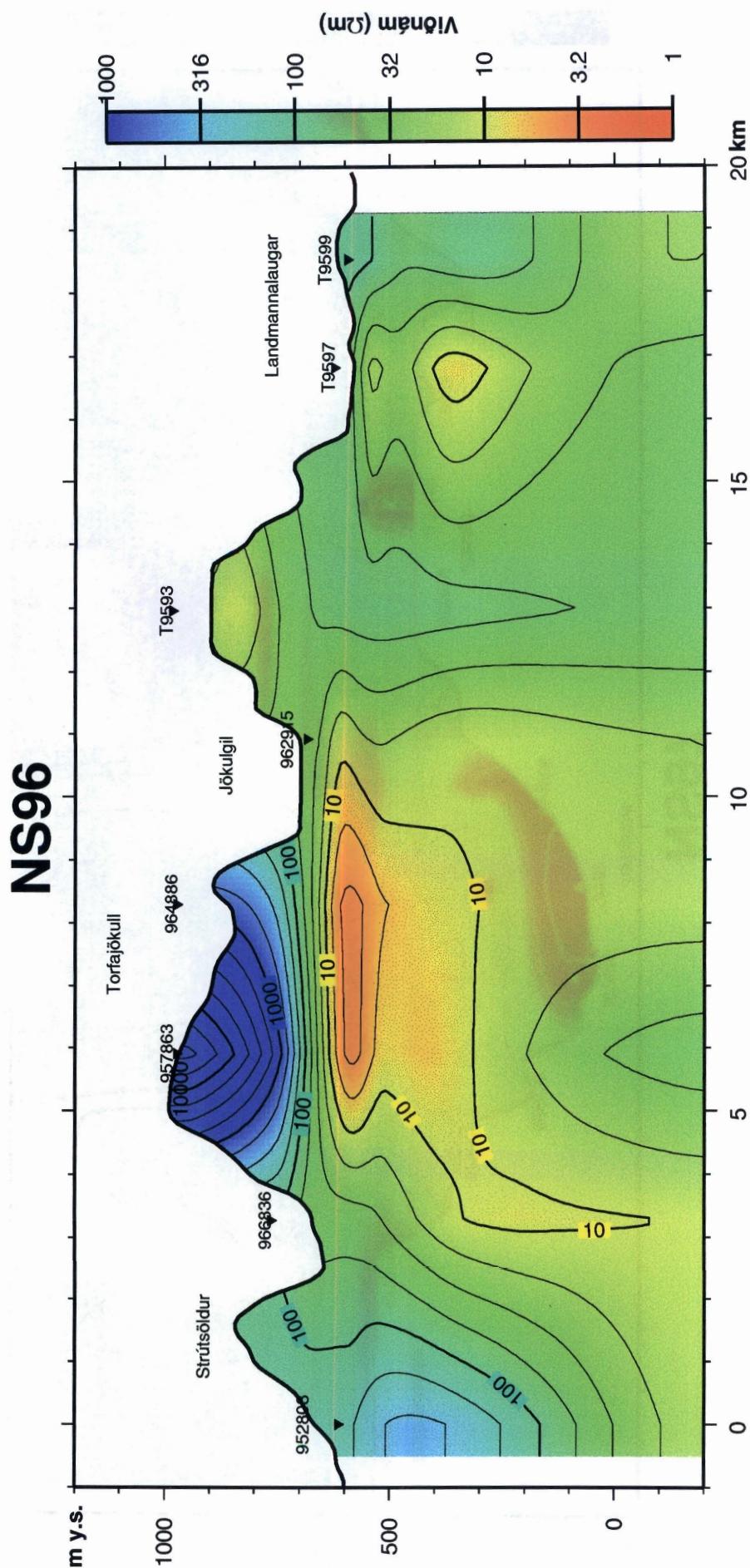
Mynd 35. Viðmámsnið NS91.



Mynd 36. Viðnámssnið NS93.

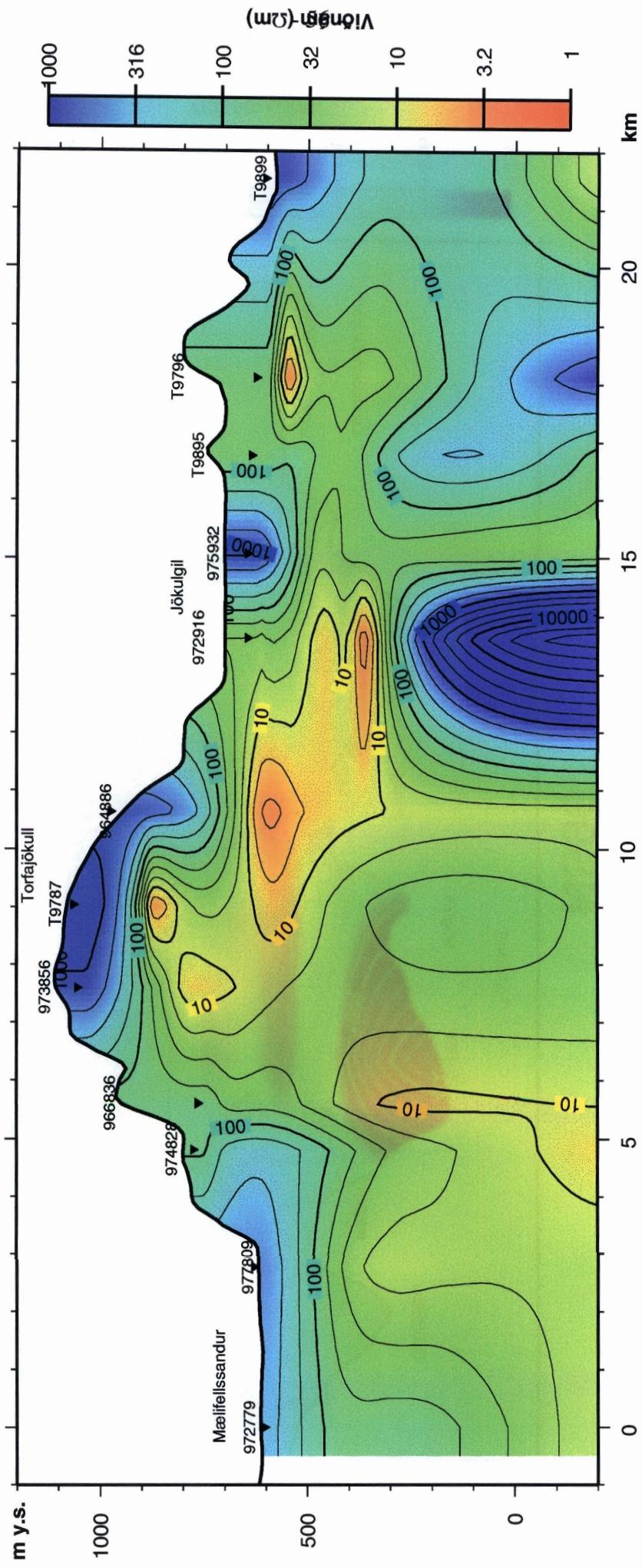


Mynd 37. Viðnámssnið NS95.

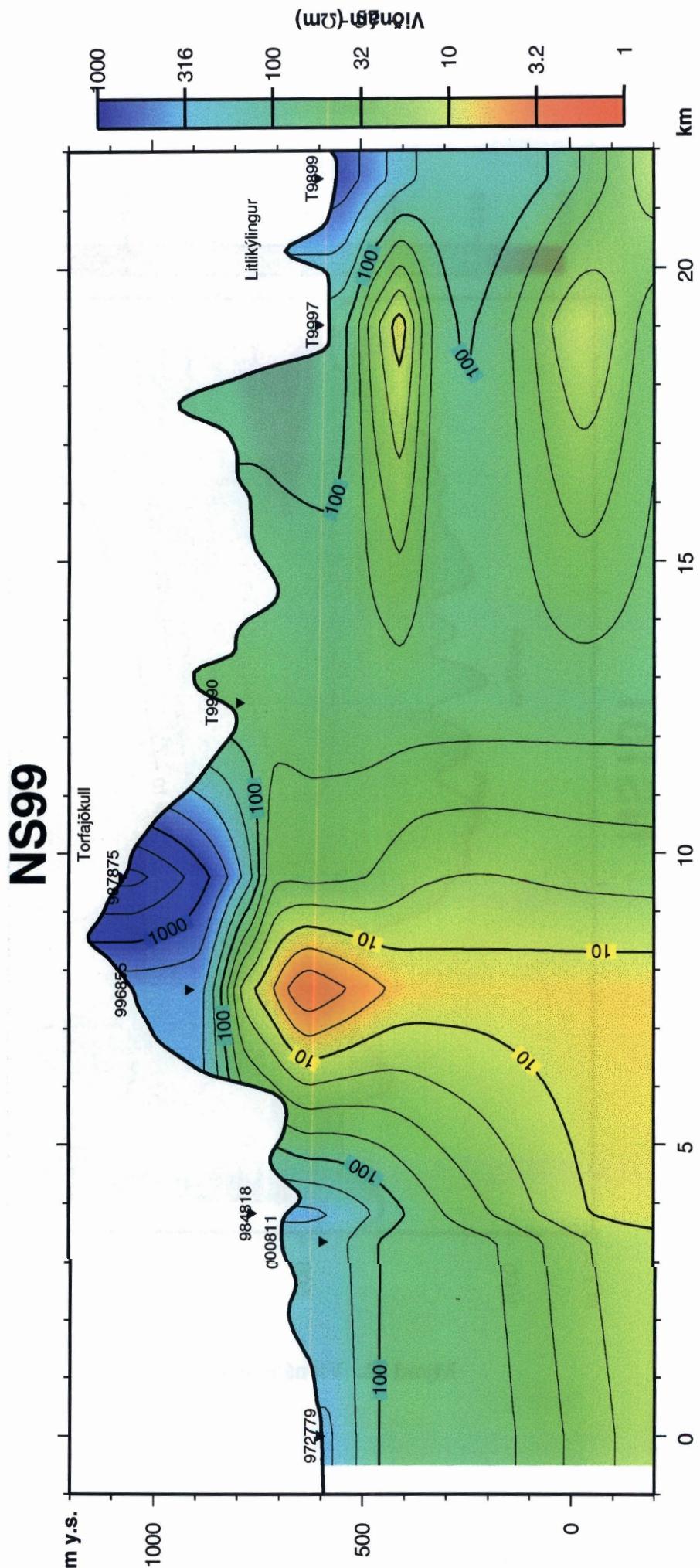


Mynd 38. Viðnámssnið NS96.

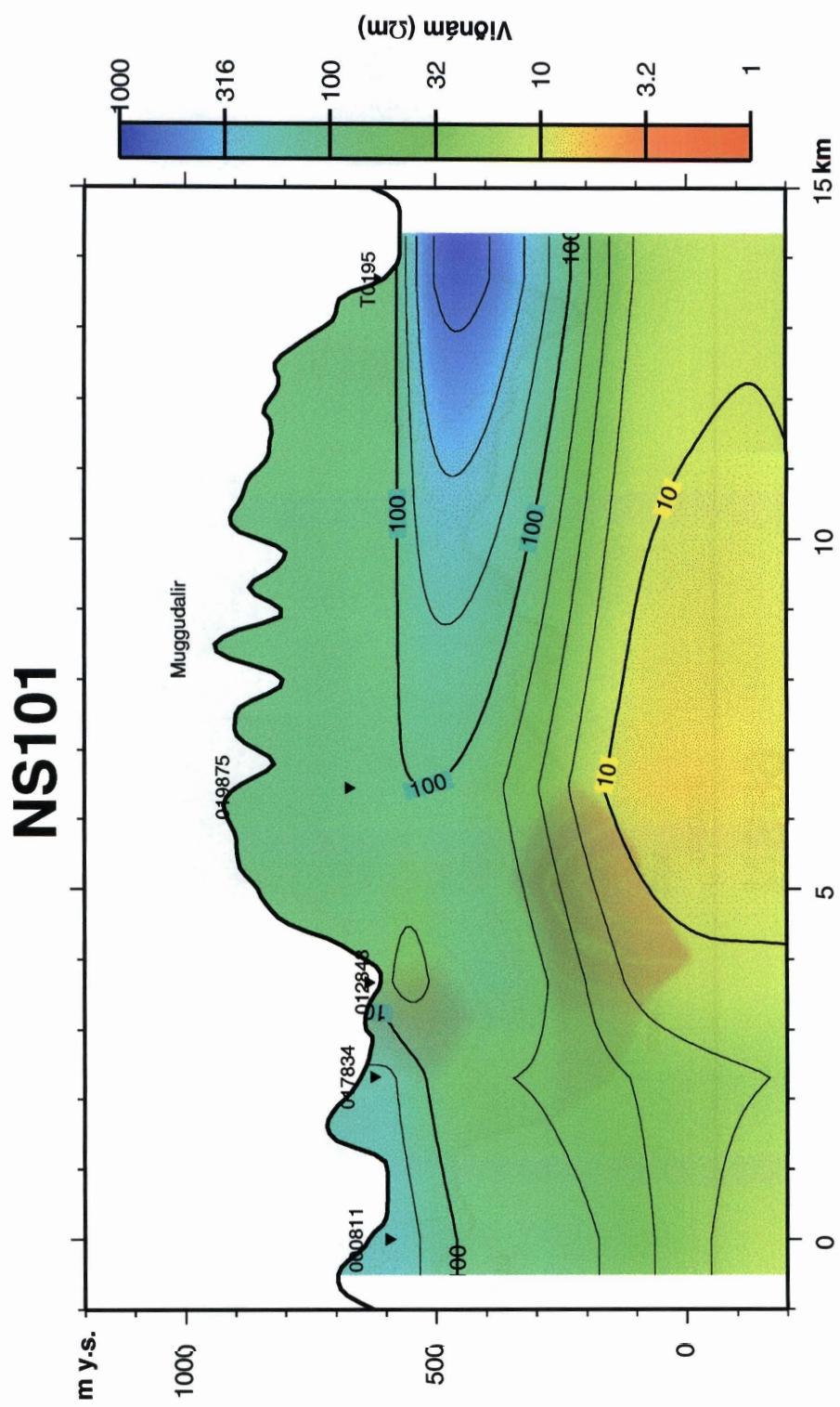
NS97



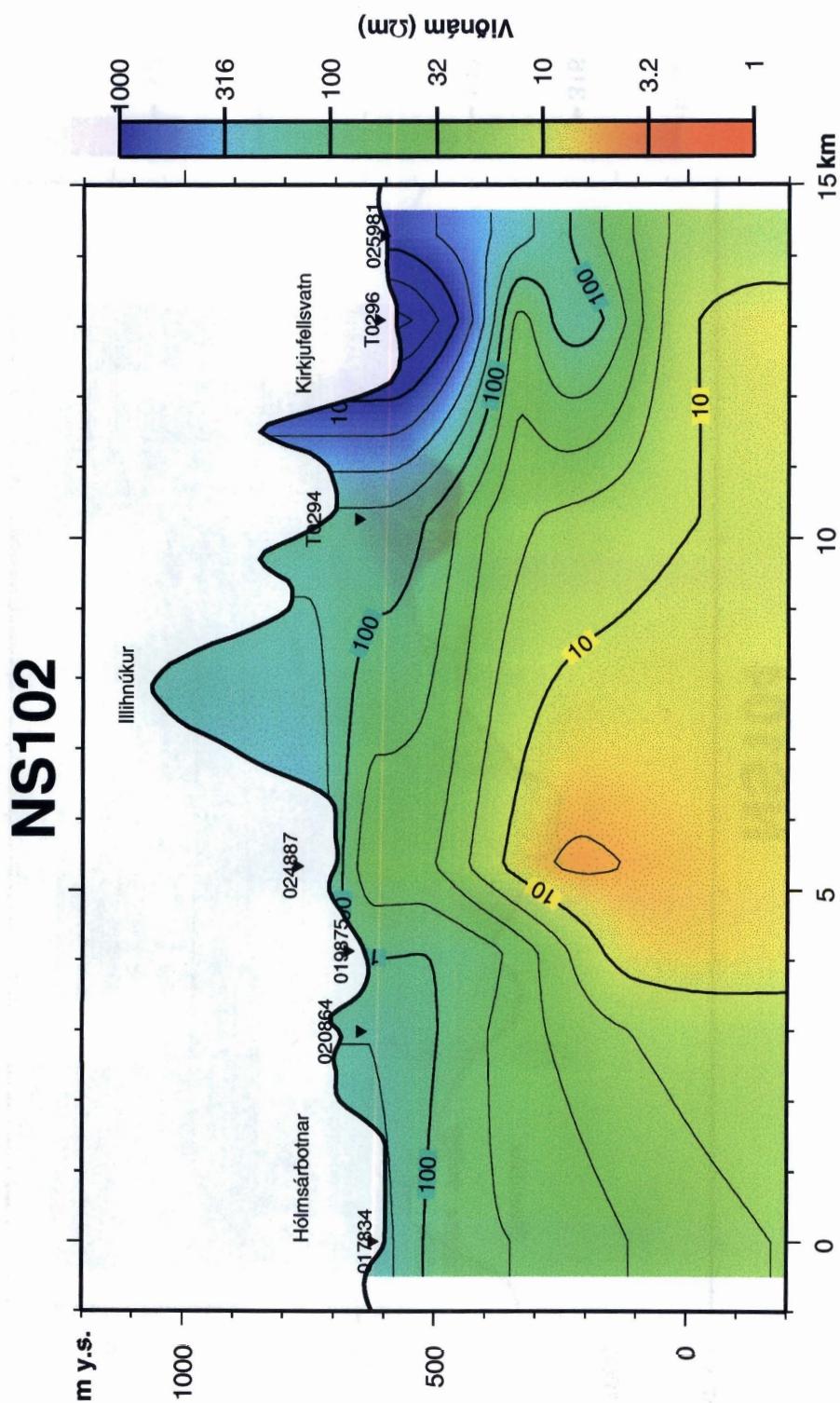
Mynd 39. Viðnámssnið NS97.



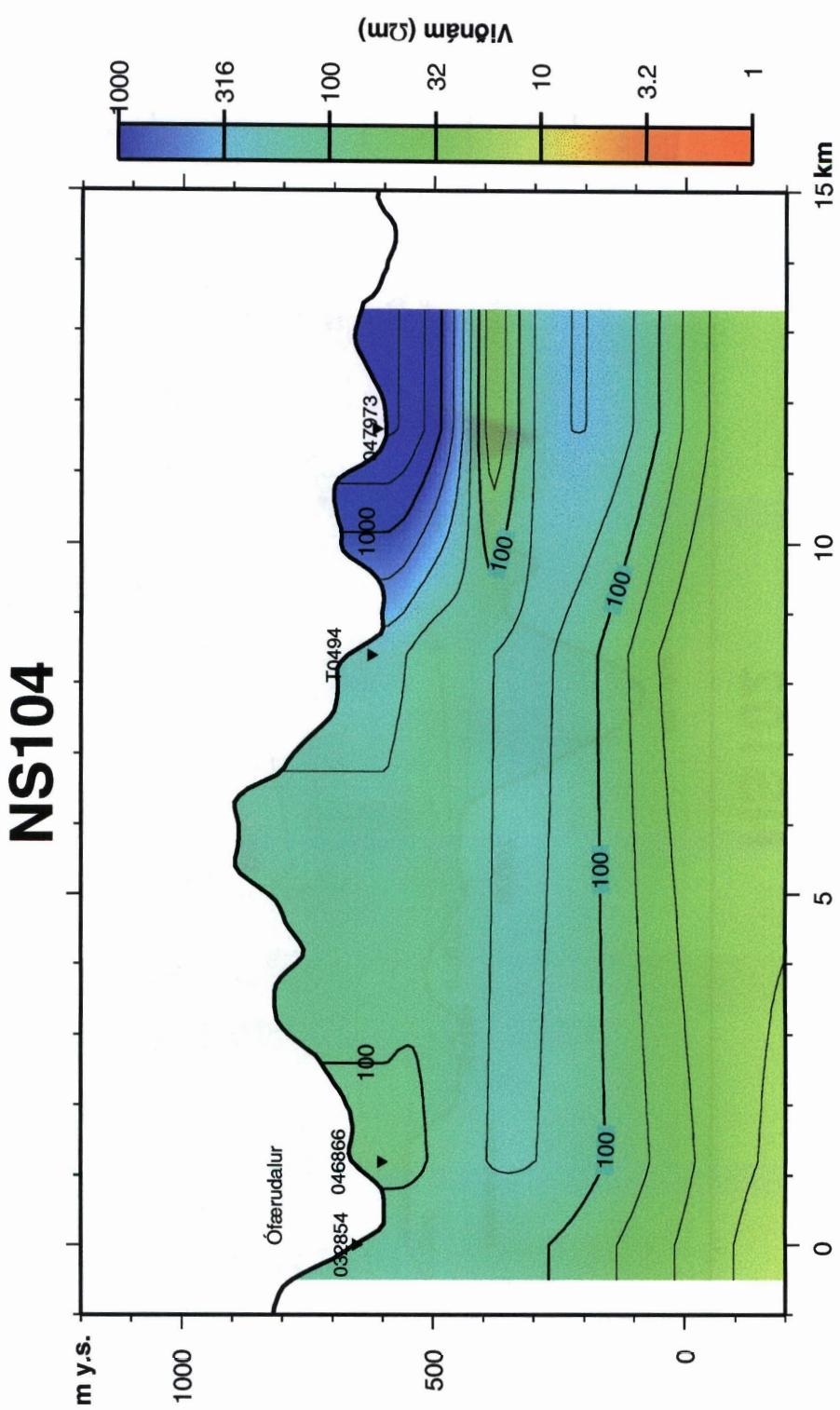
Mynd 40. Viðnámssnið NS99.



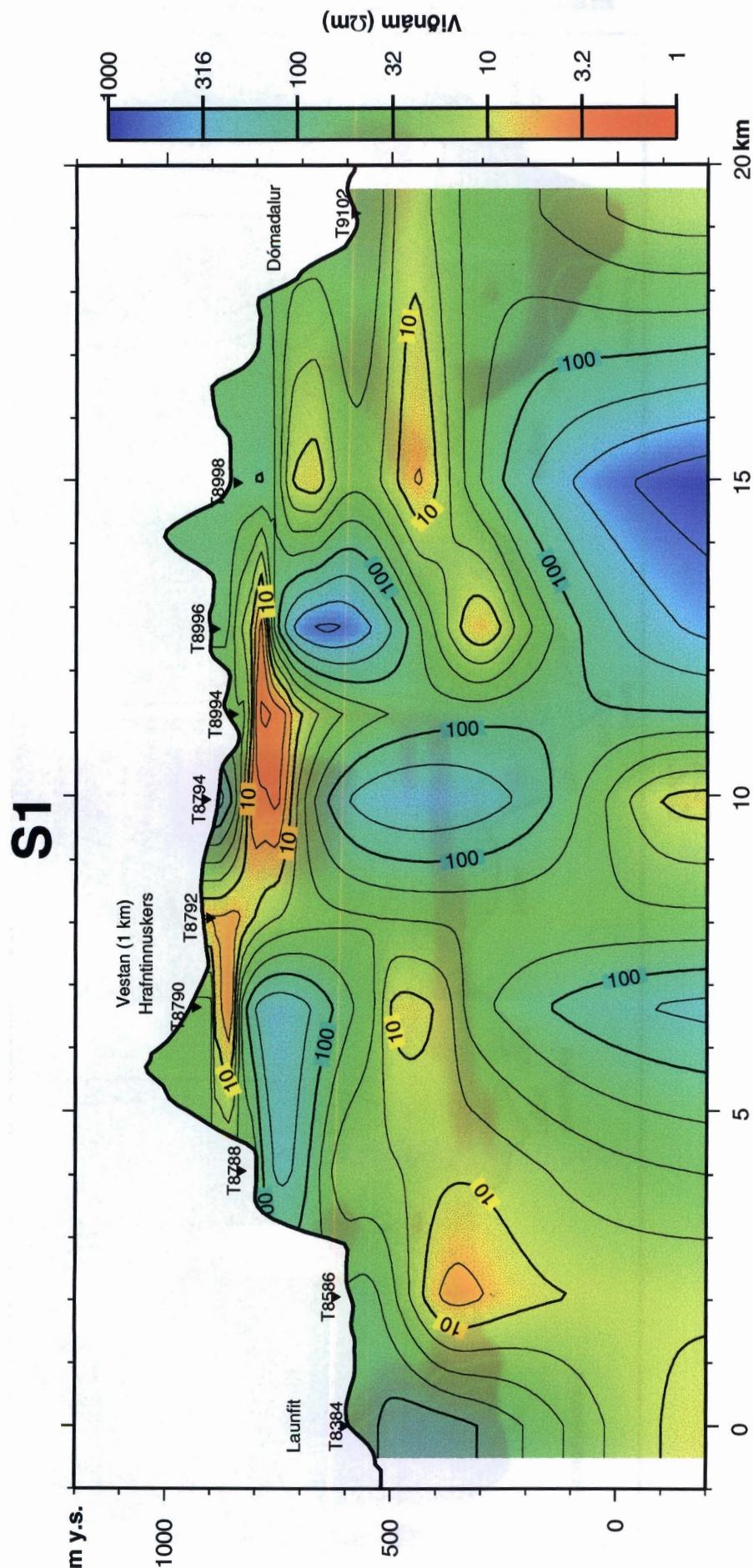
Mynd 41. Viðnámssnið NS101.



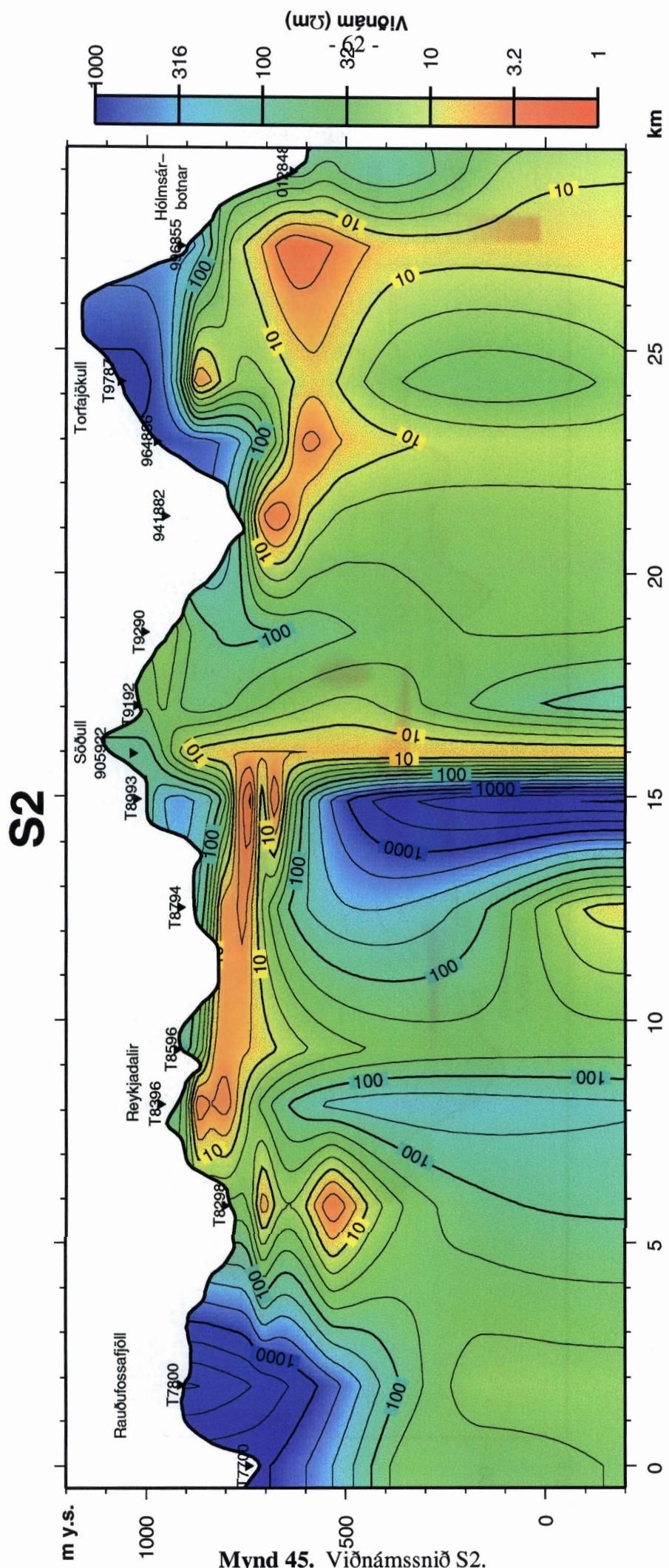
Mynd 42. Viðnámssnið NS102.



Mynd 43. Viðnámssnið NS104.



Mynd 44. Viðnámsnið S1.



6. LOKAORÐ

Eins og stendur hér að framan fóru mælingar fram 1993, 1994 og 1995 í fyrri lotunni, en síðan var ákveðið að ljúka mælingum í einu úthaldi 1999. Gerður var fastverðssamningur við Auðlindadeild um eitt úthald til að ljúka mælingum og stuðst við áætlun um kostnað í samræmi við það. Farið var veturninn 1999 en þá stóð eftir allur suð-austur hluti mælisvæðisins, bæði á láglendi og uppi á sjálfum Torfajökli og í Jökulgili. Veður leyfði ekki mælingar uppi á háleldinu, en lokið var rúmlega 20 mælingum á lágleldinu og síðan ákveðið að bíða ekki betra veðurs, því öll bið er óhemju dýr. Einnig var ljóst að aukaferð þyrfti síðla hausts til að ná mælingum í Jökulgili, en það er eini tími sem fært er á ökutæki inn í gilið. Aukafjárveiting fékkst frá Auðlindadeild til haustferðarinnar, þó svo knöpp að mælingamenn gáfu að hluta til vinnu sína. Voríð 2000 var svo farið í síðasta úthald og mælingum lokið á háleldi Torfajökuls. Tvær síðustu vetrarferðirnar urðu að rúmast innan fjárveitingar sem gerði ráð fyrir einni ferð. Verulegur kostnaður er við að flytja menn og útbúnað til og frá mælistað þannig að það hleypir kostnaði mjög upp að ein ferð verður að tveimur. Þetta varð til þess að ekki er eftir fjármagn til að ljúka skýrslu um viðnámsmælingarnar á viðunandi hátt. Einungis reyndist unnt að ljúka allri túlkun sjálfra mælinganna og þar með sýna niðurstöður þeirra í viðnámskortum og viðnámssniðum.

En hvað þýða þessar niðurstöður? Viðnámsmælingarnar frá Torfajökulssvæðinu sýna miklu flóknari viðnámsmynd en sést hefur á öðrum háhitavæðum. Einkennandi viðnámsmynd af háhitakerfi er háviðnámskjarni með utanáliggjandi lágviðnámskápu. Lágviðnámskápan er þá greind sem ytri mörk háhitakerfisins, þ.e. ytri mörk þess svæðis sem hefur orðið fyrir ummyndun vegna háhitans.

- **Af hverju kemur fram tvöföld lágviðnámskápa á einstökum svæðum?**

Tvöföld lágviðnámskápa, eða tvö lög sem túlka má sem lágviðnámskápu er á sumum svæðum? Þetta á einkum við um miðbik og vestan til í öskjunni. Er það háð því, hver berggerðin er á þeim svæðum? Eins og sagt er hér að framan verða skil í ummynduninni við $240\text{--}250^{\circ}\text{C}$, þ.e. sú ummyndun sem veldur lága viðnáminu í lágviðnámskápnum breytist við þetta hitastig yfir í ummyndun með hærra viðnám í háviðnámskjarnanum. Þetta á við um háhitakerfi þar sem basalt er ráðandi bergtegund. Í kerfum þar sem súrar bergtegundir eru ráðandi verða samsvarandi ummyndunarskil við lægra hitastig. Þannig eru skil velleiðandi leirsteinda (montmorillónít og kaolínít) og torleiðandi steinda (klórít og illít) við 180°C . (Hrefna Kristmannsdóttir, 1985).

Tvöfalda lágviðnámskápan um miðbik og vestantil í Torfajökulsöskjunni gæti því verið þar sem þykkt lag af súru bergi liggur ofan á basísku undirlagi. Mót efri lágviðnámskápunnar við hærra undirlag þýða þá hitastig nálægt 180°C en móti neðri lágviðnámskápunnar við háviðnámskjarna þýða $240\text{--}250^{\circ}\text{C}$. Ekki er hins vegar ljóst hvort jarðfræðilegar aðstæður eru í takt við þessa kenningu. Það er nauðsynlegt að skoða viðnámsgögnin með niðurstöðum jarðfræðirannsóknanna, þegar tími og fjármagn gefst til þess.

Getur tvöföld lágviðnámskápa þýtt tvö kerfi, þ.e. á mismunandi tíma. Háhitakerfi þróast, bergið ummyndast og myndar lágviðnámskápu utan á háviðnámskjarna. Síðan kólnar kerfið en ummyndunin stendur eftir. Aðstæður breytast og háhitakerfi þróast á ný. Hitagafinn þarf ekki að vera á sama stað og í fyrra kerfinu. Háhitaum-myndunin í síðara kerfinu yfirprentar köldu ummyndunina þannig að önnur lágvið-námskápan er "köld" ummyndun frá eldra kerfinu. Til að reyna að ráða í þetta þarf að bera viðnámsskipanina saman við niðurstöður frá jarðfræðirannsóknum og efna-fræði.

Ef til vill er ekki hægt að slá neinu föstu um þessar (eða aðrar síðari) kenningar nema með rannsóknarborunum.

- **Af hverju eru stór svæði þar sem ekki vottar fyrir lágviðnámskápu?**

Eru það svæði sem ekki hafa orðið fyrir áhrifum frá háhitanus og eru þessi svæði raunveruleg skil á milli háhitakerfa? Þetta þýðir að háhitakerfin á Torfajökulssvæði séu a.m.k. tvö. Eitt kerfi er undir sjálffum Torfajökli í suð-austurhluta öskjunnar en hitt nær yfir Hrafntinnusker, Reykjadal og allt norður að Landmannalaugum. Þó er hugsanlegt að Landmannalaugar skeri sig frá hinu stóra vestursvæði. Til að geta í þessar hugleiðingar þarf að skoða jarðfræði- og efnafræðigögnin með niðurstöðum viðnámsgagnanna. Ljóst er að til er ógrynni gagna frá Torfajökulssvæði, sem hægt er að skoða og bera saman til að öðlast betri skilning á jarðhitakerfinu sem er víast næstöflugasta jarðhitakerfi landsins.

7. HEIMILDIR

- Björn Gunnarsson, 1987: *Petrology and petrogenesis of silicic and intermediate lavas on a propagating oceanic rift. The Torfajökull and Hekla volcanoes, south central Iceland.* Doktorsritgerð, Johns Hopkins University. 432 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.
- Gretar Ívarsson, 1992: *Geology and petrochemistry of the Torfajökull central volcano in central south Iceland, in association with the Icelandic hot spot and rift zones.* Doktorsritgerð, University of Hawaii. 332 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.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1985: *The role of clay minerals in geothermal research.* Uppsala Symposium Clay Minerals - Modern Society 1985. s. 125-132.
- Jón Örn Bjarnason og Magnús Ólafsson, 2000: *Í Torfajökli; Efni í jarðgufu og heituvatni.* Orkustofnun, OS-2000/030, 91 s.
- Knútur Árnason, 1984: *The effect of finite potential electrode separation of Schlumberger soundings.* 54th Annual International SEG Meeting, Atlanta. Extended Abstracts, s. 129-132.
- 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: s. 447.
- Knútur Árnason, 1989: *Central-Loop Transient ElectroMagnetic Sondings over a Horizontally Layered Earth.* Orkustofnun, OS-89032/JHD-06, 128 s.
- Knútur Árnason, 1990: *Central-loop Transient ElectroMagnetic Soundings in Geothermal and Ground Water Exploration, A Step Forward.* Geothermal Resource Council Transactions, Vol. 14, Part II, s. 845-851.

- Knútur Árnason, 1993: *jarðhiti á ölkelduhálssvæði. Viðnámsmælingar 1991 og 1992.* Orkustofnun, OS-93037/JHD-10, 82 s.
- Knútur Árnason, 1995: *Áhrif lagskiptingar á niðurstöður viðnámsmælinga.* Orkustofnun, OS-95013/JHD-08 B, 12 s.
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í Kröfli* Orkustofnun OS-96005/JHD-03, 96 s.
- Kristján Sæmundsson, 1988: *Jarðfræðibáttur um Torfajökulsöræfi.* Árbók Ferðafélags Íslands. s. 164-180.
- McGarvie, D. W., 1985. *Volcanology and petrology of mixed magmas and rhyolites from the Torfajökull volcano, Iceland.* Doktorsritgerð, University of Lancaster. 255 s.
- Ólafur G Flóvenz og Ragna Karlsdóttir, 2000: *TEM-resistivity image of a geothermal field in N-Iceland and the relation of the resistivity with lithology and temperature.* Grein á International Geothermal Association (IGA) World Geothermal Congress (WGC-2000) í Japan, árið 2000.
- Ragna Karlsdóttir, 1992: *Námafall. TEM-viðnámsmælingar 1992.* Orkustofnun OS-93022/JHD-12 B. 34 s.
- Ragna Karlsdóttir, 1995: *Brennisteinsfjöll. TEM-Viðnámsmælingar* Orkustofnun OS-95044/JHD-06, 41 s.
- Santos L, 1995: *One- and two dimensional interpretation of DC-resistivity data from the Berlin geothermal field, El Salvador.* Háskóli Sameinuðu þjóðanna, 1995. Skýrsla nr.11, s. 269-302.
- Stefán Arnórsson, gretar Ívarsson, Kevin E. Cuff og Kristján Sæmundsson, 1987: *Geothermal activity in the Torfajökull field, South Iceland, Summary of geochemical studies.* Jökull, 37. árg. s 1-11.
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988: *Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings.* Geophysics, v. 53. s. 1459-1468.

8. VIÐAUKI 1 - TEM-mæliaðferðin

Knútur Árnason hefur tekið saman lýsingu á TEM-mælingum og túlkun þeirra sem birtist í skýrslu um viðnámsmælingar á Kröflusvæði (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996) og fer hún hér á eftir.

Í rafsegulaðferðum er notað tímaháð rafsegulsvið í stað tímaóháðs spennusviðs frá jafnstraumi eins og gert er í jafnstraumsaðferðum. Rafsegulaðferðir skiptast raunar í two flokka eftir uppruna rafsegulsviðsins. Annarsvegar eru aðferðir þar sem rafsegulsvið með þekktri og fyrirfram ákveðinni hegðun er framkallað með sendibúnaði eða straumgjafa og hinsvegar aðferðir sem nota rafsegulsvið frá sveiflum í segulsviði jarðar.

TEM-mælingar (transient electromagnetic) með straumlykkju sem uppsprettu eru mælingar þar sem rafsegulsviðið er gert af manna völdum. Lögð er vílykkja á jörðina, yfirleitt ferningslag og um 300 m á kant. Rafstraumur er sendur í lykkjuna og hann síðan rofinn skyndilega. Straumurinn býr til segulsvið og þegar hann er rofinn fer segulsviðið að dofna. Við það spanast straumar í jörðinni sem leitast við að viðhalda segulsviðinu. Eftir því sem lengra líður frá því að straumurinn var rofinn, ná spanstraumarnir dýpra í jörðu og segulsviðið á yfirborði dofnar. Hnignun segulsviðsins er mæld með því að mæla span í spólu í miðju sendilykkjunnar. Út frá styrk spansins í móttökuspólunni, sem fall af tíma, má síðan ákvarða eðlisviðnám undir mælistað, sem fall af dýpi (Knútur Árnason, 1989).

TEM-mælingar með straumlykkju sem uppsprettu voru fyrst reyndar hér á landi sumarið 1986. Nesjavallasvæðið varð fyrir valinu sem prufustaður því að þar fékkst samanburður við bestu fánlegar niðurstöður með eldri aðferðum. Samanburðurinn leiddi í ljós að TEM-mælingar væru mjög fýsilegur kostur (Knútur Árnason o.fl., 1987). Þær reyndust mun ódýrari og fljótlegrí i framkvæmd en jafnstraumsmælingarnar, bæði vegna þess að ekki þarf að safna jafn miklu af gögnum og einnig vegna þess að einungis þarf 2 mælingamenn borið saman við 4-6 í jafnstraumsmælingum. Úrvinnsla og túlkun mælinganna reyndist einnig mun umfangsminni því að í ljós kom að einvíð túlkun TEM-mælinga getur gefið allt að því jafn mikla upplausn og tvívíð túlkun jafnstraumsmælinga. Ástæða þessa er sú að TEM-mælingar eru í miklu meira mæli háðar viðnámskipan beint undir mælistað en Schlumbergermælingar. Auk þess eru svokölluð jafngildisvandamál mun minni í TEM-mælingum en Schlumbergermælingum (Knútur Árnason, óbirt gögn). Jafngildisvandamál felast í því að fyrir lágvíðnámslag er oft ekki hægt að ákvarða með vissu viðnámsgildi og þykkt lagsins heldur einungis hlutfall þykktar og viðnáms, þ.e. heildarleiðnina. Ennfremur eru TEM-mælingar mun minna næmar fyrir staðbundnum viðnámsóreglum á mælistað (Sernberg o.fl., 1988) en slíkar óreglur geta haft veruleg áhrif á jafnstraumsmælingar (Knútur Árnason, 1984). Af þessum sökum gefa viðnámsnið byggð á einvíðri túlkun TEM-mælinga mun áreiðanlegri mynd en samsvarandi snið byggð á Schlumbergermælingum. Tilraunamælingarnar á Nesjavöllum sumarið 1986 sýndu að einvíð túlkun TEM-mælinga gefur lítið lakari upplausn og tvívíð túlkun á jafnstraumsmælingum á háhitasvæðum (Knútur Árnason, 1987 og 1990).

TEM-mælingar hafa þann ótvíráða kost fram yfir jafnstraumsmælingar að ekki þarf að senda straum ofan í jörðina. Það er oft mikið vandamál að koma nægilegum straumi til jarðar í jafnstraumsmælingum á svæðum þar sem jarðvegur og gróður er líttill. Þetta gerir ennfremur kleift að gera TEM-mælingar þegar jörð er þakin snjó. Með því að nota vélsleða eða bíla búna til aksturs á snjó má oft, seinni hluta vetrar, komast auðveldlega um mælisvæði sem eru lítt- eða ófær farartækjum að sumarlagi. Helsti gallinn við mælivinnum seinni part vetrar er sá að meiri hætta er á að veður hamli vinnu en að sumri til.

Túlkun viðnámsmælinga

Mæliniðurstöður viðnámsmælinga eru yfirleitt settar fram sem sýndarviðnám. Samband uppsprettumerkis og mælds merkis er háð eðlisviðnámi jarðar. Fyrir mælingar sem kanna viðnám sem fall af dýpi er sýndarviðnámið fært sem fall af fjarlægð milli straum- og spennumælistakauma í jafnstraumsmælingum, en sem fall af tíma eftir að straumur er rofinn í uppsprettu í TEM-mælingum. Túlkun mælinganna felst í því að ákvarða raunverulega dreifingu eðlisviðnáms jarðarinnar, eftir því sem kostur er, út frá sýndarviðnámsferlunum,

Einvíð túlkun gerir ráð fyrir því að viðnám breytist einungis með dýpi (eina átt), en ekki í láréttar stefnur. Gert er ráð fyrir því að jörðinni undir mælistað megi skipta upp í endanlega mörg lárétt lög með mismunandi eðlisviðnámi. Túlkunarmaður velur fjöldu viðnámsлага og gefur ágiskuð gildi fyrir þykktir og eðlisviðnám laganna. Tölvuforrit ákvarðar síðan viðnámsgildi og þykktir laga sem best svara til mælda sýndarviðnámsferilsins fyrir þann fjöldu viðnámsлага sem valinn var. Hver sýndarviðnámsferill er túlkaður þannig með mismunandi fjöldu viðnámsлага. Að öllum jafnaði er það viðnámslíkan valið sem lokalíkan, sem gefur reiknaðan sýndarviðnámsferil sem fellur að þeim mælda og hefur fæst viðnámslög.

Að lokinni frumtúlkun mælinganna eru teiknuð viðnámsnáið og viðnámslíkon nærliggjandi mælinga borin saman. Á þessu stigi er túlkunin oft samræmd þ.e. aðlægar mælingar hafi sama fjöldu viðnámsлага en þó aldrei slakað á kröfum um gæði túlkunarinnar og að reiknaður líkanferill falli að mælda ferlinum.

9. VIÐAUKI 2 - Túlkun einstakra mælinga

