



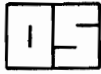
ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

Knútur Árnason  
Ragna Karlsdóttir

## VIÐNÁMSMÆLINGAR Í KRÖFLU

OS-96005/JHD-03  
Reykjavík, mars 1996

Unnið fyrir Landsvirkjun



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 661

**Knútur Árnason**  
**Ragna Karlsdóttir**

# **VIÐNÁMSMÆLINGAR Í KRÖFLU**

**Unnið fyrir Landsvirkjun**

**OS-96005/JHD-03**

**Reykjavík, mars 1996**

**ISBN 9979-827-66-1**

## ÁGRIP

Í þessari skýrslu eru teknar saman í eina heildarmynd helstu niðurstöður þeirra viðnámsmælinga sem gerðar hafa verið í austurhluta Kröfluöskjunnar. Niðurstöðurnar eru settar fram sem viðnámsnið og jafnvíðnámskort. Viðnámsmælingarnar sýna skýr viðnámsfrávik í efsta kílómetra jarðlagastaflans, með lágviðnámskápu og háviðnámskjarna undir, sem endurspeгла ummyndun vegna jarðhitavirkni.

Ofan sjávarmáls einkennist jarðhitavirknin af VNV-ASA-lægu belti frá Leirhnjúk, ASA um suðurhlíðar Kröflu og að austurbrún öskjunnar við Sandabotna. Norður úr því gengur jarðhitavirkni norður frá Víti, NV undir Vítismó. Neðan sjávarmáls teygir jarðhitavirkni sig eftir miðrein sprungusveimsins innan öskjunnar. Einnig kemur fram jarðhitavirkni undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og austur af Leirhól.

Útbreiðsla jarðhitavirkinnar er skoðuð í samhengi við sögu eldvirkinnar á Kröflusvæðinu. Sjá má fylgni þar á milli því jarðhitinn kemur víða fram þar sem gosvirkni hefur verið á nútíma. Jarðhitinn undir sunnanverðu Sandabotnafjalli virðist tengjast eldvirkni fyrir um 2.000 árum sem talið er benda til þess að þar sé ennþá öflugur jarðhiti, þótt ummerki séu lítil á yfirborði. Hár hiti í borholu við Leirhól styður þá tilgátu. Ennfremur benda líkur til þess að gangar tengdir eldvirkninni stjórni að nokkru leyti útbreiðslu jarðhita ofan til í staflanum.

Viðnámsmælingarnar sýna fylgni milli jarðhitavirkni og öskjujaðarsins. Þetta á einkum við um suður- og austurjaðarinn en jarðhitavirkni virðist ekki eins mikil við norðurjaðar öskjunnar. Það er talið geta verið vegna þess að kvika hafi átt greiða leið norður úr öskjunni en innskot hafi myndast við suðurjaðarinn. Að norðanverðu gæti líka verið meiri vatnslekt og kæling af köldu grunnvatni.

Tvö áberandi köld svæði koma fram í efsta kílómetra staflans innan austurhluta öskjunnar. Annars vegar norður eftir austanverðum Hlíðardal og undir vesturbrún Sandabotnafjalls og hins vegar í norð-austur hluta öskjunnar frá Kröflu að Hágöngum og Graddabungu. Á þessum slóðum hefur eldvirkni verið lítil á nútíma og getum er að því leitt að þar sé niðurstreymi kalds grunnvatns á leið inn í hringrás jarðhitakerfisins.

Núverandi vinnslusvæði Kröfluvirkjunnar eru annars vegar innan VNV-ASA-læga jarðhitabeltisins, í suðurhlíðum Kröflu og Leirbotnum, og hinsvegar við Hvíthóla, við suðurjaðar öskjunnar. Eftir Kröfluelda hefur vestanvert VNV-ASA-læga jarðhitabeltið verið mengað af kvikugösum og ekki vitað hvenær sá hluti jarðhitakerfisins, sem trúlega er sá öflugasti, verður nýtanlegur í náinni framtíð. Niðurstöður viðnámsmælinganna benda hinsvegar til þess að öflugan jarðhita geti verið að finna á öðrum stöðum þar sem ekki, eða lítið, hefur verið borað. Þau svæði sem þar koma einkum til greina eru: Norður með vesturhlíðum Kröflu og norður af Víti, á sunnanverðu Sandabotnafjalli, við öskjujaðarinn austan Leirhóls, í Leirhnjúkshrauni vestur af Hvíthólaklifi og við austurjaðar öskjunnar við Sandabotna.

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. MÆLINGAR SEM NOTAÐAR ERU	8
2.1 Einvítt túlkaðar Schlumbergermælingar	8
2.2 Tvívítt túlkaðar Schlumberger- og viðnámsniðsmælingar	8
2.3 TEM-mælingar	8
3. TÚLKUN MÆLINGANNA	9
4. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA	10
5. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGA	12
5.1 Viðnámsnið	12
5.2 Jafnviðnámskort	34
5.3 Samandregnar niðurstöður viðnámsmælinga	53
6. JARÐHITAFRÆÐILEG TÚLKUN Á NIÐURSTÖÐUM VIÐNÁMSMÆLINGA	54
7. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	62
8. HEIMILDIR	64
ENGLISH SUMMARY	66
VIÐAUKI I: Viðnámsmæliaðferðir	69
VIÐAUKI II: Viðnámsmælingar sem notaðar eru	75



## MYNDASKRÁ

Mynd 1. Satðsetning viðnámsmælinga og viðnámsniða	7
Mynd 2. Viðnámsnið eftirl ífnu-1	16
Mynd 3. Viðnámsnið eftirl ífnu-2	17
Mynd 4. Viðnámsnið eftirl ífnu-3	18
Mynd 5. Viðnámsnið eftirl ífnu-4	19
Mynd 6. Viðnámsnið eftirl ífnu-5	20
Mynd 7. Viðnámsnið eftirl ífnu-6	21
Mynd 8. Viðnámsnið eftirl ífnu-7	22
Mynd 9. Viðnámsnið eftirl ífnu-8	23
Mynd 10. Viðnámsnið eftirl ífnu-9	24
Mynd 11. Viðnámsnið eftirl ífnu-10	25
Mynd 12. Viðnámsnið eftirl ífnu-11	26
Mynd 13. Viðnámsnið eftirl ífnu-12	27
Mynd 14. Viðnámsnið eftirl ífnu-13	28
Mynd 15. Viðnámsnið eftirl ífnu-14	29
Mynd 16. Viðnámsnið eftirl ífnu-15	30
Mynd 17. Viðnámsnið eftirl ífnu-16	31
Mynd 18. Viðnámsnið eftirl VS-4	32
Mynd 19. Viðnámsnið eftirl VS-5	33
Mynd 20. Viðnám 500 m ofan sjávarmáls	38
Mynd 21. Viðnám 450 m ofan sjávarmáls	39
Mynd 22. Viðnám 400 m ofan sjávarmáls	40
Mynd 23. Viðnám 350 m ofan sjávarmáls	41
Mynd 24. Viðnám 300 m ofan sjávarmáls	42
Mynd 25. Viðnám 250 m ofan sjávarmáls	43
Mynd 26. Viðnám 200 m ofan sjávarmáls	44
Mynd 27. Viðnám 150 m ofan sjávarmáls	45
Mynd 28. Viðnám 100 m ofan sjávarmáls	46
Mynd 29. Viðnám 50 m ofan sjávarmáls	47
Mynd 30. Viðnám við sjávarmál	48
Mynd 31. Viðnám 50 m neðan sjávarmáls	49
Mynd 32. Viðnám 100 m neðan sjávarmáls	50
Mynd 33. Viðnám 200 m neðan sjávarmáls	51
Mynd 34. Viðnám 300 m neðan sjávarmáls	52
Mynd 35. Samanburður á eðlisviðnámi undir ífnu-12 og ummyndun í nálægum borholum	55

## 1. INNGANGUR

Saga jarðhitarannsókna í Kröflu er orðin alllöng og verður hún ekki rakin hér í smáatriðum en stiklað á stóru og athyglinni einkum beint að þeim viðnámsmælingum sem gerðar hafa verið á svæðinu. Allmörgum og mismunandi viðnámsmæliaðferðum hefur verið beitt við rannsóknir á Kröflusvæðinu í tímans rás. Fyrir þá sem ekki eru kunnugir viðnámsmælingum er vísað í viðauka I en þar er tekið saman stutt yfirlit yfir helstu mæli- og úrvinnsluáferðir sem notaðar eru til að ákvarða eðlisviðnám jarðlaga.

Segja má að skipulegar jarðhitarannsóknir á Kröflusvæðinu hafi hafist árið 1970, en þá stóð Orkustofnun fyrir rannsóknum á jarðhitasvæðunum við Kröflu og Námafjall vegna áætlana um jarðgufuvirkjun (Kristján Sæmundsson o.fl. 1971). Auk jarðfræði- og jarðefnafræðiathugana voru gerðar 28 Schlumbergerviðnámsmælingar, en áhersla var þá einkum lögð á Námafjallssvæðið. Sumarið eftir var bætt við 32 Schlumbergermælingum og var góður helmingur þeirra á Kröflusvæðinu. Þráðurinn var síðan tekinn upp að nýju árið 1976 en mikill fjörkippur varð í jarðvísindalegum athugunum eftir upphaf Kröfluelda í desember 1975. Sumarið 1976 voru gerðar 38 Schlumbergermælingar við Kröflu og Námafjall og var rúmur helmingur þeirra á Kröflusvæðinu. Að auki voru gerðar 5 tvípólmælingar á Kröflusvæðinu, en þeim var ætlað að kanna viðnám á meira dýpi en Schlumbergermælingunum. Miklar framfarir höfðu orðið í viðnámsmælitækni frá því 1971 og voru mæligögn nú mun betri en áður. Þá voru ennfremur, árið 1976, gerðar nokkrar MT-mælingar (magneto telluric) í Kröflu í samvinnu Orkustofnunar og Háskólans í Árósum (Fredrik H. Andersen, 1981).

Á árunum 1975 til 1978 voru, auk viðnámsmælinganna sem getið er hér að framan, gerðar ýmsar jarðeðlisfræðilegar mælingar, svo sem þyngdarmælingar, segulmælingar á jörðu og sjálfspennumælingar. Árið 1970 höfðu verið gerðar flugsegulmælingar á Kröflu-Námafjallssvæðinu. Veturinn 1978-79 var unnið úr þeim jarðeðlisfræðilegu mælingum sem gerðar höfðu verið til þess tíma og niðurstöður settar fram í skýrslu (Ragna Karlsdóttir o.fl., 1978). Þrátt fyrir að allmiklar jarðeðlisfræðirannsóknir hafi verið gerðar frá útgáfu þeirrar skýrslu hefur hún til þessa verið eina heildstæða samantektin á jarðeðlisfræðilegum gögnum á Kröflusvæðinu. Veigamikill þáttur í úrvinnslunni var túlkun viðnámsmælinga og í skýrslunni var sett fram viðnámskort, sem mikið hefur verið notað og vitnað til.

Sumarið 1979 voru gerðar tilraunir með tvær nýjar viðnámsmæliaðferðir á Kröflusvæðinu. Annarsvegar svokallaðar fjórþólmælingar og hinsvegar TEM-mælingar (transient electromagnetic) með jarðtengdum tvíþól. Báðum þessum aðferðum var ætlað að skyggjast dýpra í jörðu en Schlumbergermælingarnar gera. Fjórþólmælingunum hefur verið lýst í skýrslu Orkustofnunar (Freyr Þórarinsson, 1980). Þar kemur fram að nokkurt innbyrðis ósamræmi er í mæligögnunum og er ekki gerð tilraun til túlkunar mælinganna enda liggur það í eðli mæliaðferðarinnar að erfitt er að túlka niðurstöðurnar nema með umfangsmiklum þrívíðum líkanreikningum. Fjórþólmælingarnar virðast þó sýna að ekki sé að finna nein mælanleg lágviðnáms-  
svæði á 1-3 km dýpi innan Kröfluöskjunnar.

Tvíþól-TEM-mælingarnar voru gerðar í samvinnu Orkustofnunar og Colorado School of Mines í Bandaríkjunum. Niðurstöður mælinganna hafa bæði verið birtar sem prófritgerð (Helga Tulinius, 1980) og sem sýnidæmi um notkun mæliaðferðarinnar í fræðibók um TEM-aðferðir (Kaufman og Keller, 1983). Einvíð túlkun tvíþól TEM-mælinganna sýnir hátt viðnám neðan yfirborðslaga innan þess hluta öskjunnar sem mælingar ná til nema hvað fram kemur nokkuð lágt viðnám (10-20  $\Omega$ ) neðan 1,5 km dýpis við norðurjaðar öskjunnar við Hreindýrahól. Þeirri

túlkun ber þó að taka með varúð því að einföld túlkun mælinga sem taka til jafn stórs svæðis og með jafn miklum viðnámsbreytingum og hér um ræðir getur verið villandi. Þess ber þó að geta hér að MT-mælingarnar sem gerðar voru í samvinnu við Árósháskóla árið 1967 virðast sýna lágt viðnám neðan 1,5 km dýpis um og norðan við Víti (Fredrik H. Andersen, 1981). MT-mæling við Víti sem gerð var af Orkustofnun sumarið 1989 bendir til hins sama (Hjálmar Eysteinson, óbirt gögn).

Næsti kafli í sögu viðnámsmælinga á Kröflusvæðinu hófst sumarið 1983 en þá voru gerðar allfarlegar viðnámsmælingar sem beindust einkum að því að kanna svæðið kringum Hvíthóla, en árið áður hafði borun þar gefið góðan árangur. Tækni við framkvæmd og ekki síst við túlkun viðnámsmælinga hafði tekið miklum framförum. Ný aðferð, svokallaðar viðnámsniðsmælingar, var komin til sögunnar. Hana má nota til að kanna breytingar í viðnámi jarðar í lárétta stefnu (lóðrétt eða nærri lóðrétt viðnámsskil). Þessi aðferð hafði þá um nokkurt skeið verið notuð með góðum árangri til að finna vatnsleiðandi sprungur á lágheitsvæðum. Um svipað leyti urðu miklar framfarir í túlkun viðnámsmælinga þegar Orkustofnun kom sér upp hugbúnaði til tvívíðrar túlkunar. Tvívíðri túlkun má beita bæði á viðnámsniðs- og Schlumbergermælingar og reynsla frá lágheitsvæðum hafði sýnt að með slíkri túlkun viðnámsniðsmælinga má fá mjög nákvæmar upplýsingar um viðnámsskipan í efstu 300-400 m jarðar.

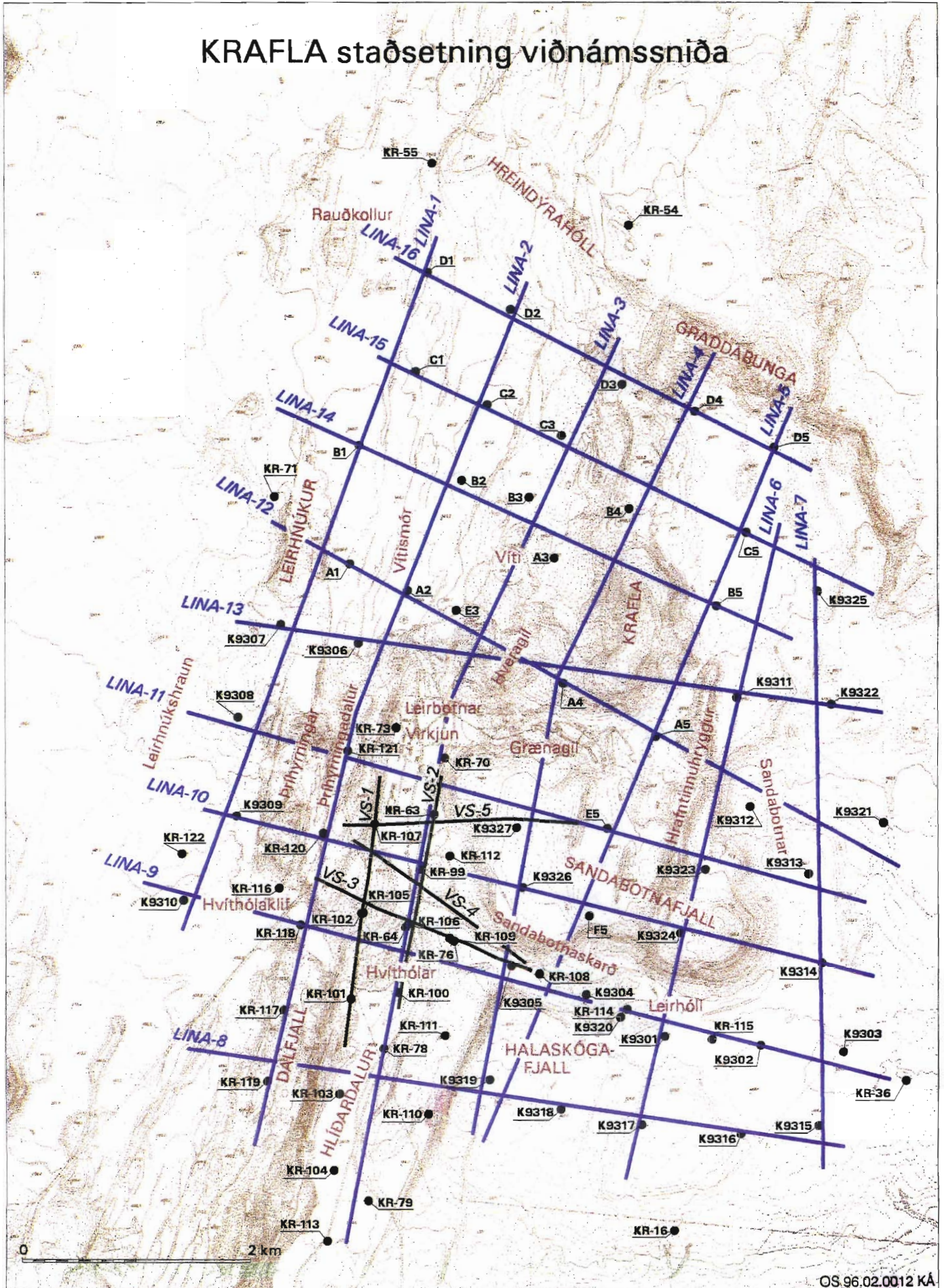
Talið var að jarðhitinn við Hvíthóla væri að verulegu leyti tengdur sprungum og brotum og var því ákveðið að beita bæði viðnámsniðs- og Schlumbergermælingum. Með tvívíðri túlkun mælinganna fékkst nákvæm mynd af viðnámsskipan Hvíthólasvæðisins, sem var í góðu samræmi við fyrirliggjandi gögn úr borholum. Niðurstöðurnar sem birtar voru í skýrslu Orkustofnunar (Knútur Árnason o.fl., 1984) staðfestu grun manna um að vinnslusvæðið við Hvíthóla væri lítið um sig. Sumarið eftir var bætt við tveimur viðnámsniðslfnum yfir dalinn milli Hvíthólasvæðisins og stöðvarhússins, en þau gögn hafa ekki verið birt né úr þeim unnið til fullnustu fyrr en nú.

Eftir rannsóknirnar á Hvíthólasvæðinu lágu yfirborðsrannsóknir í Kröflu niðri til ársins 1991. Þá var komin til sögunnar enn ný aðferð við viðnámsmælingar, svokallaðar TEM-mælingar (transient electromagnetic) með straumlykkju sem uppsprettu merkis. Í apríl 1991 var mælt í norðausturhluta Kröfluöskjunnar, norðan við Leirbotna og norðan og norðaustan Kröflu. Niðurstöður þeirra mælinga voru birtar í greinargerð Orkustofnunar (Knútur Árnason o.fl., 1991). Í apríl 1993 var síðan bætt við TEM-mælingum í austur- og suðausturhluta öskjunnar.

Að loknum þessum TEM-mælingum má segja að búið hafi verið að kanna austurhluta Kröfluöskjunnar með viðnámsmælingum, austan sprungureinarinnar gegnum Leirhnjúk. Tími þótti því til kominn að taka saman og túlka í samhengi þær viðnámsmælingar sem gerðar hafa verið á þessu svæði og er það viðfangsefni þessarar skýrslu. Hér verður reynt að draga upp heildarmynd af viðnámsskipan efsta kflómetra jarðskorpunnar í austurhluta öskjunnar.



# KRAFLA staðsetning viðnámsmælinga og viðnámsniða



Mynd 1. Staðsetning viðnámsmælinga og viðnámsniða.



## 2. MÆLINGAR SEM NOTAÐAR ERU

Eins og fram er komið, hefur þeim viðnámsgögnum, sem hér eru dregin saman, verið safnað á mismunandi tímum. Í fyrsta lagi eru Schlumbergermælingar frá því fyrir 1977, í öðru lagi Schlumberger- og viðnámsniðsmælingar frá rannsókninni á Hvíthólasvæðinu frá 1983 og 1984 og í þriðja lagi TEM-mælingar frá 1991 og 1993. Ekki eru notuð öll þau viðnámsgögn sem safnað hefur verið á svæðinu, því að þar sem hægt er að nota ný og betri gögn í stað eldri mælinga er það gert. Í þessum kafla eru talin upp þau gögn sem notuð eru í þessari samantekt og er staðsetning þeirra sýnd á mynd 1. Nánari upplýsingar um mælingarnar, svo sem heiti, dagsetningu og staðsetningu í landshnitum er að finna í töflum í viðauka II.

### 2.1 Einvítt túlkaðar Schlumbergermælingar

Á árunum 1970 til 1976 voru gerðar alls 98 Schlumbergermælingar á Kröflusvæðinu. Hér eru notaðar 7 af þessum mælingum (sjá töflu 1 í viðauka II) sem einungis eru túlkaðar einvítt. Þær eru á jöðrum mælissvæðisins, en miðsvæðis eru víða til nýrri og betri gögn. Nokkrar þessara eldri mælinga voru þó notaðar í rannsóknunum við Hvíthóla.

### 2.2 Tvívítt túlkaðar Schlumberger- og viðnámsniðsmælingar

Í rannsóknunum við Hvíthóla, sumarið 1983, var í fyrsta sinn beitt saman Schlumberger og viðnámsniðsmælingum. Það sumar voru gerðar 24 Schlumbergermælingar á 5 mælilínum sem voru lagðar þannig að 7 af eldri mælingum nýttust í tvívíðri túlkun. Í töflu 2 í viðauka II eru taldar upp þær Schlumbergermælingar sem notaðar voru við gerð viðnámslíkans af Hvíthólasvæðinu. Viðnámsniðsmælingar voru gerðar eftir þremur mælilínum. Hver viðnámsniðslína var um 2,7 km á lengd og mæld með þremur straumörmum (250, 500 og 750 m) þ.a. í heild voru mældir 24,3 km. Sumarið eftir var bætt við tveimur mælilínum sem einungis voru mældar með viðnámsniðsmælingum; önnur með þremur straumarmslengdum, þeim sömu og áður, en hin einungis tveimur (500 og 750 m). Línurnar eru báðar um 3,9 km á lengd þ.a. sumarið 1984 voru mældir um 19,5 km. Í töflum 3 og 4 í viðauka II er gefið yfirlit yfir viðnámsniðsmælingarnar.

### 2.3 TEM-mælingar

Í apríl 1991 voru gerðar 22 TEM-mælingar á Kröflusvæðinu. Sætt var lagi að gera mælingarnar seinnipart vetrar þegar dag er tekið að lengja, en jörð enn þakin snjó og voru notaðir vélsleðar við verkið. Straumlykkja var ferningslaga, 300 m á kant, í öllum mælingum nema í mælingum A4 og E3 þar sem hún var 150 m á kant. Tafla 5 í viðauka II gefur yfirlit yfir TEM-mælingarnar frá árinu 1991. Í apríl 1993 var bætt við 27 TEM-mælingum. Mælingarnar voru eins og áður gerðar af tveimur mönnum á vélsleðum. Tafla 6 í viðauka II gefur yfirlit yfir mælingarnar en sendilykkja var í öllum tilvikum ferningslaga, 300 m á kant.

### 3. TÚLKUN MÆLINGANNA

Eins fram hefur komið eru þau viðnámsgögn sem dregin eru saman í þessari skýrslu fengin með mismunandi mæliaðferðum og á þau hefur verið beitt mismunandi túlkunaraðferðum (í viðauka I er að finna stutta lýsingu á túlkun viðnámsmælinga).

Einvíðri túlkun var beitt á 7 gamlar Schlumbergermælingar. Í vissum tilvikum gefur sú túlkun Schlumbergermælinga varla nægilega rétta mynd af viðnámsdreifingunni, einkum ef viðnám breytist verulega í láréttar stefnur. Þar sem þessum mælingum er þannig fyrir komið að ekki er kostur á að túlka þær tvívítt er einvíð túlkun látin nægja, enda eru þær á jöðrum mælisvæðisins og eingöngu notaðar við gerð jafnvíðnámskorta, en eru ekki sýndar á sniðum.

Schlumberger- og viðnámssniðsmælingarnar frá 1983, ásamt 7 eldri Schlumbergermælingum, voru túlkaðar með tvívíðri túlkun og hefur áður verið gerð grein fyrir úrvinnslu þeirra (Knútur Árnason o.fl., 1984). Sú túlkun var gerð með eldri gerð af tvívíðu forriti (sjá viðauka I) og tekur hún ekki tillit til landslags, en þar sem landslag er að öllum jafnaði ekki mjög breytilegt eftir mæliálfnum kemur það vart mikið að sök. Túlkunin fór þannig fram að fyrst voru viðnámssniðsmælingarnar túlkaðar til að fá upplýsingar um viðnámsdreifinguna í efstu 200-400 m jarðarinnar. Að því loknu voru Schlumbergermælingarnar túlkaðar með því að gera ráð fyrir að viðnámsdreifingin grunnt í jörðu sé eins og fékkst við túlkun viðnámssniðsmælinganna. Viðnám dýpra í jörðu var síðan ákvarðað þannig að reiknaðir sýndarviðnámsferlar féllu sem best að mæliferlum Schlumbergermælinganna.

Viðnámssniðsmælingarnar frá 1984 voru túlkaðar tvívítt með nýjustu gerð tvívíðs túlkunarforrits, sem tekur tillit til landslags eftir mæliálfnum. Túlkunin fer þannig fram að sniðinu undir mæliálfnum er skipt upp í svæði, hvert með sínu viðnámi, og forritið ákvarðar síðan viðnámsgildi svæðanna þannig að reiknaðir sýndarviðnámsferlar falli sem best að þeim mældu.

TEM-mælingarnar voru túlkaðar með einvíðri túlkun. Þó að einvíð túlkun Schlumbergermælinga gefi oft og tíðum ófullnægjandi mynd af viðnámsdreifingu jarðar, þá er einvíð túlkun TEM-mælinga mun áreiðanlegri (sjá viðauka I).

Sýndarviðnámsferlar þeirra viðnámsmælinga sem stuðst er við í þessari skýrslu eru sýndir í viðauka III ásamt með túlkun þeirra. Þar er þó ekki að finna mæligögn og túlkun mælinga sem gerðar voru við rannsókn Hvíthólasvæðisins sumarið 1983. Þau mæligögn og túlkun þeirra hafa áður verið birt í skýrslu (Knútur Árnason o.fl., 1984). Þar sem niðurstöður mælinganna við Hvíthóla eru felldar óbreyttar inn í þá heildarmynd sem hér er dregin upp þykir ekki ástæða til að birta þau mæligögn öðru sinni, heldur vísast til ofangreindrar skýrslu.

Niðurstöður viðnámsmælinganna eru settar fram sem viðnámssnið og jafnvíðnámskort á mismunandi dýpi. Þar sem viðnámssniðin byggja bæði á tvívíðri túlkun Schlumberger- og/eða viðnámssniðsmælinga annars vegar og einvíðri túlkun TEM-mælinga hins vegar ber viðnámslíkönunum yfirleitt vel saman. Þetta er í samræmi við reynsluna af samanburði þessara aðferða við rannsóknirnar á Neasjavöllum (Knútur Árnason o.fl., 1987), við rannsóknir á Námafjallssvæði (Ragna Karlsdóttir, 1993) og nýlega samantekt viðnámsmælinga á Hengils- og Ölkelduháls- svæði (Knútur Árnason, 1993) þar sem notuð eru saman viðnámsgögn fengin með mismunandi aðferðum líft og hér er gert. Það er því ekki ástæða til að gera ráð fyrir kerfisbundnum mun á niðurstöðum hinna mismunandi aðferða. Helst koma fram frávik þar sem eðlisviðnám er mjög lágt í yfirborði, en eins og fram kemur í viðauka I, geta viðnámsóreglur í yfirborði haft veruleg áhrif á jafnstraumsmælingar (Schlumberger- og viðnámssniðsmælingar).

#### 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 árunna 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 frumpátta 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 hærra en u.þ.b. 1 Ωm) er eðlisviðnámið nánast óháð eðlisviðnámi vatnsins, en hins vegar háð poruhluta og hitastigi. Rafleiðnin virtist tengd ummyndunarsteindum, en utan gosbeltanna eru leirsteindir og zeólfar ráðandi ummyndunarsteindir í efsta kílómetranum. Líta má á rafleiðni í poruvökva og leirsteindum sem rafrás með samsíðatengdum viðnámsmum 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 alltarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins sem hægt var að bera saman við umfangsmikil gögn úr borholum. Sá samnaburður 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 ummyndunarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir 1979). Við hitastig frá 50-100°C og upp að u.þ.b. 200°C er smekttít og zeólfar ráðandi ummyndunarsteindir. Á bilinu 200°C til 230°C eru zeólfar horfnir og smekttít hefur 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 smekttít-zeólfabeltið 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 smekttít-zeólfabeltinu. Ekki sást afgerandi bein 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 meira en hraunlög). Reyndar er hugsanlegt að viðnámsþækkunin í klórítbeltinu sé að hluta til vegna minnkandi poruhluta.

Með mælingum á eðlisviðnámi jarðhitavatnsins í Nesjavallakerfinu, áætluðum poruhluta bergsins svo og reynslujöfnum um samband þessara þátta og eðlisviðnáms, má meta hvert eðlisviðnám jarðlaga væri ef leiðni eftir poruvökva er ráðandi. Slíkir reikningar gefa mun hærra eðlisviðnám en mælist í smekttít-zeólfabeltinu. Því er ljóst að rafleiðni í smekttít-zeólfabeltinu 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 jónaskiptaeginleika en í klóríti eru þessar jónir fastbundnar í kristalgrind (Deer o.fl. 1962).

Í háhitakerfum mettuðum söltu vatni eins og á utanverðum Reykjanesskaga sést ekki eins áberandi hækkun viðnáms þar sem hitastig fer yfir 240°C (Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius 1983). Ástæða þess er talin vera sú að leiðni poruvökvans sé það mikil að hún sé ráðandi bæði í smektít-zeólítbeltinu og klórítbeltinu. Einnig getur ráðið nokkru þar um að samband ummyndunar og hitastigs virðist vera nokkuð annað í söltum háhitakerfum því blandlagssteindir finnast við mun hærri hita en í ósöltum kerfum (Hrefna Kristmannsdóttir munnl. uppl.).

Viðnámsmælingar á öðrum háhitasvæðum hérlendis 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-zeólítbelti. 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 endurspeglar 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-zeólítbeltisins. 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 Grensdal (Gylfi Páll Hersir o.fl. 1990). Í jarðhitakerfinu í Hvíthólum kemur fram hærri viðnám neðan lágviðnáms sem fellur saman við minni ummyndun í basalhraunum neðan móbergslaga (Knútur Arnason o.fl. 1984). Þetta ber að hafa í huga þegar túlka á niðurstöður þeirra viðnámsmælinga sem hér er fjallað um.



## 5. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSSMÆLINGA

Niðurstöður viðnámsmælinganna eru settar hér fram bæði sem viðnámsnið og jafnviðnámskort. Þetta er gert til að gefa sem gleggsta mynd af þeirri viðnámskipan svæðisins sem mælingarnar sýna. Viðnámsniðin eru sett fram á hefðbundinn hátt eins og gert hefur verið í skýrslum Orkustofnunar, að öðru leyti en því að í nokkrum tilfellum er settar saman í eitt snið niðurstöður tvívíðrar túlkunar jafnstraumsmælinga og einvíð túlkun TEM-mælinga. Tvívíðu líkönin eru sett fram óbreytt sem lokalskan túlkunarinnar, en við framsetningu einvíðu líkananna í sniðunum eru viðnámslög með svipuðu viðnámi tengd saman og látin mynda sem heillegust lög í sniðunum. Þar sem saman koma tvívíð líkön jafnstraumsmælinga og einvíð líkön TEM-mælinga er yfirleitt gott samræmi og engum vandkvæðum bundið að tengja líkönin saman.

Jafnviðnámskortin sem hér eru sýnd eru unnin nokkuð öðruvísi en oft hefur verið gert hingað til. Þau hafa oft verið gerð þannig að staðsetning jafnviðnámslína undir viðnámsniðum hefur verið ákvörðuð út frá sniðunum, á því dýpi sem kortið sýnir, og þær tengdar saman eftir auganu milli sniða. Í tengingunum felst nokkur huglæg túlkun þess sem kortið gerir, en með þessu móti er tryggt að samræmi sé milli sniða og jafnviðnámskorta. Jafnviðnámskortin sem hér eru birt eru hinsvegar dregin hlutlaust með tölvu. Tölvuforrit er látið lesa viðnámslíkön (viðnám sem fall af hæð yfir sjó), eitt undir hverri dýptarmælingu (Schlumberger- og TEM-mælingum) ásamt staðsetningum mælinganna. Forritið dregur síðan jafnviðnámslínur út frá líkönunum á fyrirfram gefnu dýpi. Með þessu móti fæst hlutlaust mat á viðnámsdreifingunni, án huglægs mats þess sem kortið gerir, en á móti kemur að ekki er endilega í smáatriðum samræmi við viðnámsniðin. Tölvuforritið dregur jafnviðnámslínum út frá brúun milli viðnámsgilda undir mælistöðum og ef viðnámsbreytingar eru miklar með dýpi geta orðið miklar breytingar í legu jafngildislína með dýpi. Þegar jafnviðnámskort eru handunnin út frá viðnámsniðum er hinsvegar tilhneiging til þess að hafa tregðu í breytingum jafngildislína.

Viðnámsniðin og jafnviðnámskortin eru því tvær, ekki endilega sambærilegar, framsetningar á niðurstöðum viðnámsmælinganna. Þar sem ekki er samræmi er erfitt að segja hvorri skal trú á betur. Þar sem viðnámsniðin innihalda líkön tvívíðrar túlkunar eru þau þó áreiðanlegri en kortin, því að við gerð kortanna er ekki tekið tillit til löðréttra viðnámskila í tvívíðu líkönunum.

### 5.1 Viðnámsnið

Alls eru birt hér 18 viðnámsnið í gegnum austurhluta Kröfluöskjunnar. Flest þeirra, eða 16, eru byggð á dýptarmælingum (TEM-mælingum og Schlumbergermælingum) og sumstaðar einnig viðnámsniðsmælingum, en tvö snið eru einungis byggð á tvívíðri túlkun viðnámsniðsmælinga frá 1984. Sniðin sem byggja á dýptarmælingum eru hér kölluð lína 1 til lína 16 og eru 7 þeirra með N-S-læga stefnu og 9 með A-V-læga stefnu og er léga þeirra sýnd á mynd 1. Sniðin sem einungis byggja á viðnámsniðsmælingum eru kölluð VS-4 og VS-5 og hafa þau bæði A-V-læga stefnu. Léga þeirra er einnig sýnd á mynd 1. Hér á eftir verður fjallað lítillega um viðnámsniðin hvert fyrir sig og dregin fram áhugaverðustu atriðin fyrir hvert þeirra.

Lína 1 (mynd 2) liggur NNA-SSV yfir Leirhnjúk. Lágviðnámskápa sést í öllum mælingum nema þeirri nyrstu (D1). Lágviðnámskápan nær yfirborði við Leirhnjúk en það dýpkar hratt á hana til norðurs og er hún á 300 metra dýpi í C1 sem er um 1,5 km norðan Leirhnjúks. Þar norður af verður lágviðnámskápunnar ekki vart í mælingum. Til suðurs frá Leirhnjúk dýpkar á lágviðnámskápuna og er hún á 500 metra dýpi um 1 km sunnan við Leirhnjúk. Aftur grynkar á lágviðnámskápuna lengra til suðurs og er hún á 200 metra dýpi á mótis við Hvfthólaklif. Frá

Leirhnjúk og til suðurs kemur fram lag með meðallágu viðnámi (10-30  $\Omega$ ), en hærra viðnám bæði fyrir ofan og neðan. Ekki er að fullu ljóst hvernig túlka beri þetta lag, en þar kemur einkum tvennt til greina. Hangandi lágviðnámslög eins og þetta koma oft fram þar sem um er að ræða lárétt rennsli eftir lekum lögum út frá uppstreymisrásum. Einnig er hugsanlegt í þessu tilfelli að lagið sé setframburður frá lokum síðasta jökulskeiðs. Í þremur mælingum næst Leirhnjúk (A1, B1, og K9307) er mjög lágt viðnám neðst í lágviðnámskápunni eða lægra en 3  $\Omega$ . Undir lágviðnámskápunni er háviðnámskjarni sem rís hæst við Leirhnjúk.

**Lína 2** (mynd 3) liggur NNA-SSV um 1 km austan við Leirhnjúk og suður eftir Þrífyrningadal. Norðurhluti sniðsins byggir á TEM-mælingum en suðurhlutinn er tvívítt líkan fengið með túlkun Schlumbergermælinga frá 1983. Lágviðnámskápan nær upp undir yfirborð í A2 sem er á Vítismó austan Leirhnjúks. Til norðurs dýpkar hratt á hana, eins og í línu 1 og sést hún ekki í nyrstu mælingunni D2. Til suðurs dýpkar á lágviðnámskápuna og nær hún suður undir Hvíthólaklif en þar tekur við, á svipuðu dýpi, lag með heldur hærra viðnámi eða 15-20  $\Omega$ . Undir lágviðnámskápunni er háviðnámskjarni sem rís hæst undir Vítismó á mótum við Leirhnjúk og þar er mjög lágt viðnám (lægra en 3  $\Omega$ ) á mótum lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans í mælingum A2 og K9306.

**Lína 3** (mynd 4) liggur NNA-SSV um Víti og suður Hlíðardal. Norðurhluti sniðsins sýnir niðurstöður TEM mælinga en suðurhlutinn er tvívítt líkan Schlumbergermælinga frá 1983. Lágviðnámskápan nær upp í yfirborð við Víti og allt suður í Leirbotna. Norðan Vítis dýpkar hratt á hana og eins suður frá Víti að Leirbotnum. Sunnan Leirbotna eru efri mörk lágviðnámskápunnar á 400 metra dýpi og eru lárétt allt suður að Hvíthólum en þar eru suðurmörk hennar. Þar suður af tekur við lag með heldur hærra viðnámi líkt og í línu 2. Undir lágviðnámskápunni er háviðnámskjarni sem rís hæst undir Víti. Mjög lágt viðnám er á mörkum lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans. Allt frá Víti og suður að Hvíthólum er þetta lag um 200 metra þykkt og er viðnámið lægra en 2  $\Omega$  við Víti en um 3  $\Omega$  undir Hlíðardal.

**Lína 4** (mynd 5) liggur NNA-SSV í vesturhlíðum Kröflu og suður um Sandabotnafjall og Hala-skógarfjall. Sniðið byggir eingöngu á einvíðri túlkun TEM-mælinga. Lágviðnámskápa nær yfirborði í Kröfluhlíðum en steypist niður rétt norðan Kröflu og sést ekki í mælingunum B4 og D4. Til suðurs dýpkar hratt á lágviðnámskápuna og verður hún lárétt undir Sandabotnafjalli og nær suður að Sandabotnaskarði. Háviðnámskjarni er undir lágviðnámskápunni sem rís hæst undir Kröflu og þar er einnig mjög lágt viðnám á mótum lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans.

**Lína 5** (mynd 6) liggur NNA-SSV austan við Kröflu, á milli Kröflu og Hrafninnuhryggjar. Hér er farið að dýpka á lágviðnámskápuna til austurs því hún er komin á 100 metra dýpi þar sem hún rís hæst í A5 á mótum við Grænagil. Lágviðnámskápan hrapar niður til norðurs og sést ekki í B5 sem er beint austur af hátindi Kröflu. Til suðurs dýpkar hratt á lágviðnámskápuna í fyrstu en hún er svo lárétt undir Sandabotnafjalli eins og í línu 4 og nær suður að Sandabotnaskarði. Háviðnámskjarni er undir lágviðnámskápunni og rís hæst í A5.

**Lína 6** (mynd 7) liggur NNA-SSV um 1 km austan við línu 5. Lágviðnámskápan hefur sömu lögun og í línu 5 en hér er um 200 metrum dýpra á hana en í línu 5 og er hún öll þynnri. Í sniðunum hér á undan sést hvernig 10-30  $\Omega$  viðnám leggst utan um eða upp að lágviðnámskápunni. Í línu 6 þekur þetta viðnám lágviðnámskápuna alveg. Undir lágviðnámskápunni er háviðnámskjarni.

**Lína 7** (mynd 8) er austasta sniðlínan og liggur N-S austan við Sandabotnafjall. Sniðið er komið austur fyrir hið eiginlega háhitasvæði, lágviðnámskápan sést ekki en sniðið sker 10-30 Ωm viðnámslagið sem liggur utan á henni. Lágt viðnám er ofarlega í mælingu K9322 en ekki er ljóst hvort það tengist lágviðnámskápu megin jarðhitasvæðisins eða er staðbundið. Hér er það tengt lágviðnámskápunni með fyrirvara þó.

**Lína 8** (mynd 9) er syðst 9 sniðlína með stefnu nálægt því að vera V-A. Lína 8 liggur frá Dal-fjalli, sunnan Hvíthólaklifs, austur yfir Hlíðardal og Halaskógarfjall. Austurhluti hennar byggir á niðurstöðum TEM-mælinga en vesturhlutinn á niðurstöðum úr tvívíðri túlkun Schlumberger-mælinga frá 1983. Sniðið er greinilega sunnan við sjálft háhitasvæðið. Lágviðnámskápan sést ekki en sniðið sker 10-30 Ωm lagið sem leggst gjarnan upp að henni.

**Lína 9** (mynd 10) liggur VNV-ASA um Hvíthólaklif og austur um Sandabotnaskarð. Hún er innan við 100 metra sunnan við borholur við Hvíthóla. Austurhluti línunnar sýnir niðurstöður TEM-mælinga en undir Hvíthólasvæðinu eru niðurstöður úr tvívíðu reiknilíkanum frá Schlumbergermælingum. Vestast í línunni er svo ein TEM-mæling. Sniðið sker lágviðnámskápuna en athyglisvert er að hún er ekki samfelld en slitnar undir austanverðum Hlíðardal. Um þetta verður rætt síðar. Utan um lágviðnámskápuna liggur svo 10-30 Ωm viðnámslagið og háviðnámskjarni er undir lágviðnámskápunni.

**Lína 10** (mynd 11) liggur VNV-ASA frá Dal-fjalli sunnan Þrífyrninga, yfir Hlíðardal og um suðurbrún Sandabotnafjalls, um 700-800 metrum norðan við línu 9. Hér er lágviðnámskápan sýnd samfelld nema í austustu mælingunni sem er fyrir utan sjálft jarðhitasvæðið. Undir Sandabotnafjalli er lágviðnámskápan hæst í mælingu F5 en dýpkar á hana bæði til austurs (K9324) og til vesturs (K9326). Í tvívíða líkaninu undir Hlíðardal er lágviðnám nema í austustu línunni (SL-4) og slitnar því lágviðnámskápan í þessu sniði líkt og í línu 9. Fleiri vísbendingar eru um samfellt hátt viðnám undir austanverðum Hlíðardal og vestanverðu Sandabotnafjalli og verður það rætt síðar. Háviðnámskjarni er undir lágviðnámskápunni og austan til í sniðinu leggst 10-30 Ωm viðnámslagið upp að og yfir lágviðnámskápuna.

**Lína 11** (mynd 12) liggur VNV-ASA frá Þrífyrningum, yfir Hlíðardal og Sandabotnafjall rétt sunnan við Kröfluvirkjun. Eins og í línu 10 nær sniðið austur fyrir hið eiginlega jarðhitasvæði, lágviðnámskápan sést ekki í austustu mælingunni. Undir vestanverðu Sandabotnafjalli dýpkar á lágviðnámskápuna eins og í línu 10 og er vafamál hvort tengja á lágviðnámið þar við lágviðnámið í tvívíða líkaninu undir Hlíðardal. Á milli lína 10 og 11 er viðnáms-sniðslína sem mæld var árið 1984. Um hana verður fjallað sérstaklega en niðurstöður hennar sýna hátt viðnám á þessum slóðum en lágt viðnám austan og vestan við. Í línu 11 grynkar mjög á lágviðnámið undir Hlíðardalnum. Háviðnámskjarni er undir lágviðnámskápunni.

**Lína 12** (mynd 13) liggur NV-SA frá Leirhnjúk, yfir Vítismó og um suðurhlíðar Kröflu, austur í Sandabotna. Sniðið sker virkasta hluta jarðhitasvæðisins. Lágviðnámskápan nær yfirborði í suðurhlíðum Kröflu og uppi á brekkunni ofan við Hveragil og Leirbotna. Þar sem lágviðnámið nær yfirborði rís háviðnámskjarninn hæst eða í um 500 m y.s. Austan Hrafninnuhryggjar dýpkar á lágviðnámskápuna og hún sést ekki í austustu mælingunni. Í vestustu mælingunni A1 við Leirhnjúk er lágviðnámskápan á aðeins 50 metra dýpi (500 m y.s.) og háviðnámskjarninn í 400 m y.s.

**Lína 13** (mynd 14) liggur V-A frá suðurenda Leirhnjúks, eftir brekkubrún ofan Leirbotna, efst í suðurhlíðum Kröflu og austur yfir norðurenda Hrafninnuhryggs. Snið 12 og 13 skerast í mælingu A4, suðvestan í Kröflu. Lágviðnámskápan nær yfirborði SV við Kröflu og þar nær hávið-

námskjarninn 500 m y.s. Austan Kröflu dýpkar hratt á lágviðnámskápuna og í mælingu K9311 við Hrafninnuhrygg er hún á 600 metra dýpi (50 m y.s.). Í mælingu K9322, sem er austasta mælingin er lágviðnám ofarlega og er það hér tengt lágviðnámskápunni. Það er hins vegar ekki ljóst hvort það er rétt, en engar mælingar eru til þess að skera úr um hvort lágviðnámskápan teygir sig þarna til austurs eða hvort þetta er staðbundið lágviðnám.

**Lína 14** (mynd 15) liggur VNV-ASA, norðan Leirhnjúks, yfir Vítismó og í norðurhlöðum Kröflu. Lágviðnámskápan nær yfirborði í A3 vestan Kröflu en steypist niður undir Kröflu og er horfin í B5 austan við Kröflu. Undir Vítismó er lágviðnámskápan miklu þykkari en sést hefur í sniðunum á undan, sem bendir til þess að sniðið skeri hana þar sem hún er á niðurleið til norðurs.

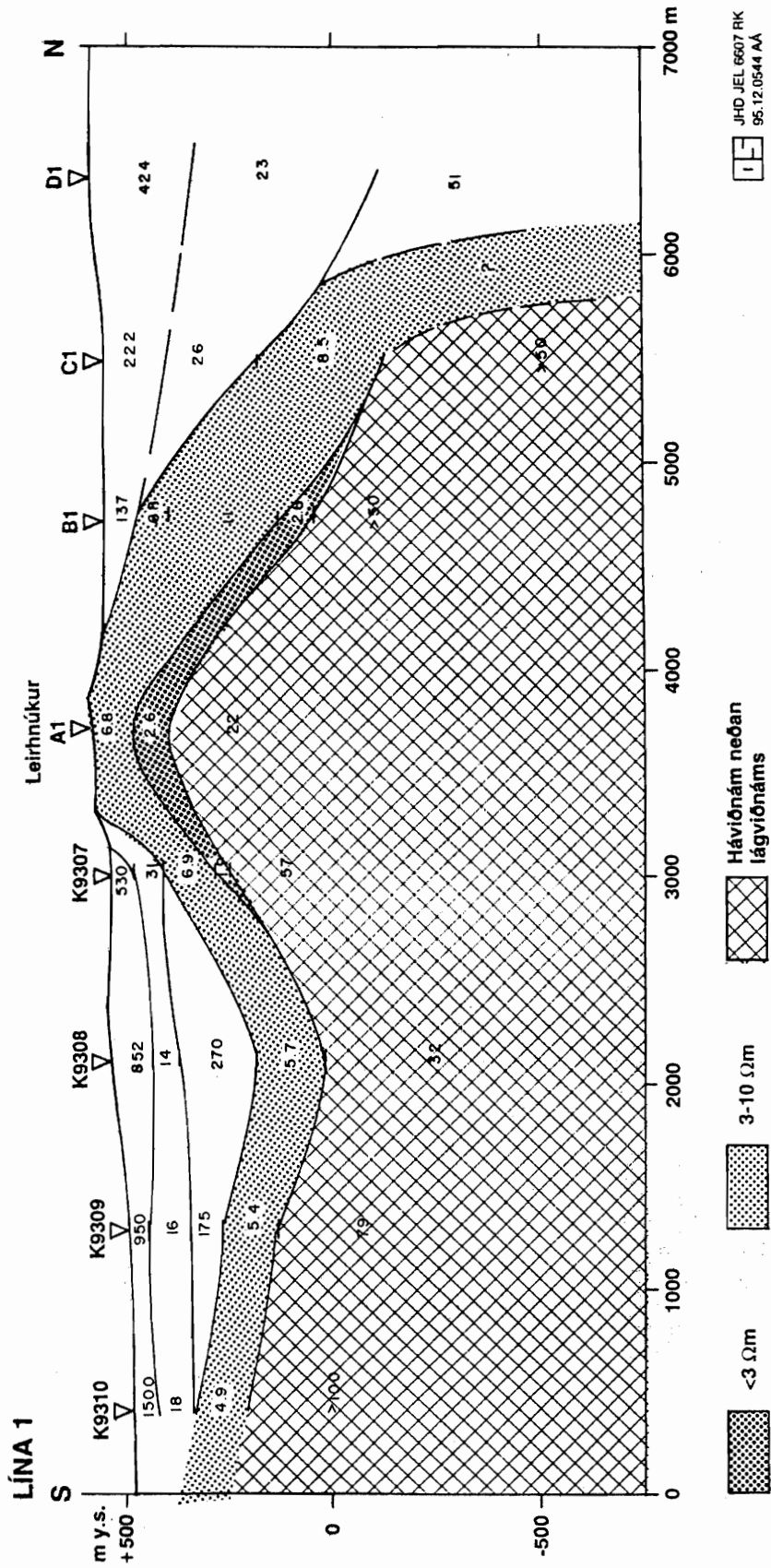
**Lína 15** (mynd 16) liggur samsíða línu 14, 700-800 metrum norðar. Hún sneiðir aðeins utan í lágviðnámskápuna og háviðnámskjarnann vestan til í sniðinu en sýnir hátt viðnám eins djúpt og mælingarnar skynja í NA-hluta öskjunnar.

**Lína 16** (mynd 17) liggur samsíða línu 15, frá Rauðkollu og undir hlöðum Graddabungu, austur undir Hágöng. Sniðið er nokkurnveginn á NA jaðri öskunnar og sýnir ekki lágt viðnám. Hér virðist því vera komin norður fyrir jarðhitasvæðið.

**Lína VS-4** (mynd 18) liggur NV-SA frá því S við Þrífyrningadal, yfir Hlíðardalinn og um Sandabotnaskarð. Þetta snið byggir eingöngu á viðnáms-sniðsmælingum og er lengd mælingunnar 2450 metrar. Hún var öll mæld með 250m straumarmi, 2200 metrar með 500m straumarmi og 1775 metrar með 750m straumarmi. Niðurstöður hennar staðfesta það sem fram kom í línu 9 og línu 10 og lýst hefur verið hér að framan. Lágviðnám er undir Hlíðardalnum og grynkar á það til vesturs. Lágviðnám er einnig undir Sandabotnaskarði en tengist ekki lágviðnáminu undir Hlíðardal og herra viðnám er undir vestanverðu Sandabotnafjalli.

**Lína VS-5** (mynd 19) liggur V-A frá S-enda Þrífyrningadals, yfir Hlíðardal og Sandabotnafjall um 600 metrum sunnan við Kröfluvirkjun. Eins og VS-4 byggir sniðið eingöngu á viðnáms-sniðsmælingum og er lengd línunnar 2250 metrar. Hún er öll mæld með 500 m straumarmi og 1675 metrar með 750 m straumarmi. Undir Hlíðardal er lágviðnám og grynkar á það til vesturs og einnig er lágviðnám undir Sandabotnafjalli. Undir vestanverðu Sandabotnafjalli kemur ekki fram lágt viðnám og er það í samræmi við niðurstöður annarra viðnámsmælinga á þessum slóðum.

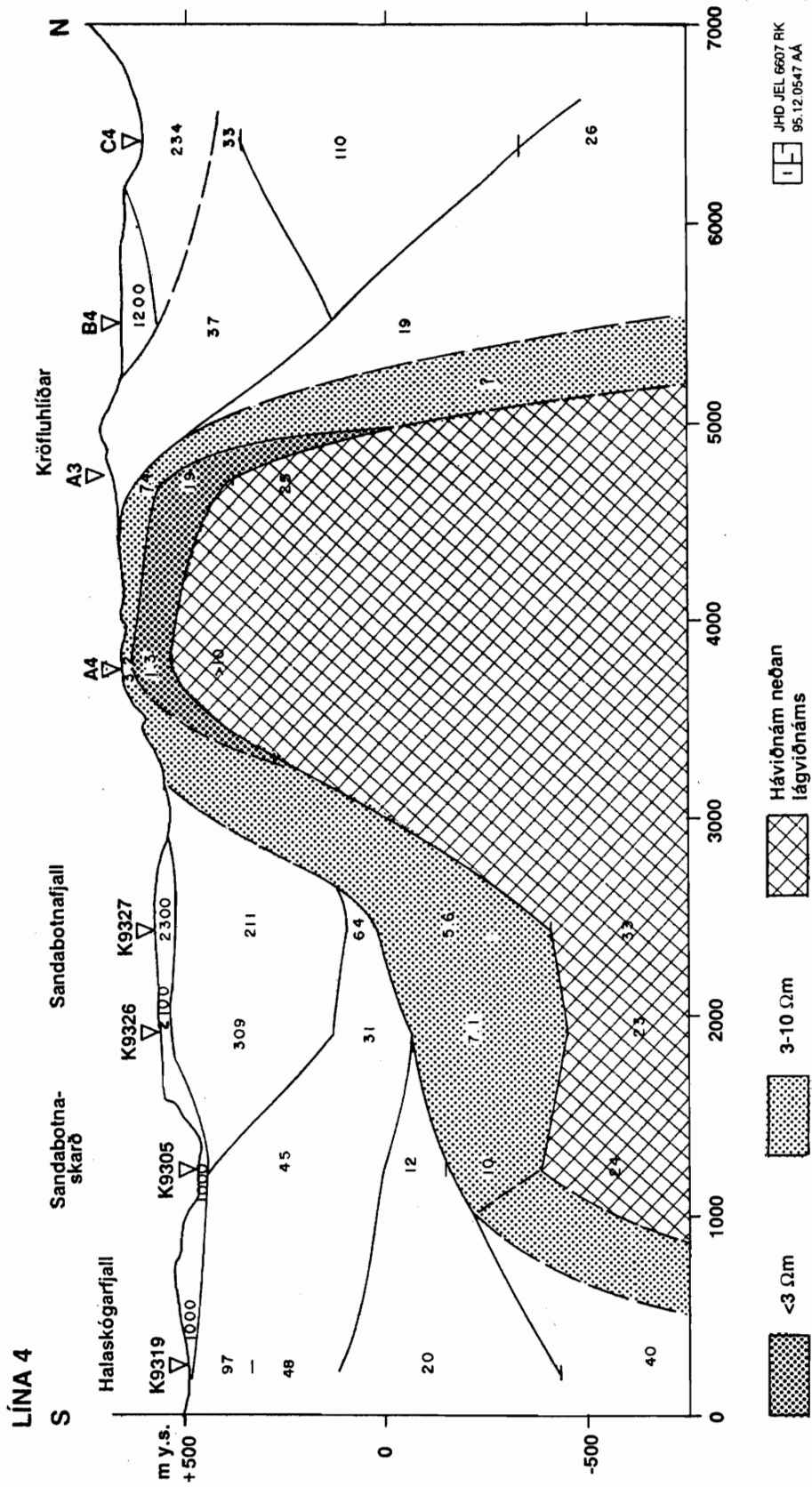
Mynd 2. Viðnámssnið eftirl ífnu-1.





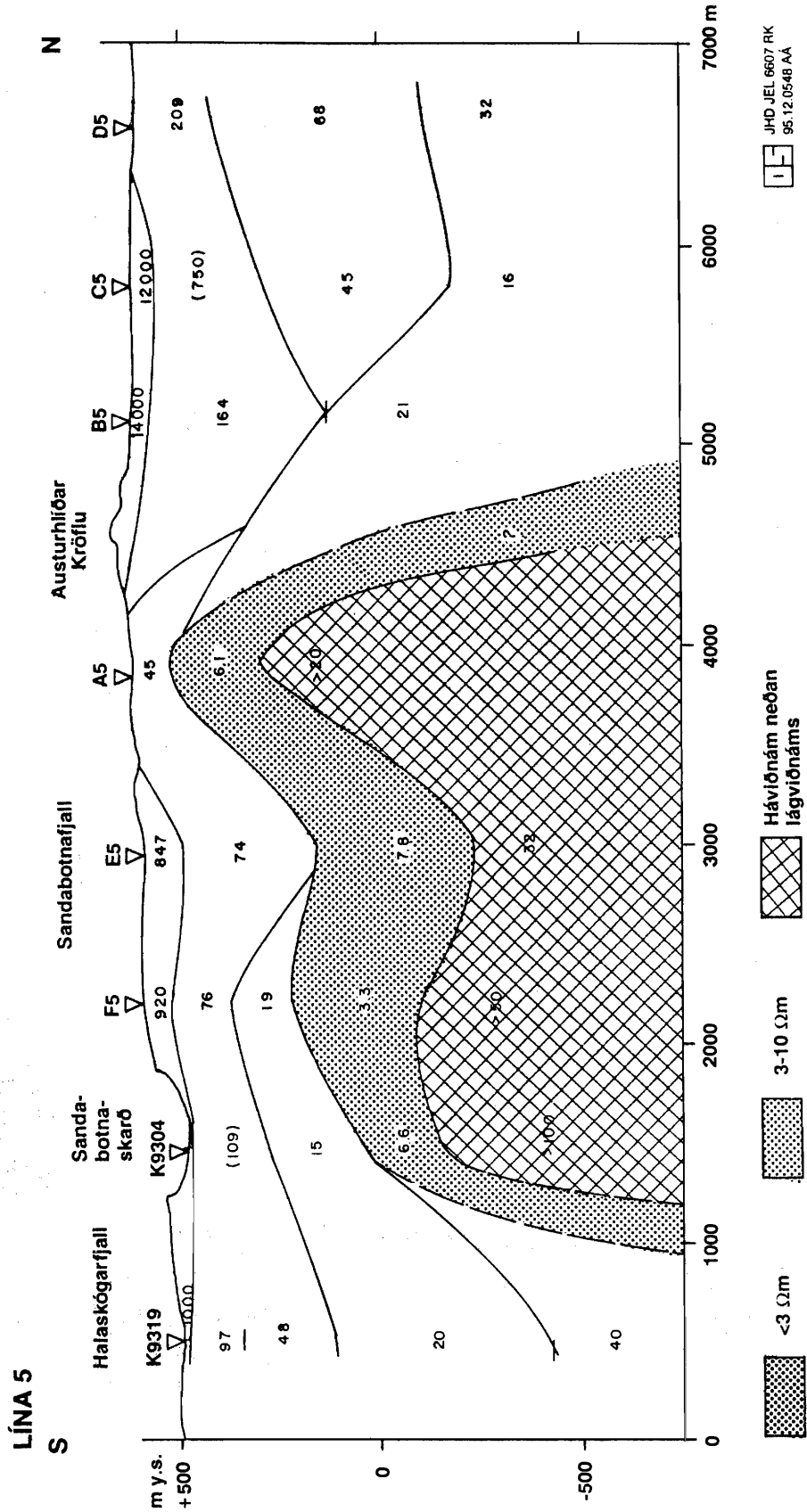


Mynd 5. Viðnámssnið eftirlínu-4.

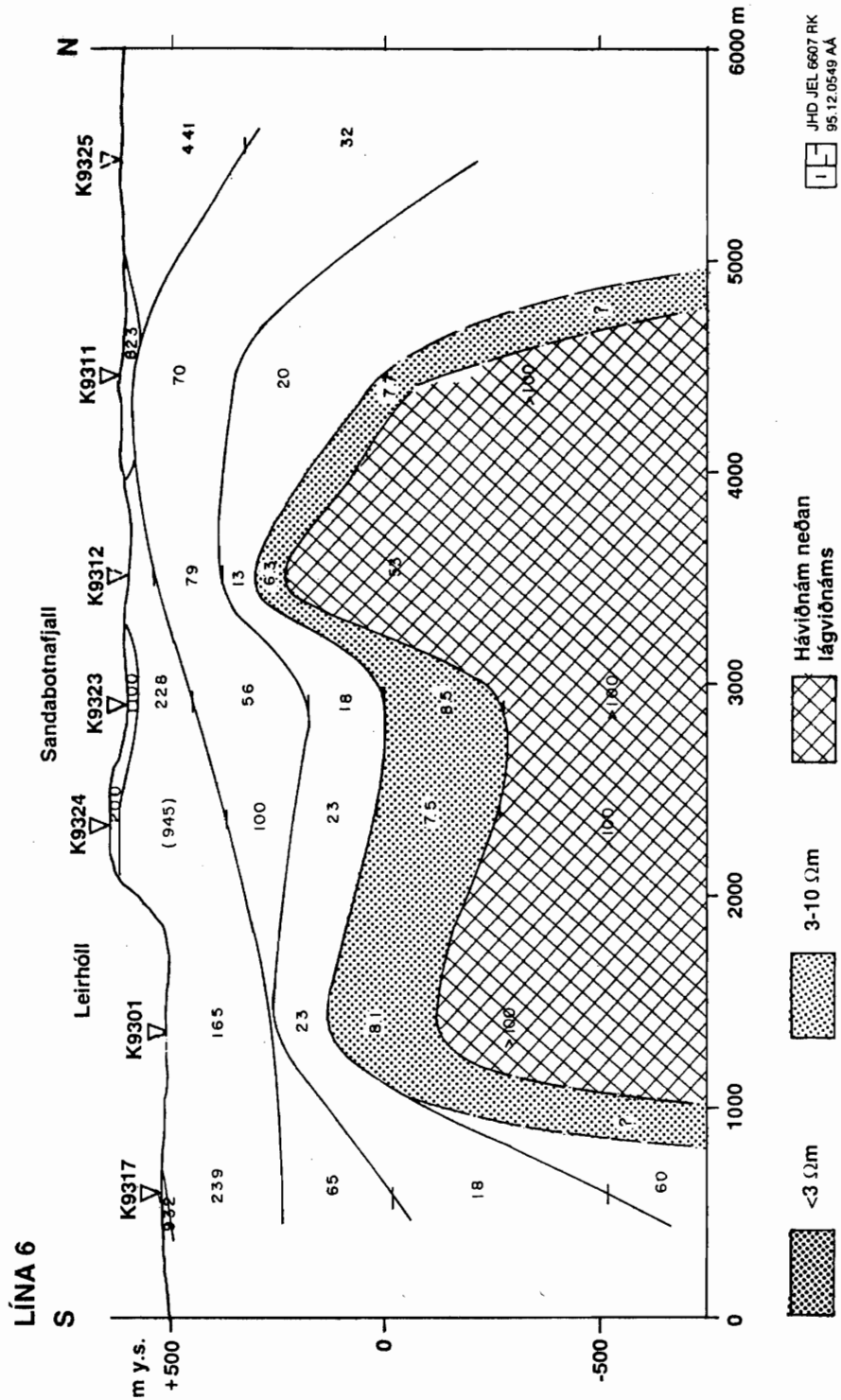




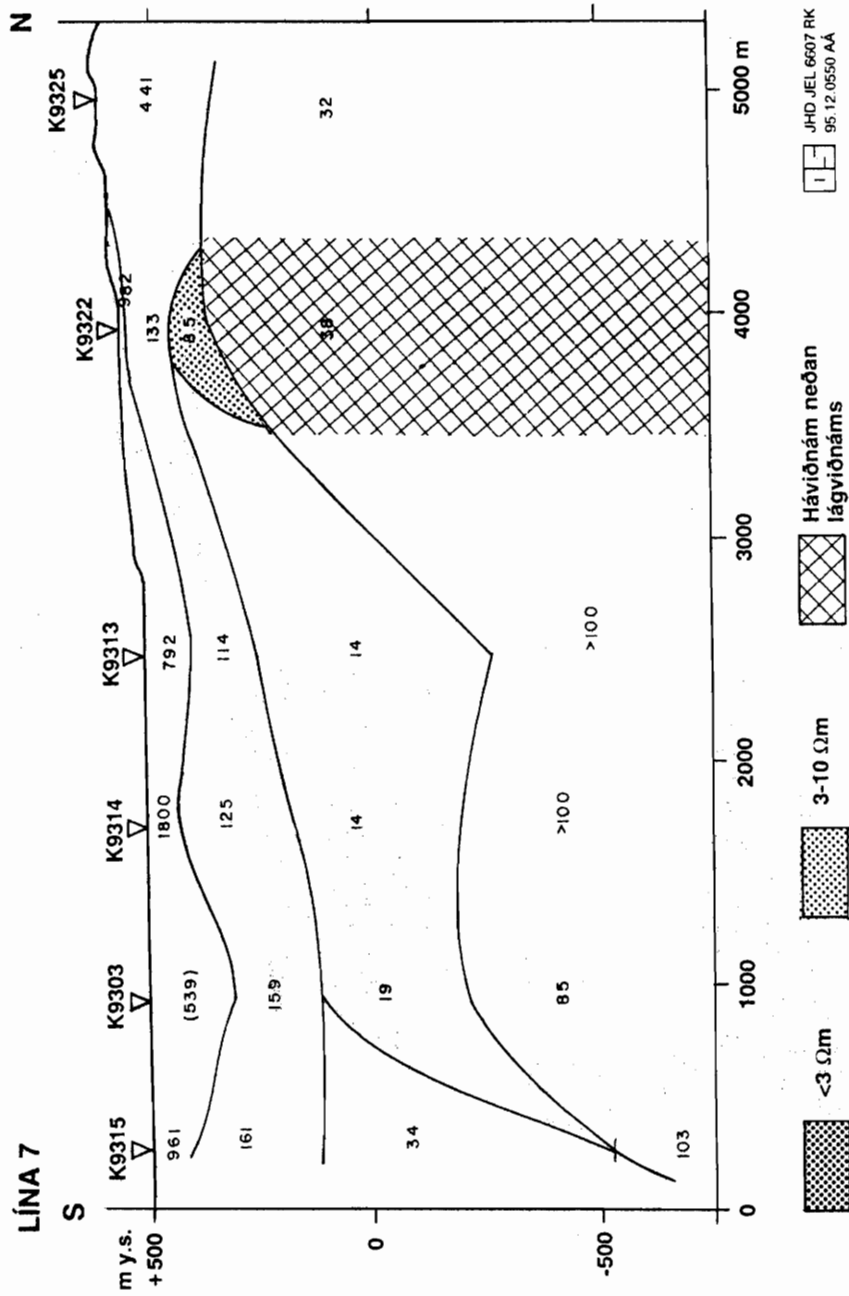
Mynd 6. Viðnámssnið eftirlínu-5.



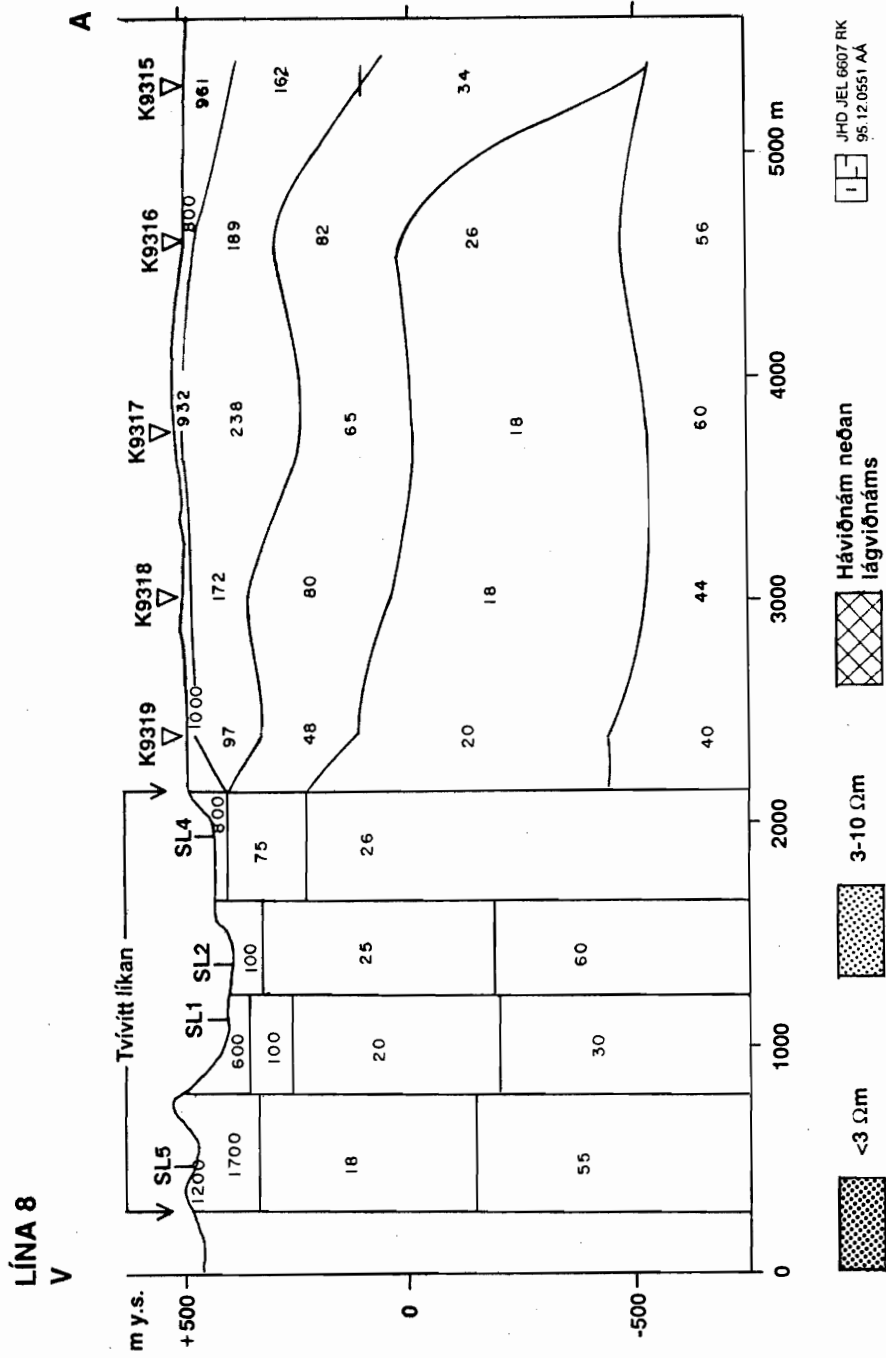
Mynd 7. Viðnámsnið eftirlínu-6.



Mynd 8. Viðnámssnið eftirlínu-7.

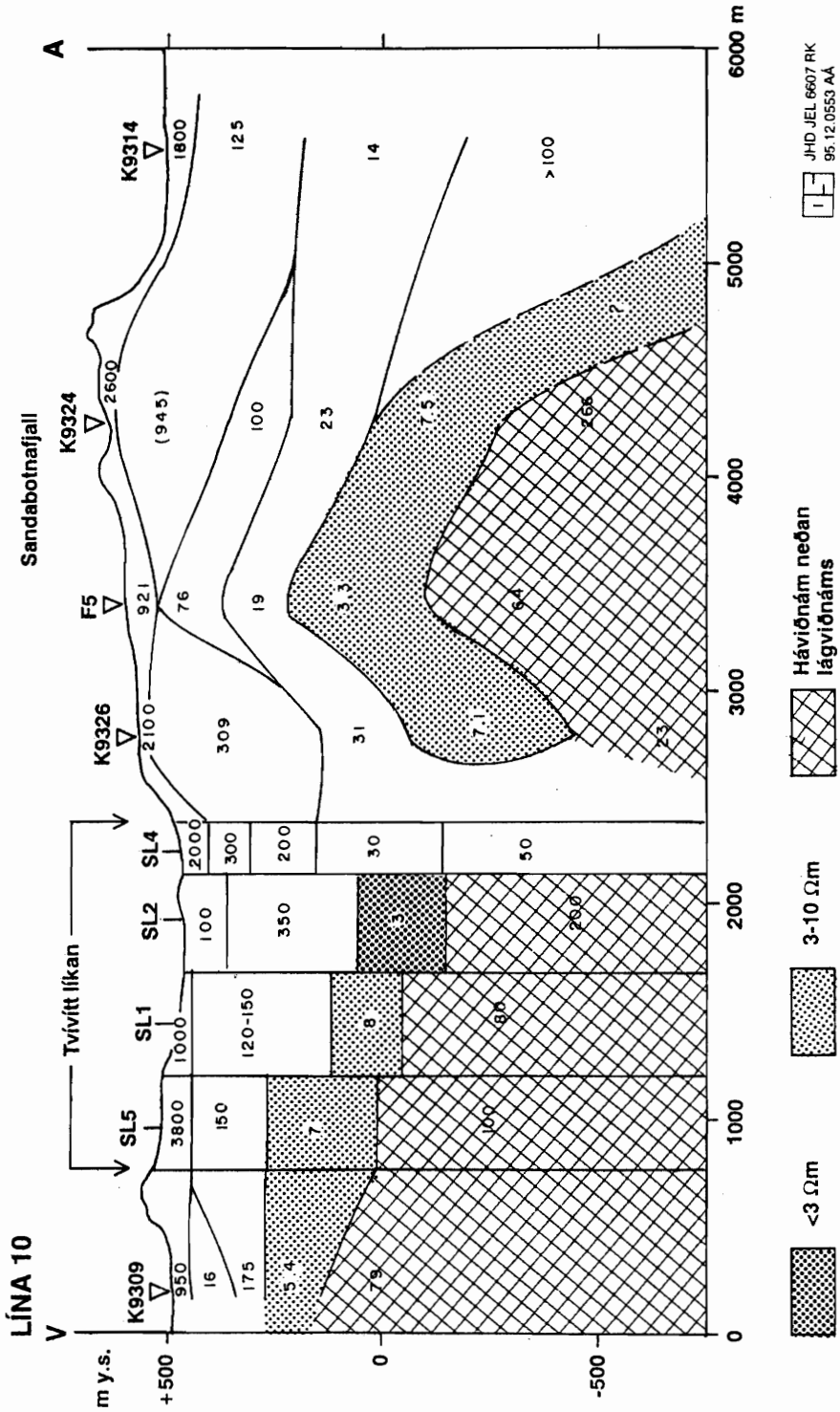


Mynd 9. Viðnámssnið eftirl línu-8.

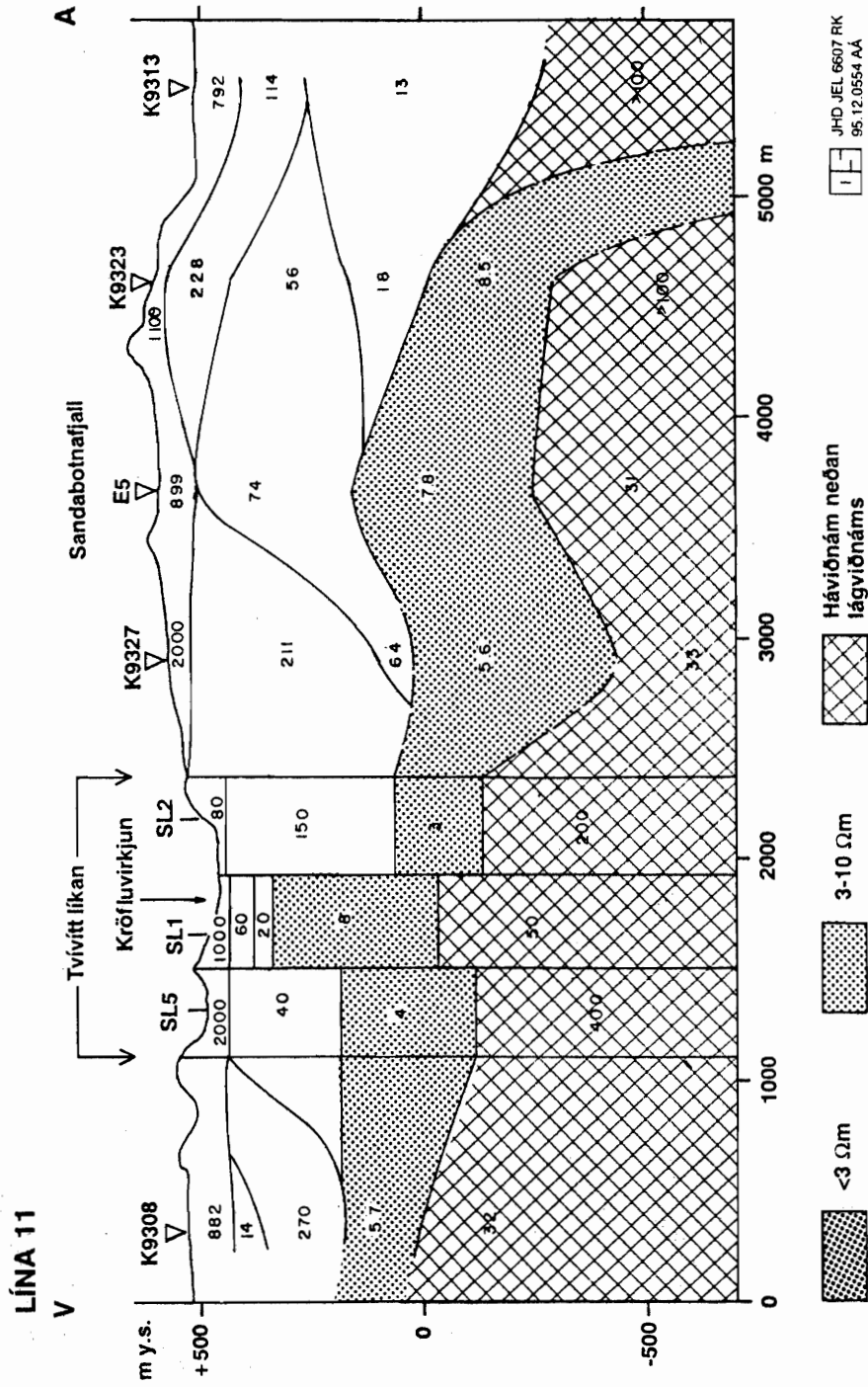




Mynd 11. Viðnámssnið eftirlínu-10.



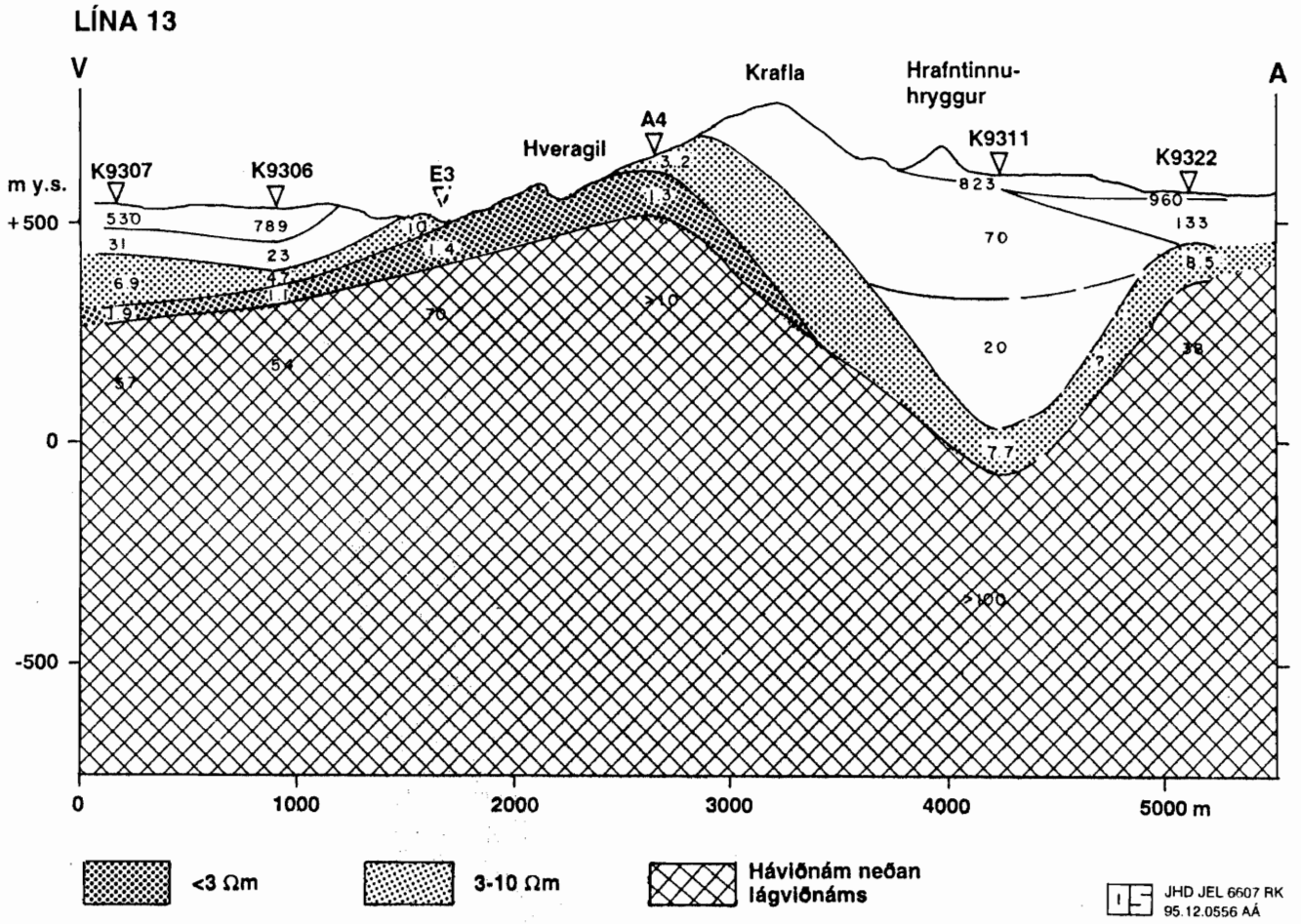
Mynd 12. Viðnámssnið eftirlínu-11.



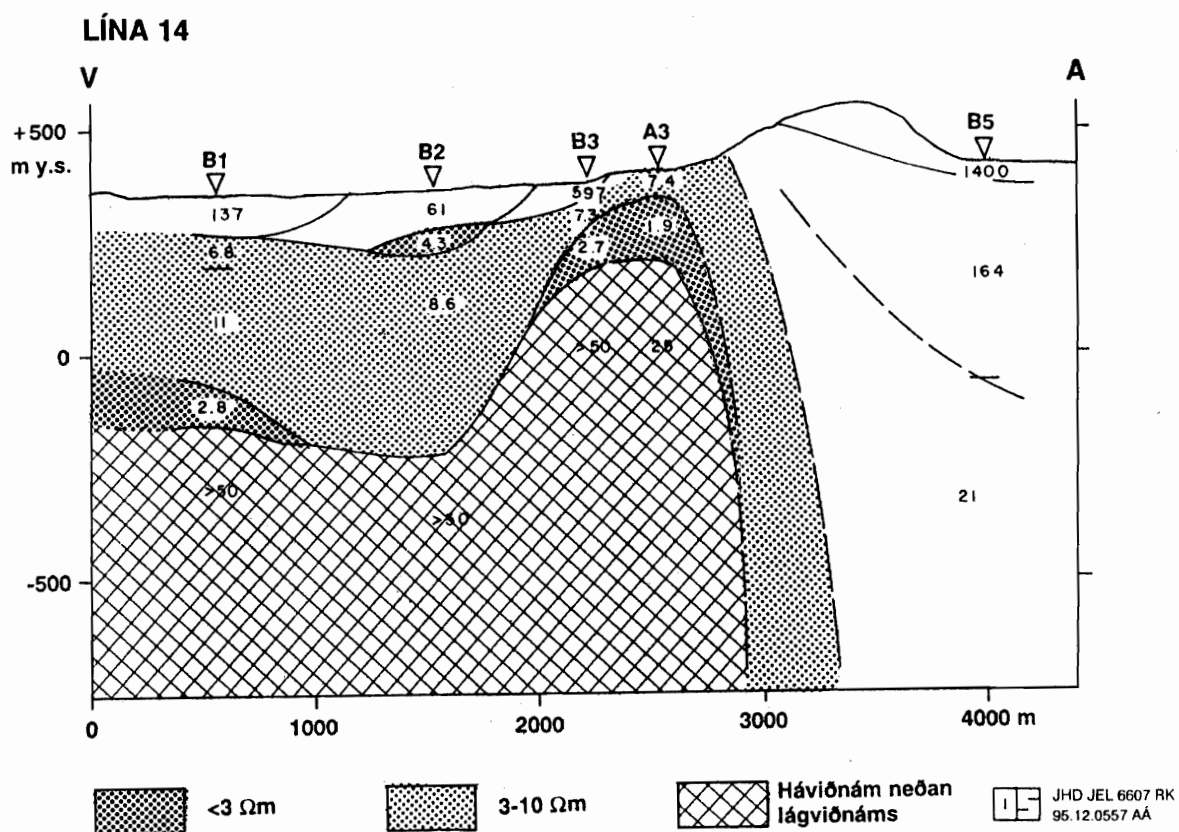




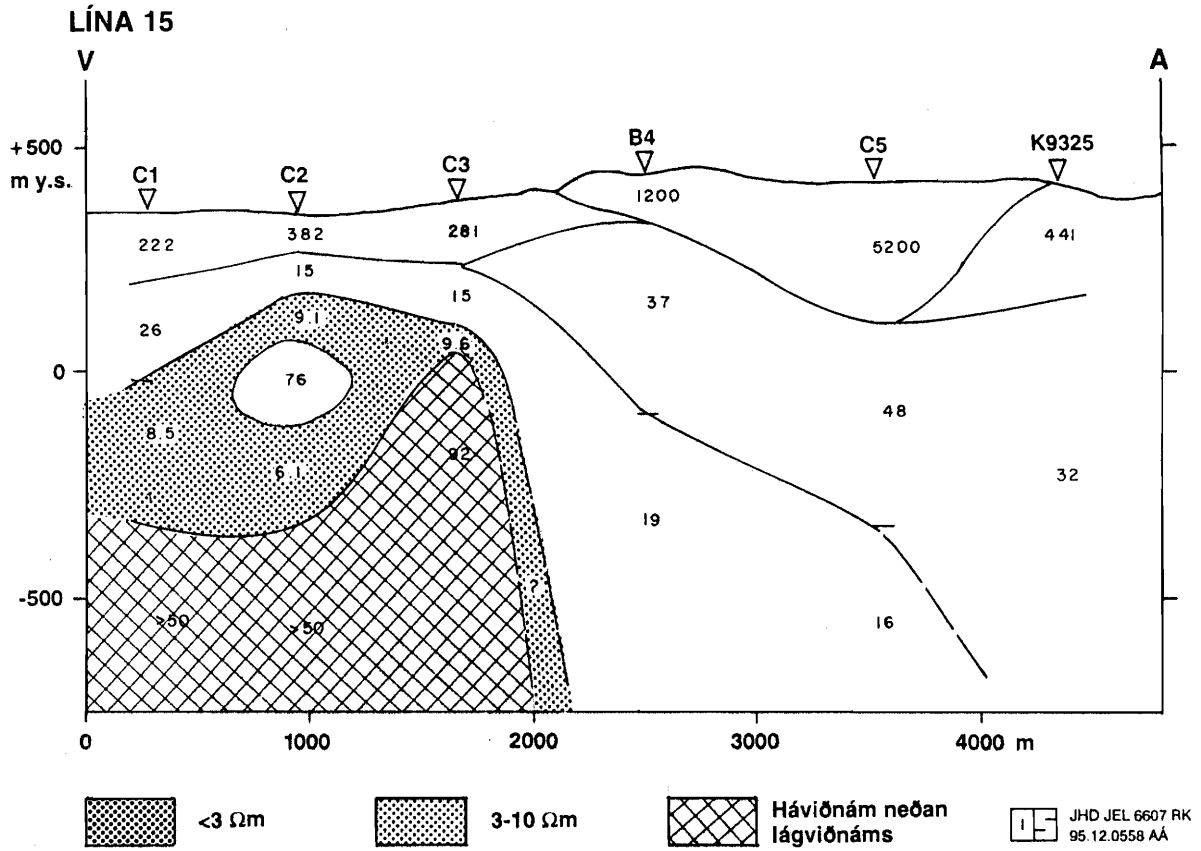
Mynd 14. Viðnámssnið eftirl ífnu-13.



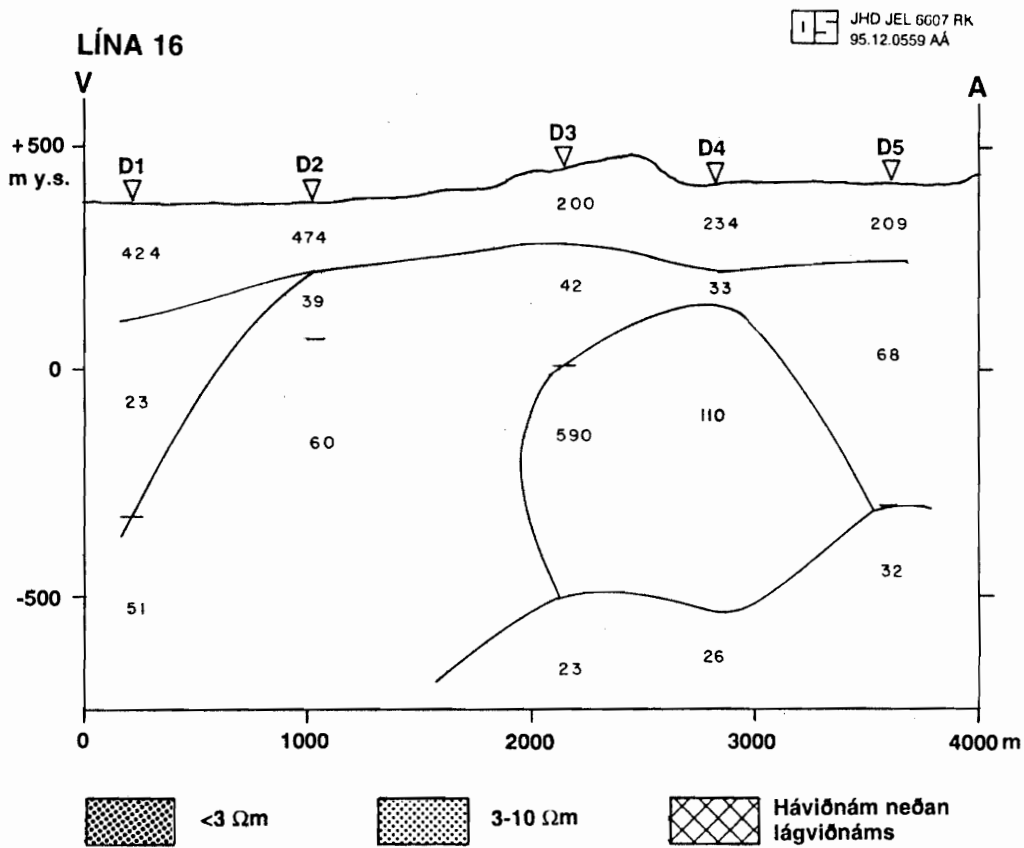
Mynd 15. Viðnámsnið eftirl línu-14.



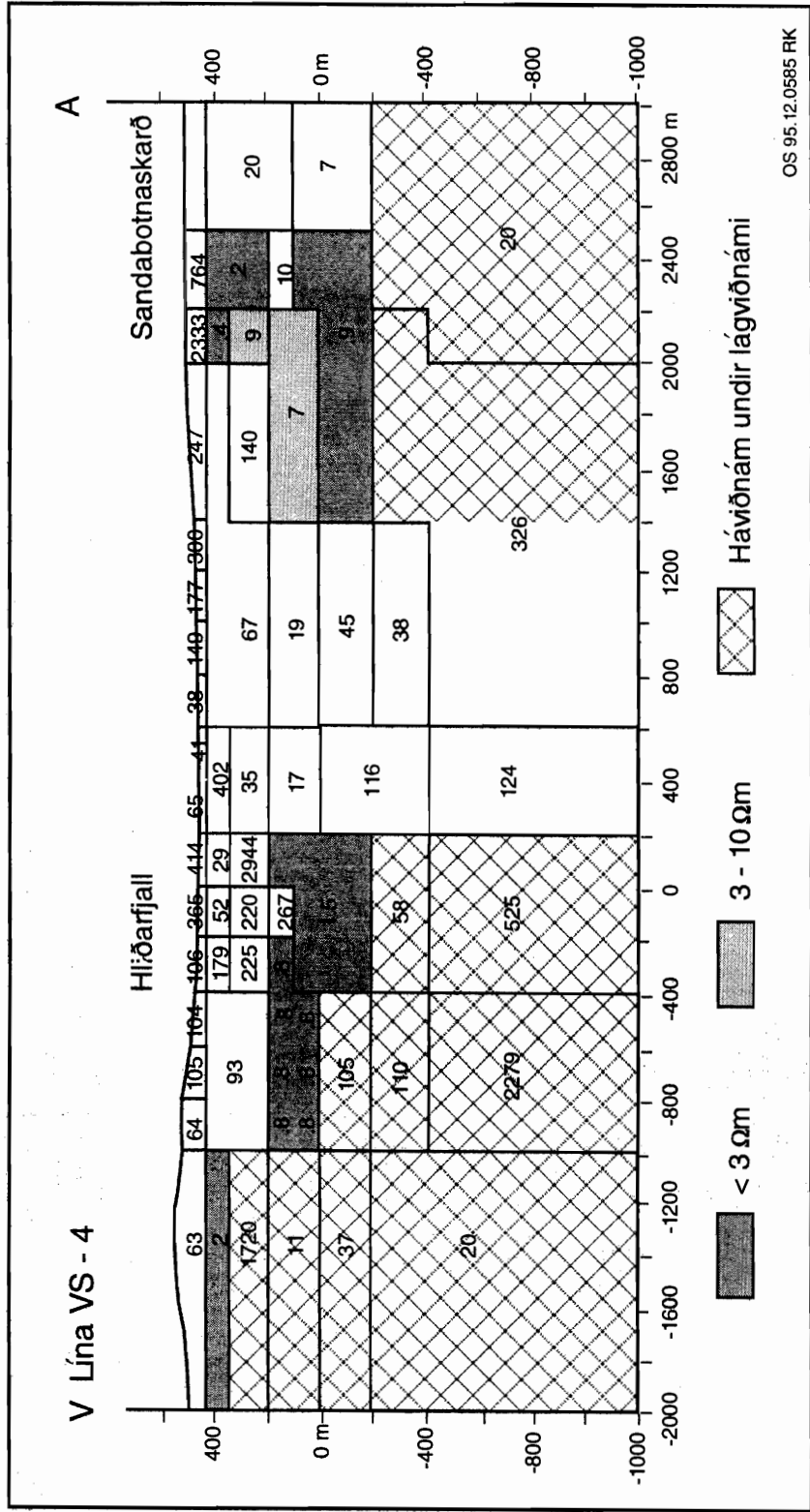
Mynd 16. Viðnámssnið eftirl í línu-15.



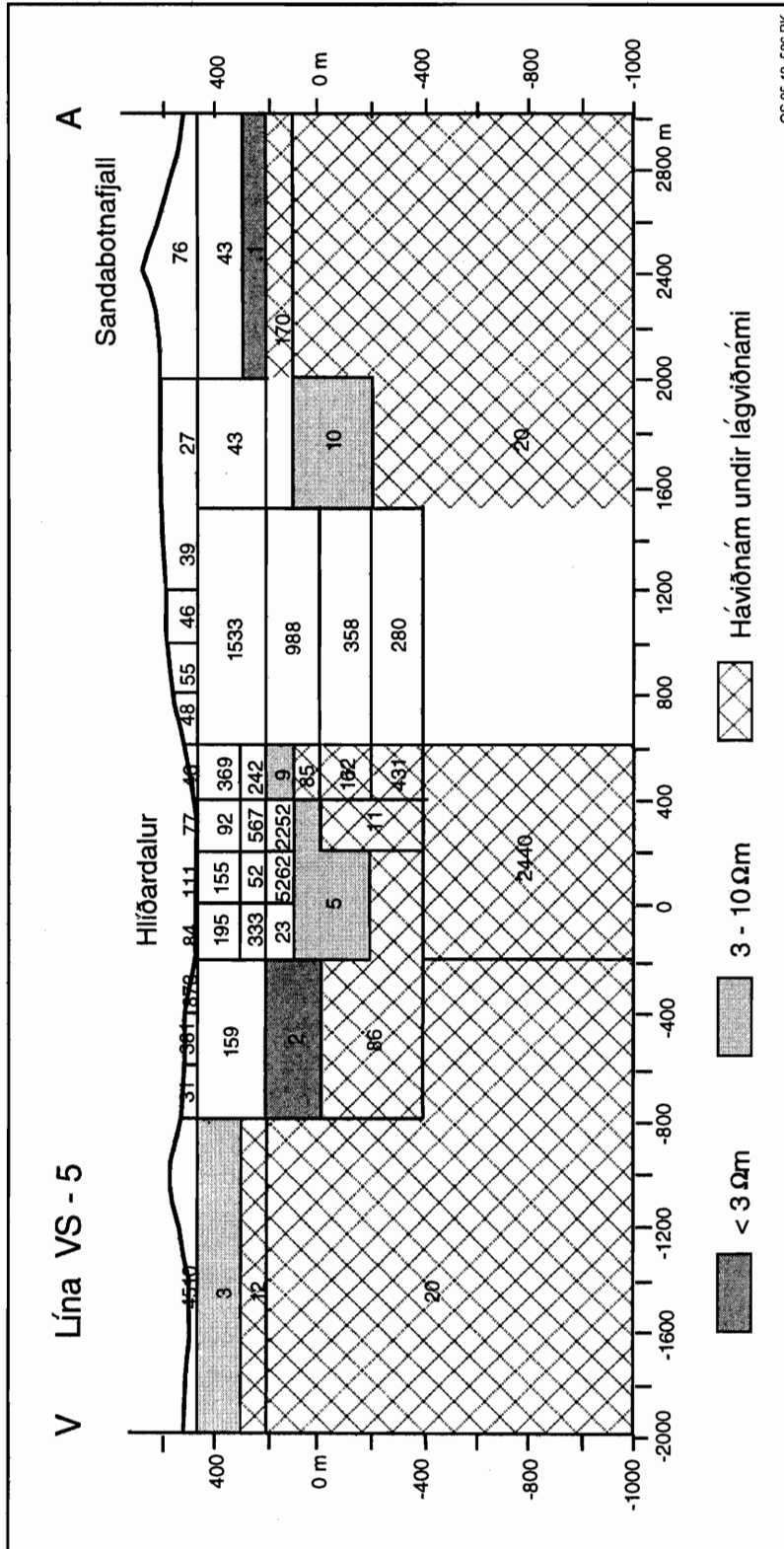
Mynd 17. Viðnámssnið eftirl línu-16.



Mynd 18. Viðnámssnið eftirl VS-4.



Mynd 19. Viðnámssnið eftirl VS-5.



## 5.2 Jafnviðnámskort

Alls eru birt hér 15 jafnviðnámskort af austurhluta Kröfluöskjunnar. Eins og áður segir eru kortin tölvuunnin. Tölvuforrit er látið lesa viðnámslíkön, eitt undir hverri dýptarmælistöð, ásamt staðsetningu mælinganna. Fyrir viðnámskort á ákveðnu dýpi les forritið staðsetningu mælingar svo og viðnámsgildi úr líkani á þessu ákveðna dýpi. Stafræna kortakerfið ARC/INFO er síðan notað til að gera jafnviðnámskort út frá þessum upplýsingum og teikna ofan á grunnkort. Slík stafræn kortagerð hefur marga kosti umfram eldri aðferðir. Í fyrsta lagi er að jafnaði fljótlegra að vinna kort á þennan hátt. Í öðru lagi eru kort sem þannig eru unnin á stöðluðu formi og geymd í tölvu þannig að auðvelt er síðar að setja þau fram ásamt öðrum upplýsingum sem unnar eru á sama hátt. Í þriðja lagi eru kort, sem unnin eru með þessu móti, hlutlaus framsetning á gögnum og án huglægs mats þess sem kortið gerir.

Til að fá forritið sem dregur jafnviðnámslíunurnar til að greina að hátt viðnám neðan lágviðnáms og hátt viðnám nærri yfirborði og utan jarðhitasvæðisins, er beitt því ráði að gefa háu viðnámi neðan lágviðnáms neikvætt gildi. Þetta kann að virðast einkennilegt, en tilfellið er að viðnámsgildi neðan jarðlaga með lágu viðnámi eru illa ákvörðuð og þau gildi, sem fram koma við túlkun mælinganna, sýna yfirleitt einungis stærðargráðu viðnámsgildanna. Ástæða er hinsvegar til að greina á milli hvort hátt viðnám er neðan meðallágs viðnáms eða mjög lágs viðnáms. Háu viðnámi neðan viðnáms lægra en 10  $\Omega$ m er gefið gildið -22, en háu viðnámi neðan viðnáms á bilinu 10-30  $\Omega$ m er gefið gildið -7. Þetta hefur það í för með sér að hátt viðnám neðan lágviðnáms er, á jafnviðnámskortunum, alltaf aðgreint frá háu viðnámi í köldu bergi með svæði þar sem viðnám er sýnt lægra en 10  $\Omega$ m, þó svo að í stöku mælingu sem sýnir hátt viðnám neðan lágviðnáms komi ekki fram svo lágt viðnámsgildi. Þetta undirstrikar ennfrekar að jafnviðnámskortin eru sjálfstæð framsetning á niðurstöðum viðnámsmælinganna og ekki endilega í samræmi við viðnámsniðin.

Til að fá sem gleggsta mynd af viðnámsdreifingunni og breytingum með dýpi eru birt jafnviðnámskort með 50 m dýptarbili frá 500 m hæð yfir sjó og niður á 100 m neðan sjávarmáls og síðan á 200 og 300 m neðan sjávarmáls. Hér á eftir verður fjallað stuttlega um jafnviðnámskortin, hvert um sig, og dregin fram áhugaverðustu atriðin.

**500 m ofan sjávarmáls** (mynd 20) er viðnám hærra en 100  $\Omega$ m á stærstum hluta mælisvæðisins (reyndar er land á nokkrum hluta svæðisins lægra en 500 m yfir sjó). Ofan 500 m hefur þó komið fram lágt viðnám (< 5  $\Omega$ m) frá suðurhlíðum Kröflu og norðvestur á Vítismó og einnig við Leirhnjúk. Eins og sást á sniðunum, nær lágt viðnám víða á þessum slóðum alveg til yfirborðs. Lágt viðnám nær vel norður fyrir Víti og virðist teygja sig þaðan til austurs að norðurhlíðum Kröflu. Þegar er farið að koma fram hátt viðnám undir lágu frá Hveragili og að suðurhlíðum Kröflu og eins undir Leirhnjúk. Viðnámsfrávikið (viðnám lægra en 10  $\Omega$ m og hátt viðnám undir lágu) sýnir efsta hluta jarðhitakerfisins, sem nær upp fyrir 500 m hæð yfir sjó. Hér má strax sjá áberandi NV-SA læga stefnu í viðnámsfrávikinu.

**450 m ofan sjávarmáls** (mynd 21) hefur viðnámsfrávikið breitt nokkuð úr sér, einkum við Leirhnjúk og á Vítismó og einnig er lágt viðnám farið að teygja sig frá Hveragili í átt að Leirbotnum. Meðallágt viðnám teygir sig til austurs frá Grænagili, austur yfir Hrafninnuhrygg og að austurjaðri öskjunnar, þar sem fram kemur lágt viðnám (um 9  $\Omega$ m). Við Leirhól kemur líka fram á þessu dýpi staðbundið meðallágt viðnám.

**400 m ofan sjávarmáls** (mynd 22) er hátt viðnám neðan lágviðnáms farið að teygja sig lengra til NV undir Vítismó, en nær þó ekki að tengjast háviðnámskjarnanum undir Leirhnjúk á þessu

dýpi. Meðallágt viðnám teygir sig til norðurs vestan við Graddabungu. Einnig er meðallágt viðnám á vesturjaðri mælisvæðisins undir Þrífyrningum og til SV um Leirhnjúkshraun. Þetta er meðallágt millilag með hærri viðnámi bæði fyrir ofan og neðan eins vel sést á sniði línu 1 (mynd 2), enda er hátt viðnám á þessum slóðum 350 og 300 m ofan sjávarmáls. Loks kemur hér fram staðbundið meðallágt viðnám við suðurjaðar öskjunnar, annarsvegar frá Hvíthólum og í átt að Halaskógafjalli og hinsvegar við Leirhól. Þetta meðallága viðnám er að mestu hangandi, þ.e. með hátt viðnám bæði fyrir ofan og neðan, eins og sést á viðnámsniði línu 9 (mynd 10) enda kemur aftur fram hátt viðnám á þessum stöðum 50 m neðar (mynd 23), nema undir Hvíthólum. Þessi hangandi lög endurspeglar trúlega lárétt rennsli eftir lekum lögum út frá staðbundnum uppstreymisrásum.

**350 m ofan sjávarmáls** (mynd 23) hefur hátt viðnám neðan lágviðnáms breitt enn frekar úr sér, bæði til norðurs frá Víti og til suðurs undir Leirbotna. Háviðnámið hefur einnig breiðst út austan Leirhnjúks, en er þó ekki fyllilega tengt við háviðnámskjarnan vestan Kröflu. Hátt viðnám neðan lágviðnáms er nú komið fram við austurjaðar öskjunnar, austan við Hrafninnuhrygg og viðnámsfrávikíð þar er nú tengt meginfrávikinu með lágu viðnámi vestur um Hrafninnuhrygg og suðurhlíðar Kröflu. Undir suðurbrún Sandabotnafjalls, NV af Leirhól er komið fram meðallágt viðnám. Það sem ef til vill er athyglisverðast við þetta kort, og sem einnig sást á kortinu 400 m ofan sjávarmáls, er að ofan 350 m (þ.e. niður á um 200 m dýpi) er skarð í háviðnámskjarnann undir Vítismó. Eins og sést á mynd 23 hefur þetta skarð sömu stefnu og ríkjandi sprungur. Þetta verður ekki túlkað á annan hátt en þann að þar sé kaldara en beggja vegna. Skarðið í háviðnámskjarnann er á svæði þar sem mikið er af opnum sprungum á yfirborði. Líklegast er að á þessum slóðum renni tiltölulega kalt grunnvatn eftir sprungum, sem heldur jarðhitavirkninni að einhverju leyti niðri, að minnstakosti í efstu 200-300 metrunum. Þetta rof í háviðnáminu er norðan og vestan við holurnar uppi á brekkunni, en í holunum KJ-11, KG-10, KW-2 og KG-25, sem raða sér nokkurn veginn á línu samsíða skarðinu í háviðnámið, en nokkuð austar, virðist vera lægri hiti neðan 100-200 m ofan sjávarmáls en í holunum í kring. Þetta gæti verið í samhengi við skarðið í háviðnámskjarnann sem fram kemur í jafnviðnámskortunum.

**300 m ofan sjávarmáls** (mynd 24) er háviðnámskjarninn orðinn samfelldur frá svæðinu vestan og norð-vestan Kröflu og að Leirhnjúk. Meðallágt viðnám er hér farið að teygja sig lengra til NA frá Leirhnjúk. Syðst og vestast á mælisvæðinu, vestur af Hvíthólaklifi, er farið að koma fram lágt viðnám ( $< 5 \Omega$ ), en á þessum slóðum eru gufuaugu í hrauninu. Háviðnámskjarninn við austurjaðar öskjunnar er orðinn meira áberandi en er þó ekki tengdur háviðnámskjarnanum milli Kröflu og Leirhnjúks, heldur er á milli þeirra rás með viðnámi á bilinu 5-10  $\Omega$ . Hóla KJ-18 er einmitt á þeim stað og hitamælingar í holunni sýna að þar er verulega lægri hiti, en í holunum vestar. Þetta er í góðu samræmi við niðurstöður viðnámsmælinganna, sem ekki verða túlkaðar öðruvísi en þarna sé verulega lægri hiti en bæði vestan- og austanvið. Hér er farið að verða verulega áberandi, sem reyndar var einnig farið að sjást á jafnviðnámskortinu 350 m ofan sjávarmáls, að meginviðnámsfrávikíð hefur VNV-ASA stefnu og þó einkum suðurmörk þess. Þetta helst í meginráttum svo niður að sjávarmáli, eða um 500 m dýpi, og bendir eindregið til þess að útbreiðsla jarðhitans í austurhluta öskjunnar stjórnist, á þessu dýptarbili af brotum með VNV-ASA-læga stefnu. Misgengi með þessa stefnu sést í suðurhlíðum Kröflu og einnig sjást sprungur með sömu stefnu í Dalfjalli, ofan við skemmur Kröfluvirkjunar, og loks verða skörp skil í ummyndun á yfirborði í Leirhnjúk um línu með VNV-ASA stefnu. Að öðru leyti sjást ekki merki um þessa sprungustefnu á yfirborði.



**250 m ofan sjávarmáls** (mynd 25) hefur hátt viðnám neðan lágviðnáms teygst sig nokkuð lengra til norðurs, norðan við Víti og lágviðnáms svæðið syðst og vestast á mælisvæðinu er orðið nokkuð útbreiddara. Meðallágt viðnám er einnig farið að teygja sig til suðurs frá suðurbrún Sandabotnafjalls. Að öðru leyti er viðnámsdreifingin svipuð og 300 m ofan sjávarmáls.

**200 m ofan sjávarmáls** (mynd 26) er orðið samfelt hátt viðnám undir lágu frá austurbrún öskjunnar við Sandabotna, NV um suðurhlíðar Kröflu og í Lerihnúk. Einnig er farið að koma fram hátt viðnám neðan lágviðnáms í Leirhnjúkshrauni vestur af Hvíthólaklifi. Loks er farið að sjást lágt viðnám (< 5  $\Omega$ m) undir suðurbrún Sandabotnafjalls, NV af Leirhól.

**150 m ofan sjávarmáls** (mynd 27) er farið að koma fram lágt viðnám undir og SV við Þrífyrninga. Einnig sést meðallágt viðnám kringum Leirhól og eins frá sunnanverðum Hrafninnuhrygg og til austurs. Að öðru leyti er viðnámsdreifingin svipuð og 200 m ofan sjávarmáls.

**100 m ofan sjávarmáls** (mynd 28) kemur fram lágt viðnám undir vestanverðum Hlíðardal og suður í Hvíthóla. Einnig er farið að koma fram lágt viðnám austan við Leirhól og lágviðnáms tunga er farin að teygja sig frá viðnámsfrávikinu sunnan Kröflu, suður með vestanverðum Hrafninnuhrygg að suðurbrún Sandabotnafjalls. Að öðru leyti er viðnámsdreifingin svipuð og 150 m ofan sjávarmáls, nema hvað lágt viðnám teygir sig nokkuð lengra norður undir Vítismó, NA Leirhnjúks, og hátt viðnám neðan lágviðnáms hefur breiðst frekar til norðurs, vestan við Hvíthólaklif.

**50 m ofan sjávarmáls** (mynd 29) er viðnámsdreifingin svipuð og 100 m ofan sjávarmáls, nema hvað fram kemur verulega lágt viðnám undir Hlíðardal og einnig hefur lágt viðnám við Leirhól breiðst nokkuð út.

**Við sjávarmál** (mynd 30) eru þær breytingar helstar að viðnám lægra en 10  $\Omega$ m er orðið all útbreitt undir SA-verðu Sandabotnafjalli og austurhluta Sandabotnaskarðs. Einnig hefur lágt viðnám teygst sig nokkuð suður fyrir Grænagil og suður undir vestanvert Sandabotnafjall, en niður undir þetta dýpi hafa verið greinileg viðnámskil við Grænagil. Ennfremur er nú orðið samfelt hátt viðnám neðan lágviðnáms undir Leirhnjúkshrauni.

**50 m neðan sjávarmáls** (mynd 31) er sú breyting helst að nú er komið fram hátt viðnám neðan lágviðnáms undir Hlíðardal. Ennfremur hefur viðnám lækkað til suðurs, sunnan við austanvert Sandabotnaskarð.

**100 m neðan sjávarmáls** (mynd 32) er farið að koma fram hátt viðnám neðan lágviðnáms undir suðurbrún Sandabotnafjalls, vestan við Hrafninnuhrygg.

**200 m neðan sjávarmáls** (mynd 33) er hátt viðnám neðan lágviðnáms, sem fram kom undir suðurbrún Sandabotnafjalls 100 m neðan sjávarmáls, farið að teygja sig suður undir Sandabotnaskarð. Einnig er komið fram hátt viðnám neðan lágviðnáms austan við Leirhól og virdist það tengjast við megin háviðnámskjarnann, austur frá Kröflu, með háu viðnámi undir meðallágu. Þarna myndar hátt viðnám undir lágu bogalaga frávik sem fellur saman við áætlaða SA-brún Kröfluöskjunnar.

**300 m neðan sjávarmáls** (mynd 34) kemur fram samfelt hátt viðnám undir lágviðnámi á mestum hluta mælisvæðisins. Þessi háviðnámskjarni er talinn sýna útbreiðslu jarðhitakerfisins á þessu dýpi. Fram koma skýr mörk jarðhitakerfisins bæði að norðan og sunnanverðu, en vesturmörkin eru ekki þekkt því mælingar vantar vestan Leirhnjúks og í mestum hluta Leirhnjúkshrauns. Ennfremur vantar mælingar til að afmarka svæðið fullkomlega til austurs. Eins og sést á myndinni fyllir háviðnámskjarninn að mestu austurhluta Kröfluöskjunnar. Norðurmörkin eru

nokkurn veginn aust-vestlæg austur undir Graddabungu, en beygja síðan til suðurs, suður um mitt Kröflufjall og síðan nokkurn veginn beint í austur. Að sunnan og suð-austan fylgja útmörk hás viðnáms neðan lágviðnáms að mestu öskjujaðrinum, frá Hvíthólaklifi í vestri, austur um Sandabotnaskarð og sveygja þar til NA. Frá þessu er þó ein veruleg undantekning, því að undir vesturbrún Sandabotnafjalls gengur háviðnámstunga til NNA og nær norður undir malar-námurnar í hlöðum Sandabotnafjalls.



# KRAFLA viðnám 500m ofan sjávarmáls

## SKÝRINGAR

25.3 viðnám í ohmm

Hátt viðnám undir lágviðnámi

Hátt viðnám undir meðallágu viðnámi

0-5 ohmm

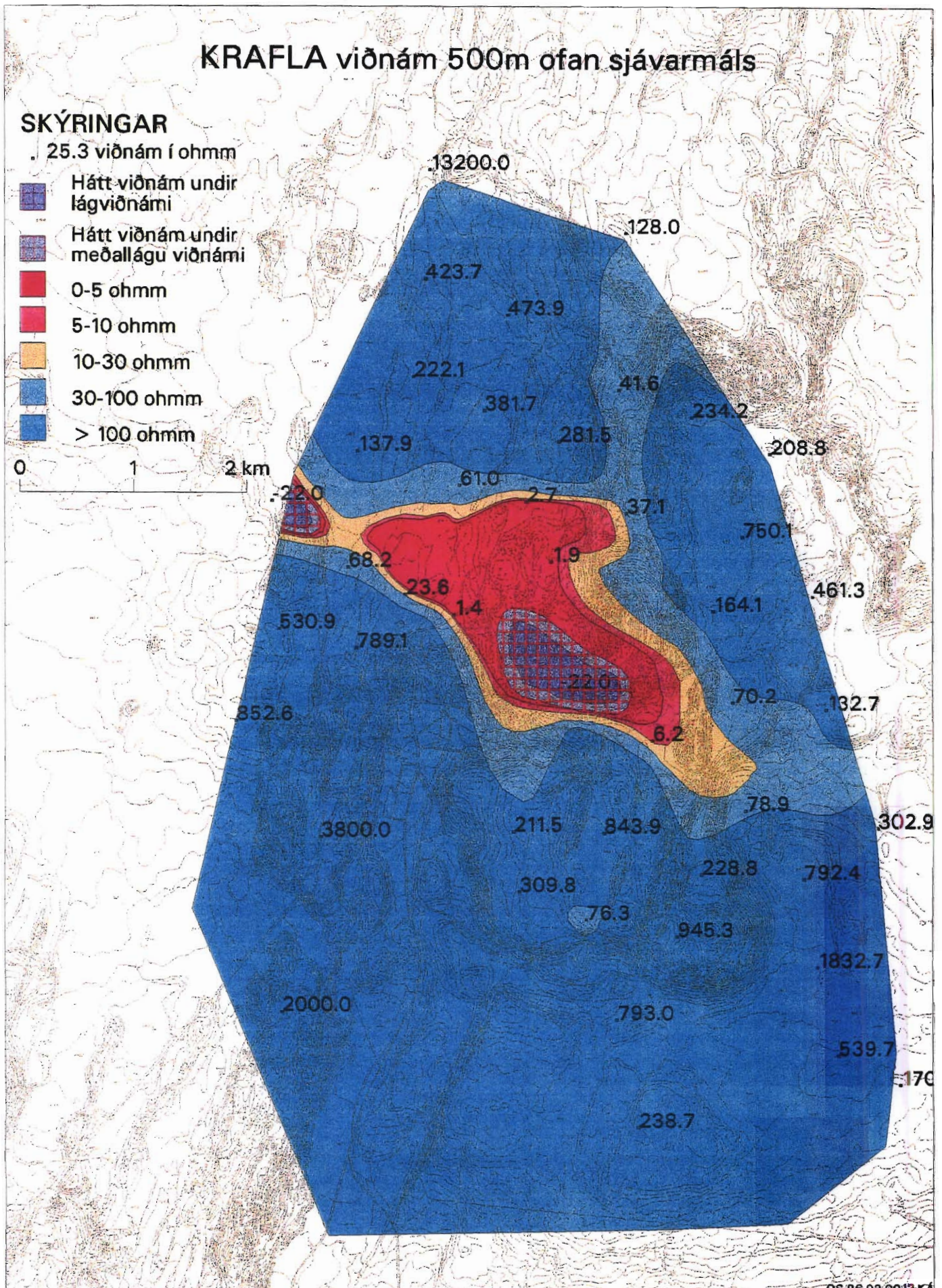
5-10 ohmm

10-30 ohmm

30-100 ohmm

> 100 ohmm

0 1 2 km

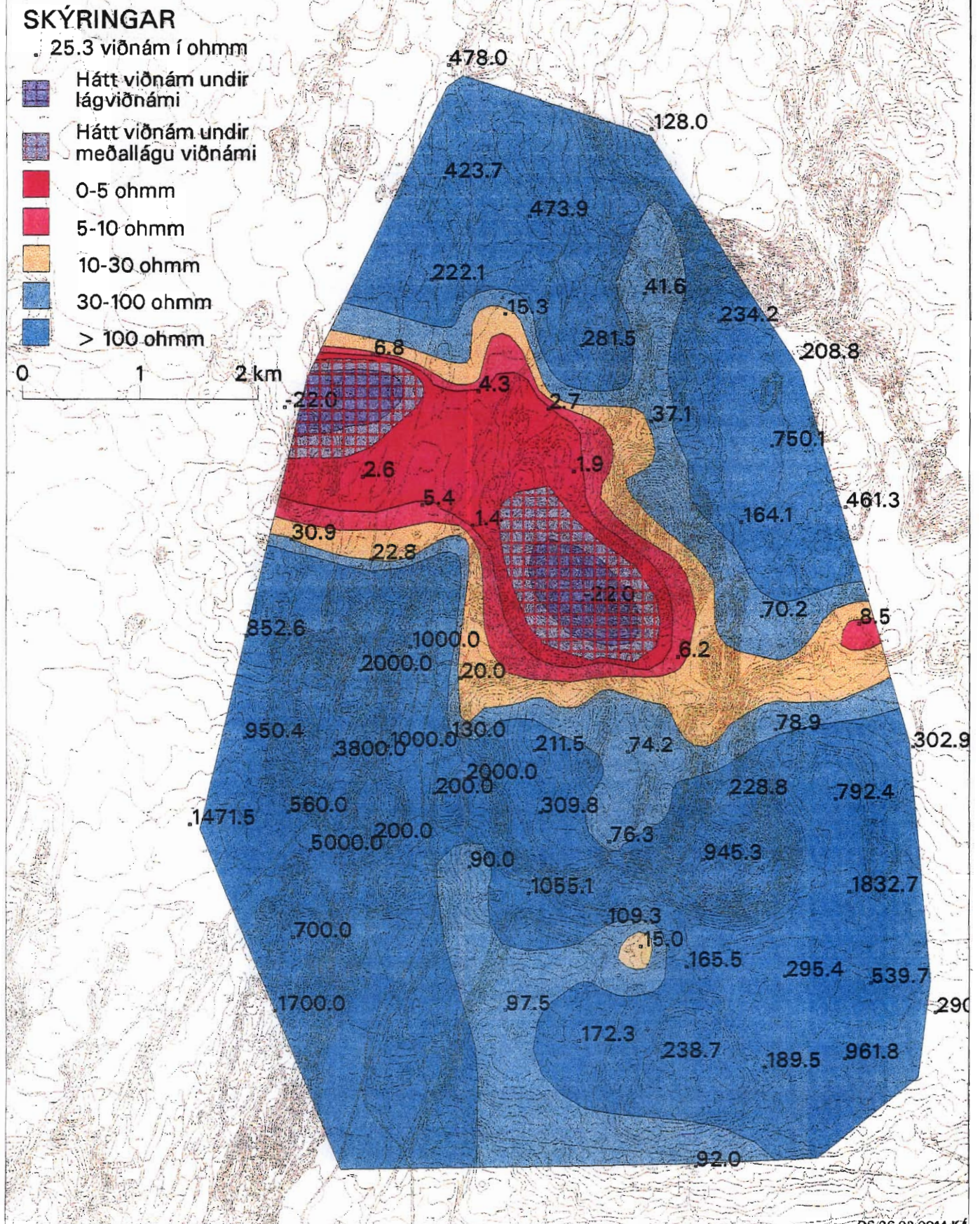


08.96.02.0013 KA

Mynd 20. Viðnám 500 m ofan sjávarmáls.



# KRAFLA viðnám 450m ofan sjávarmáls



Mynd 21. Viðnám 450 m ofan sjávarmáls.



# KRAFLA viðnám 400m ofan sjávarmáls

## SKÝRINGAR

25.3 viðnám í ohmm

Hátt viðnám undir lágviðnámi

Hátt viðnám undir meðallágu viðnámi

0-5 ohmm

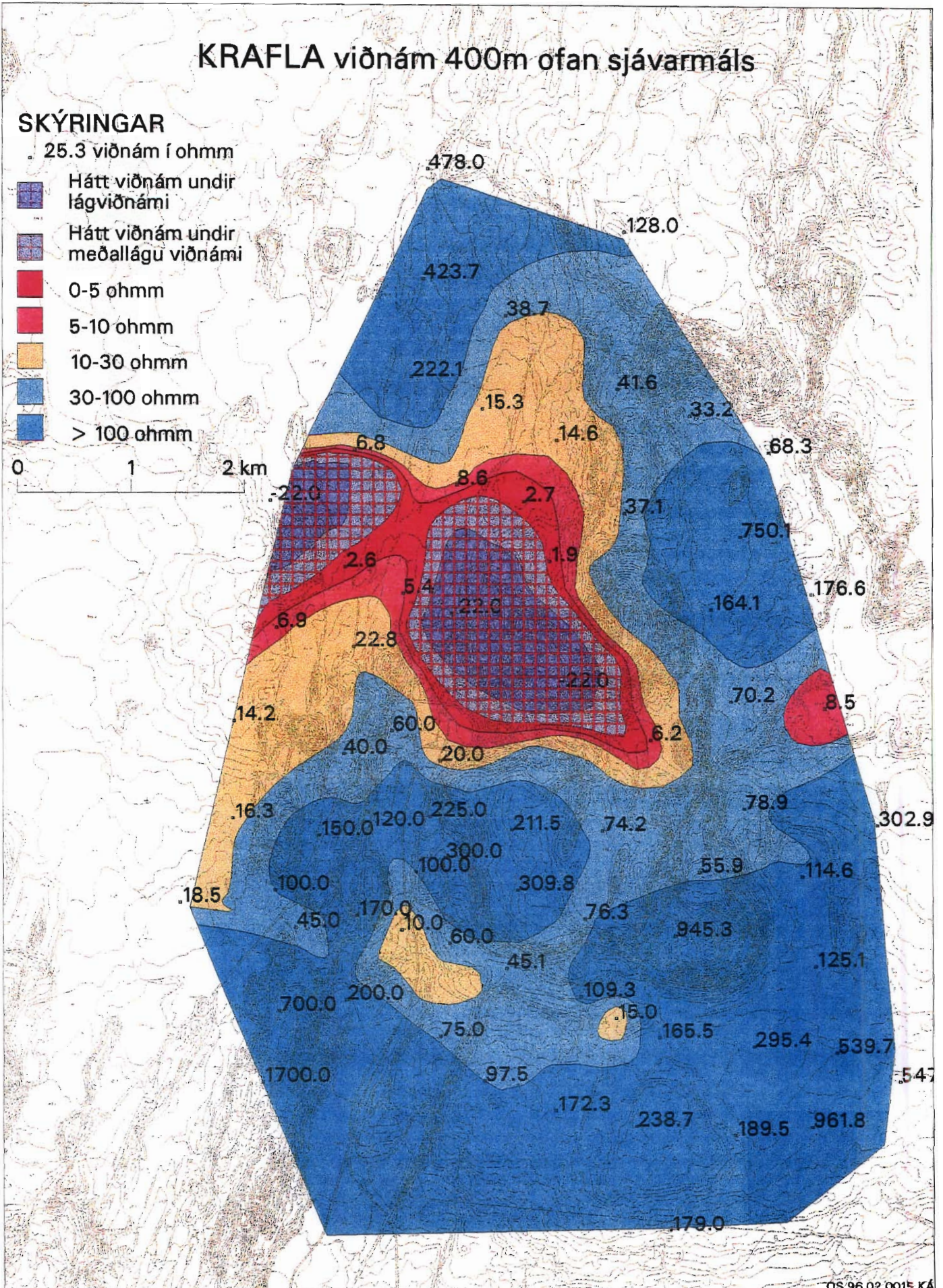
5-10 ohmm

10-30 ohmm

30-100 ohmm

> 100 ohmm

0 1 2 km



OS.96.02.0015 KÁ

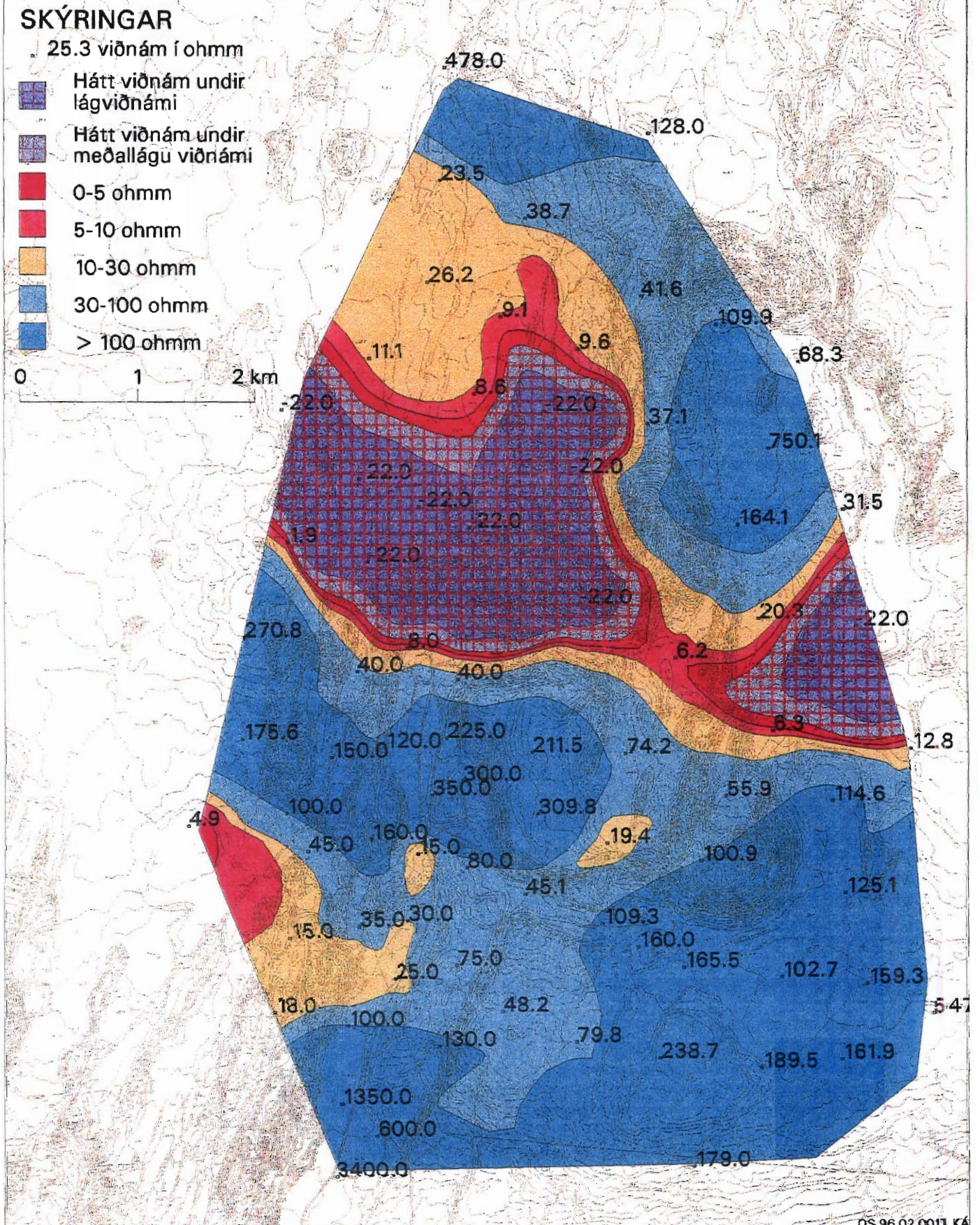
Mynd 22. Viðnám 400 m ofan sjávarmáls.







# KRAFLA viðnám 300m ofan sjávarmáls



Mynd 24. Viðnám 300 m ofan sjávarmáls.



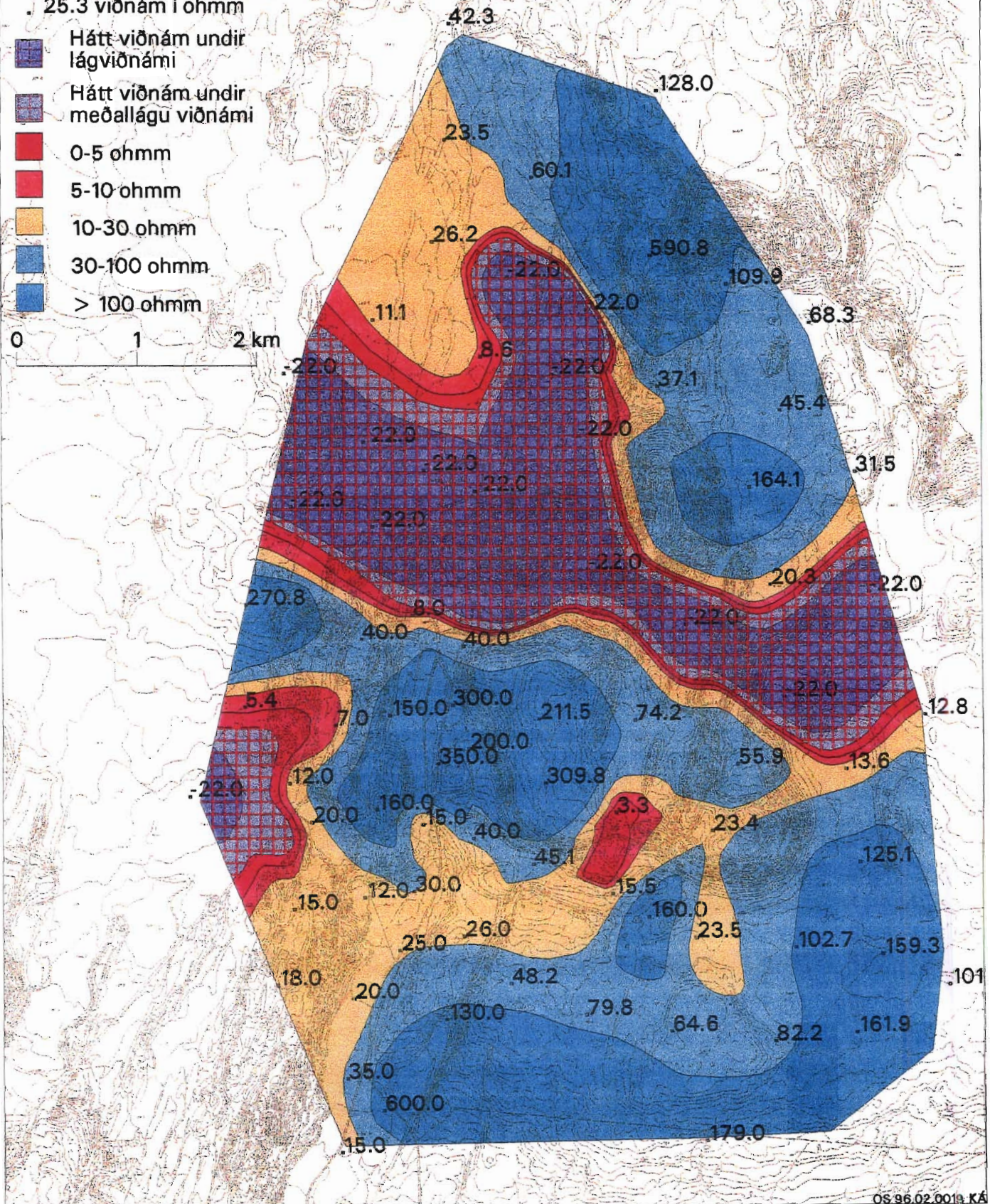




# KRAFLA viðnám 200m ofan sjávarmáls

## SKÝRINGAR

- 25.3 viðnám í ohmm
  - Hátt viðnám undir lágviðnámi
  - Hátt viðnám undir meðallágu viðnámi
  - 0-5 ohmm
  - 5-10 ohmm
  - 10-30 ohmm
  - 30-100 ohmm
  - > 100 ohmm
- 0 1 2 km



OS.96.02.0019.KA

Mynd 26. Viðnám 200 m ofan sjávarmáls.

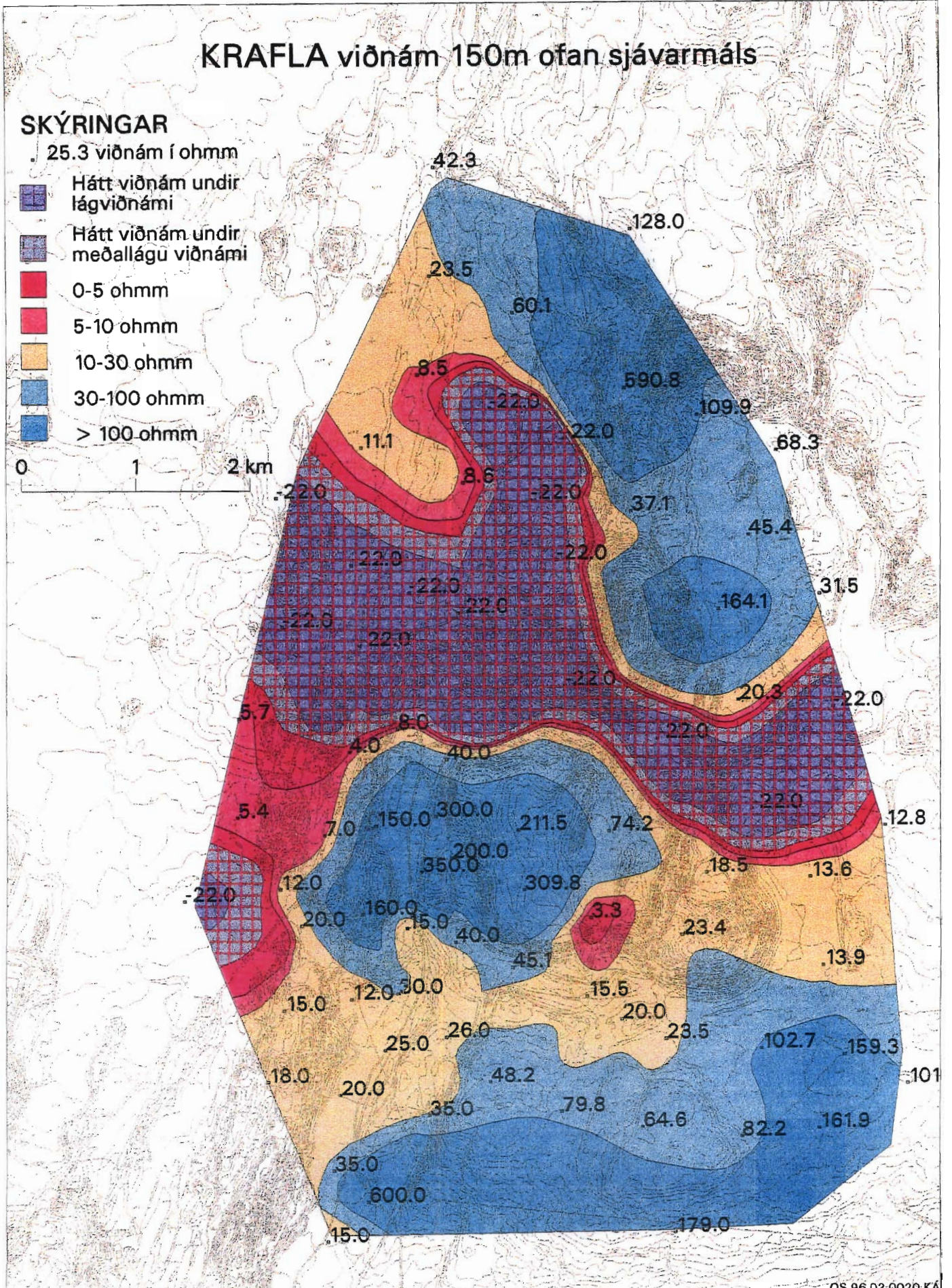


# KRAFLA viðnám 150m ofan sjávarmáls

## SKÝRINGAR

- 25.3 viðnám í ohmm
- Hátt viðnám undir lágviðnámi
- Hátt viðnám undir meðallágu viðnámi
- 0-5 ohmm
- 5-10 ohmm
- 10-30 ohmm
- 30-100 ohmm
- > 100 ohmm

0 1 2 km



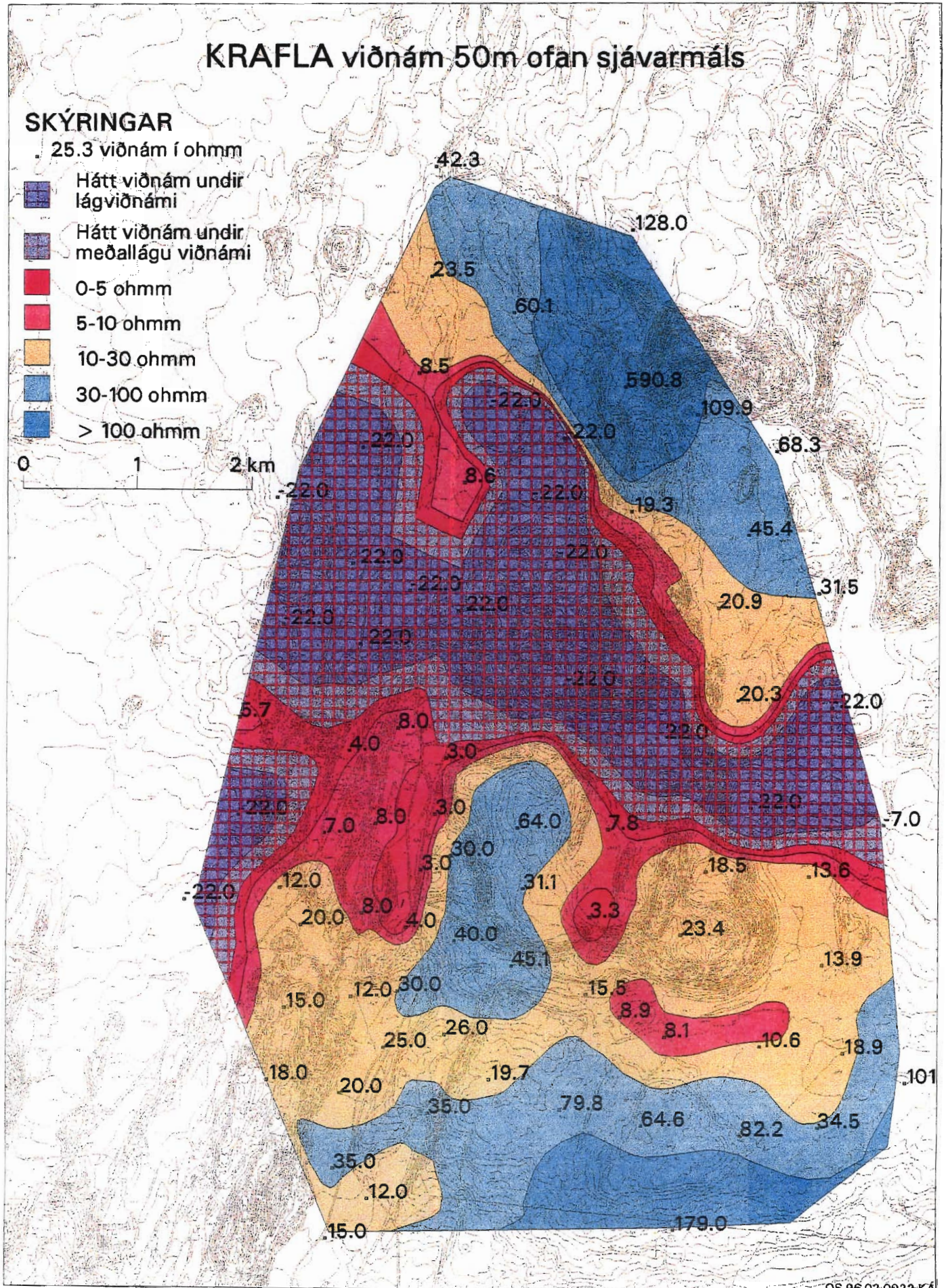
OS.96.02.0020.KA

Mynd 27. Viðnám 150 m ofan sjávarmáls.



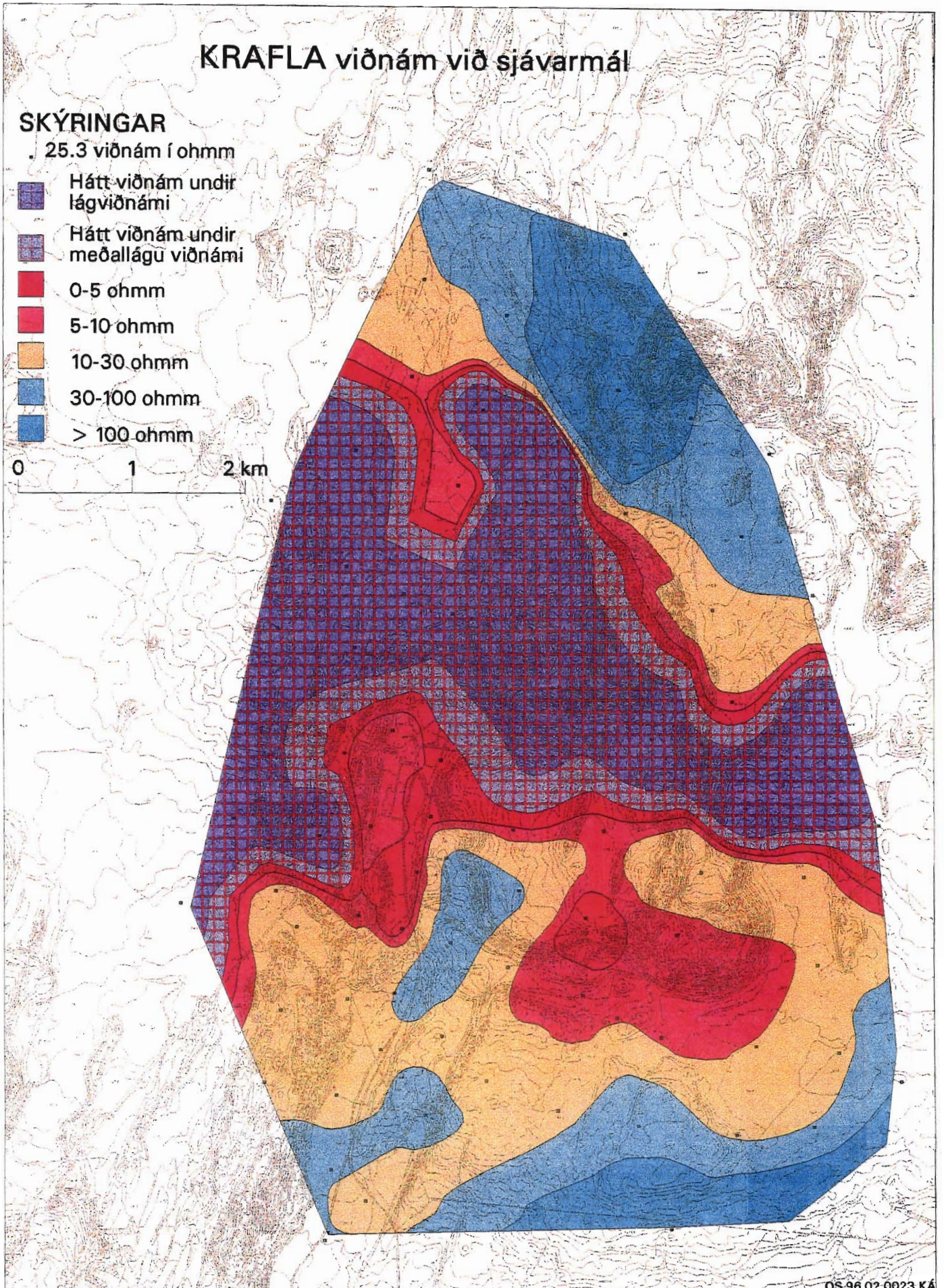






Mynd 29. Viðnám 50 m ofan sjávarmáls.





Mynd 30. Viðnám við sjávarmál.



# KRAFLA viðnám 50m neðan sjávarmáls

## SKÝRINGAR

25.3 viðnám í ohmm

Hátt viðnám undir lágviðnámi

Hátt viðnám undir meðallágu viðnámi

0-5 ohmm

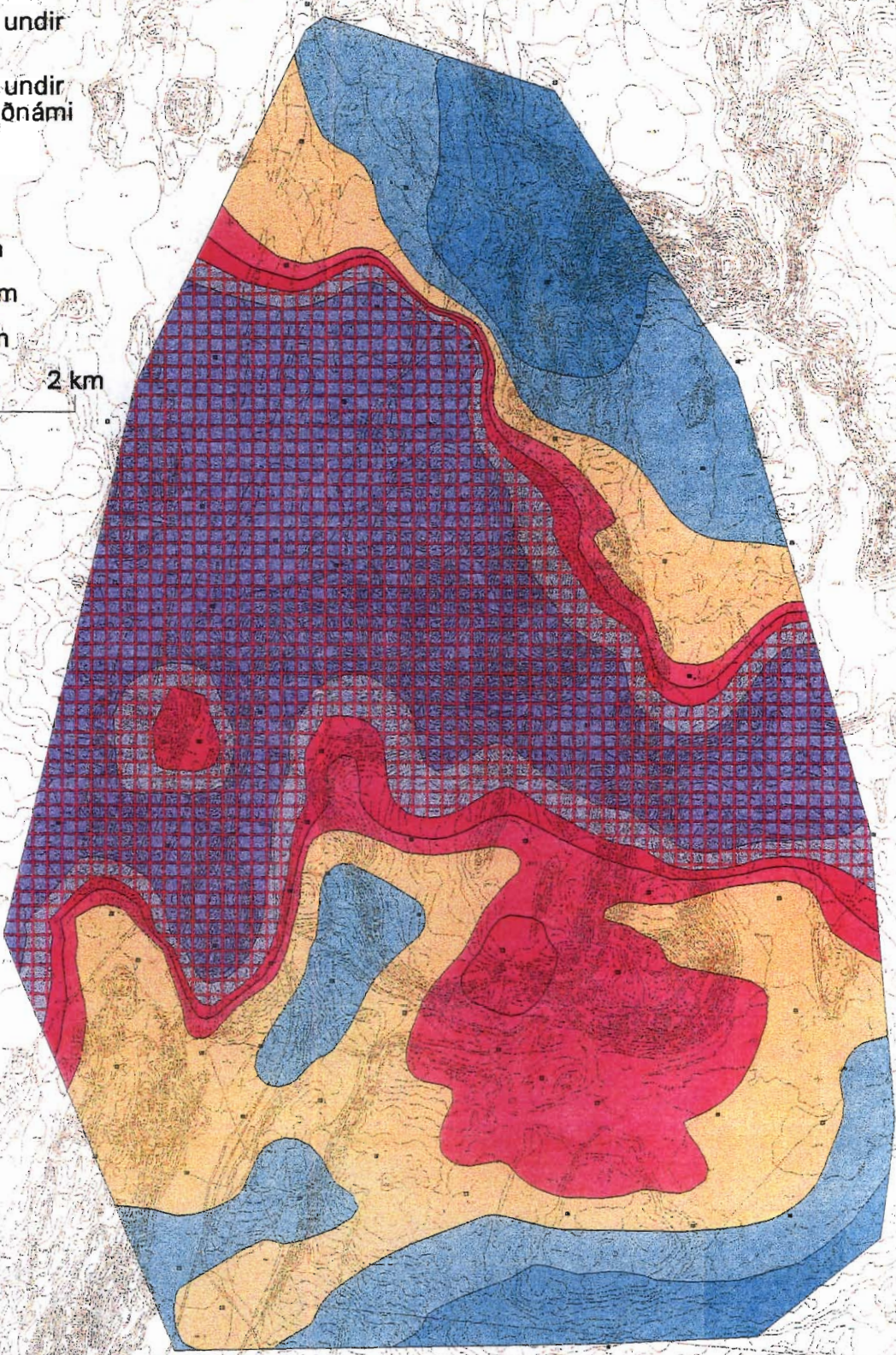
5-10 ohmm

10-30 ohmm

30-100 ohmm

> 100 ohmm

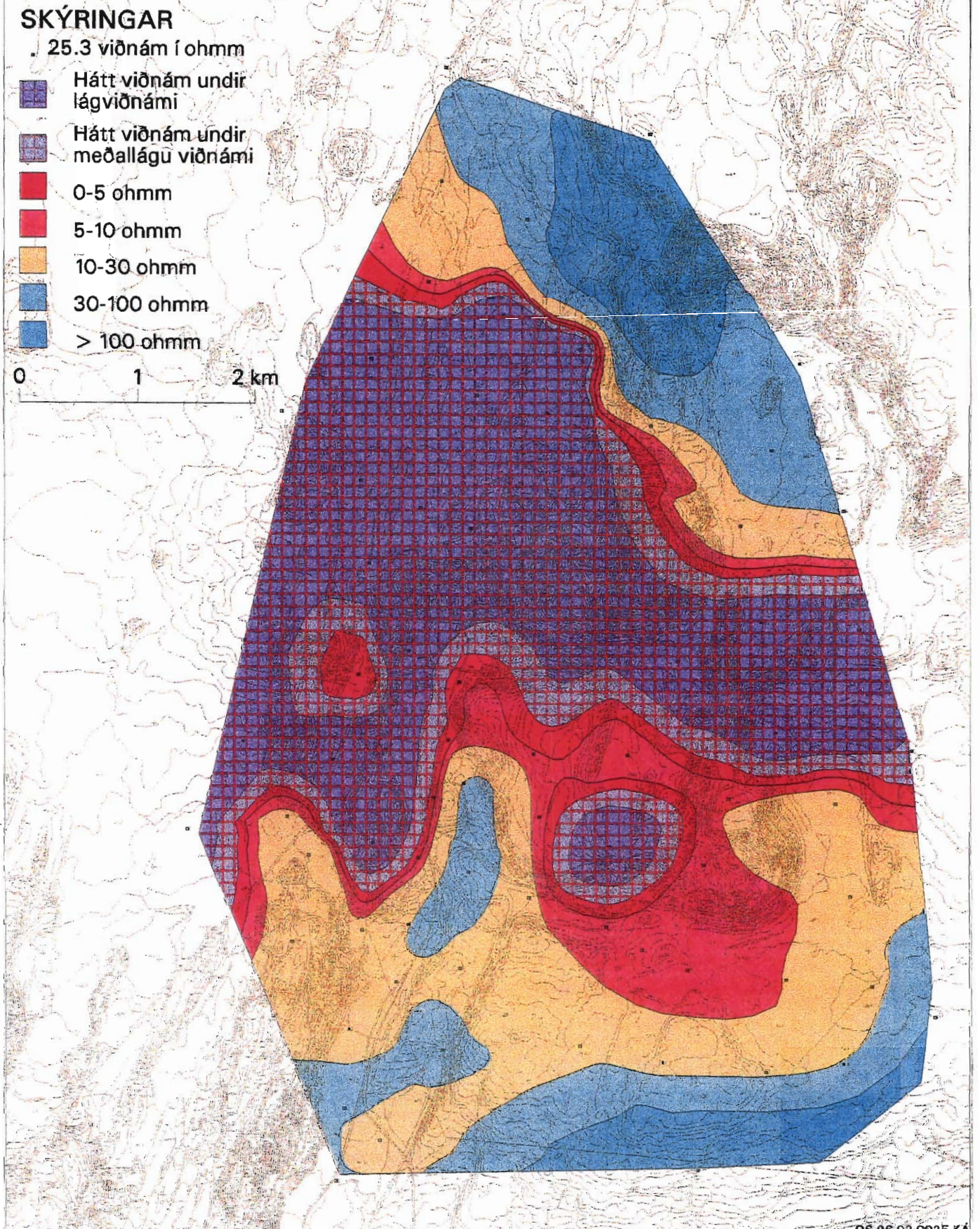
0 1 2 km



Mynd 31. Viðnám 50 m neðan sjávarmáls.



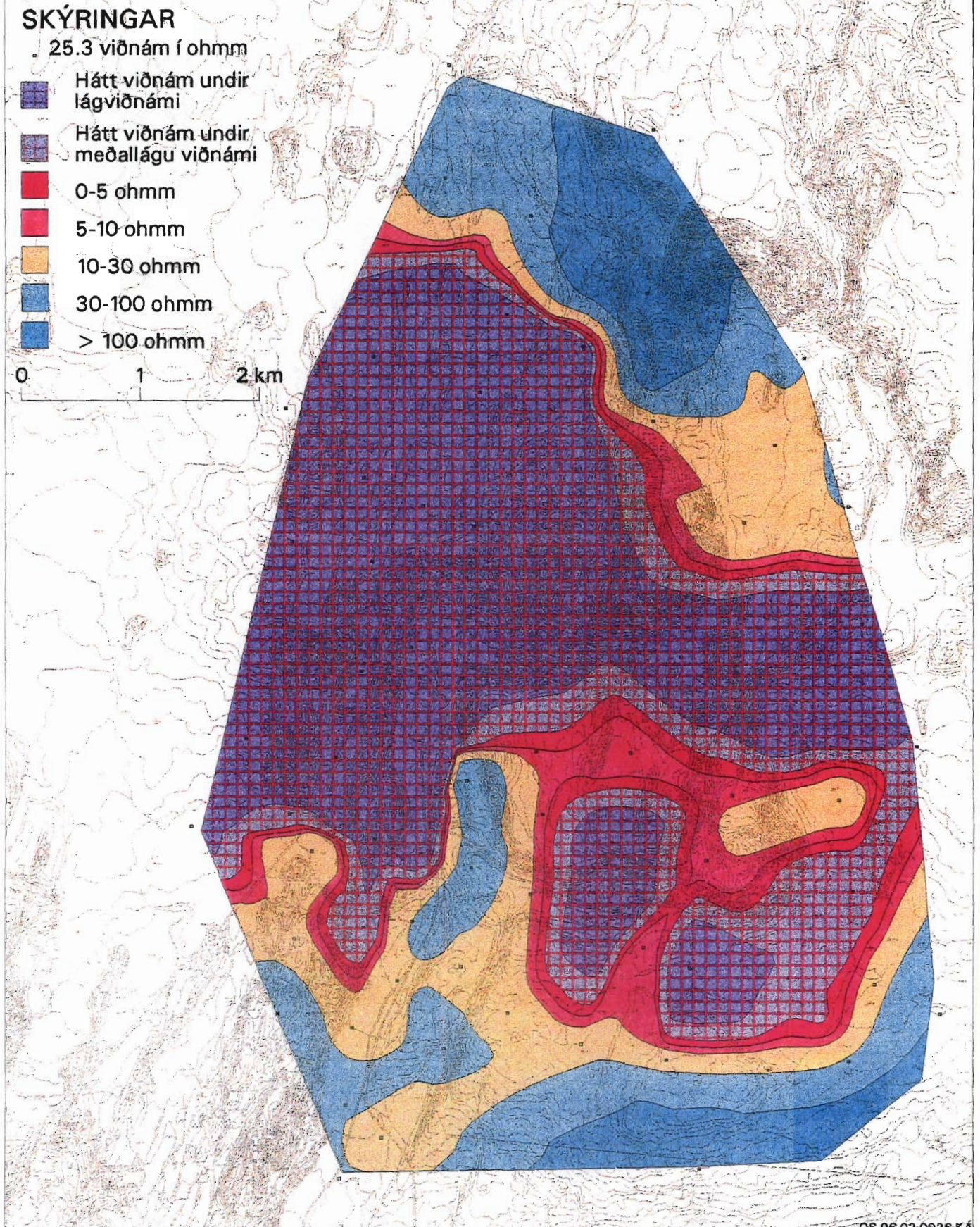
## KRAFLA viðnám 100m neðan sjávarmáls



Mynd 32. Viðnám 100 m neðan sjávarmáls.

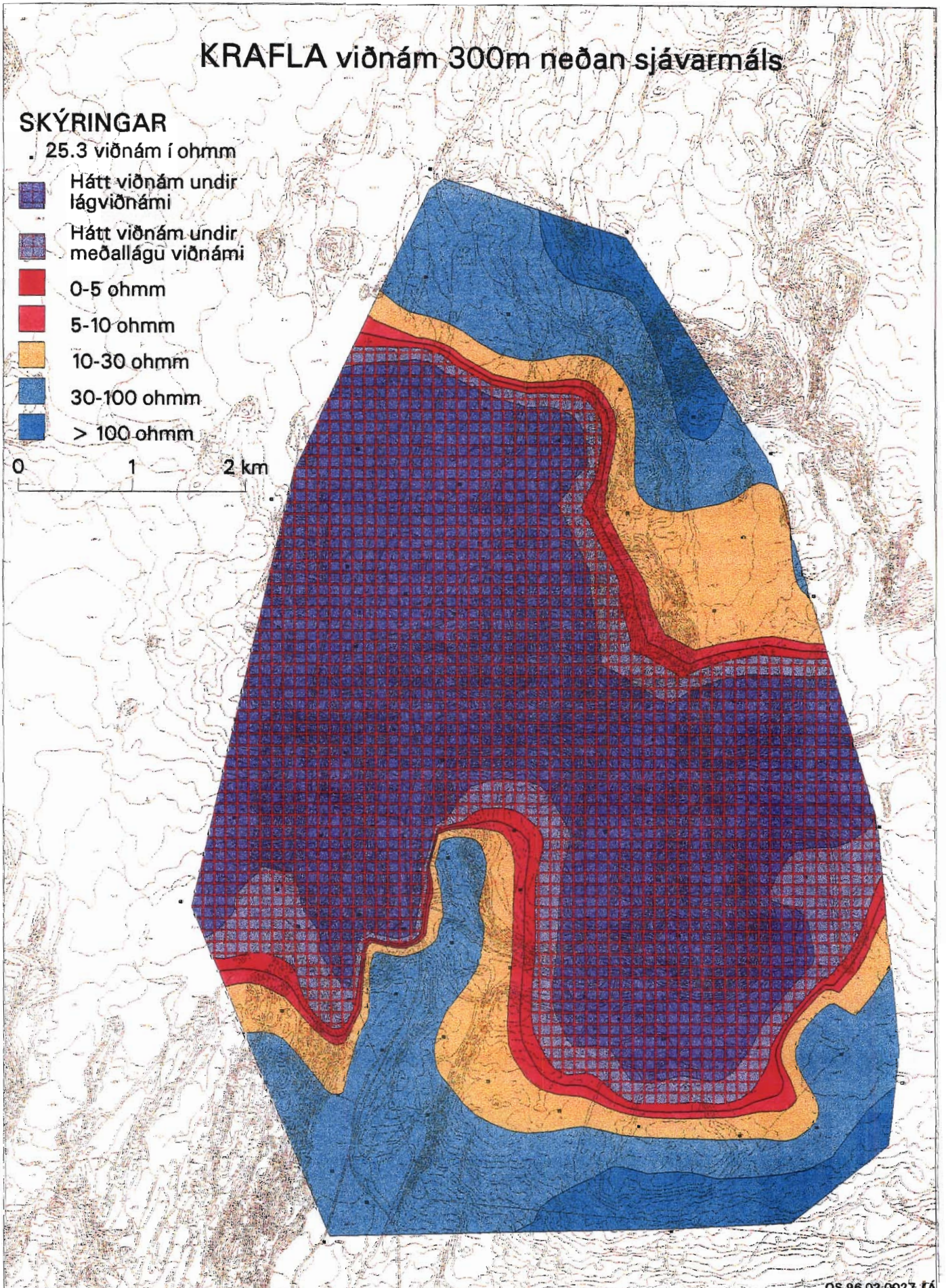


## KRAFLA viðnám 200m neðan sjávarmáls



Mýnd 33. Viðnám 200 m neðan sjávarmáls.





Mynd 34. Viðnám 300 m neðan sjávarmáls.



### 5.3 Samandregnar niðurstöður viðnámsmælinga

Viðnámsmælingarnar gefa nokkuð glögga mynd af jarðitasvæðinu í austurhluta Kröfluöskjunnar. Jarðhitakerfið kemur fram sem viðnámsfrávik sem samanstendur af lágviðnámskápu, með eðlisviðnám innan við 10  $\Omega$ m, og háviðnámskjarna þar fyrir neðan. Þar sem háviðnámskjarninn rís hæst er gjarnan skán með mjög lágu viðnámi ( $< 3 \Omega$ m) á mótum lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans. Upp að eða utan á lágviðnámskápunni liggur gjarnan lag með 10-30  $\Omega$ m viðnámi. Athyglisvert er að þar sem slíkt lag kemur fram en lágviðnámskápan sést ekki (þ.e. viðnám verður ekki lægra en 10  $\Omega$ m) er einnig hærra viðnám undir. Þar sem lágviðnámskápan nær yfirborði og háviðnámskjarninn rís hæst, þ.e. sunnan og vestan við Kröflu og við Leirhnjúk, eru mest sjáanleg merki jarðhita á yfirborði.

Viðnámsfrávikid er skýrt afmarkað til norðurs og suðurs. Það er ekki afmarkað til vesturs því að mælingar ná ekki vestur fyrir Leirhnjúk og vestustu mælingarnar sýna lágviðnámskápu og hátt viðnám undir. Því er ljóst að viðnámsfrávik teygir sig yfir í vestari hluta öskjunnar, en þar vantar frekari mælingar til að kortleggja það. Austurmörkin eru ekki heldur fyllilega ákvörðuð. Viðnámsfrávikid nær að austurmörkum mælisvæðisins nærri öskjubrúninni austan Sandabotna. Eins og áður hefur komið fram er reyndar ekki alveg ljóst hvort viðnámsfrávikid sem fram kemur við austurbrún öskjunnar tengist meginfrávikinu innan öskjunnar, en þó verður það að teljast líklegra en að þarna sé staðbundið frávik enda tengjast frávikin á tölvuteiknuðu jafnvíðnámskortunum. Norður- og norð-austurmörkin eru mjög skýr og breytast lítið með dýpi eftir að komið er niður á 400-500 m dýpi. Að norðan fylgja þau nokkurn veginn öskjujaðrinum, en NA af Kröflu kemur ekki fram viðnámsfrávik.

Suður- og suðausturmörkin eru nokkuð breytileg með dýpi. Ofan sjávarmáls (400-500 m dýpis) hafa þau VNV-ASA-læga stefnu frá því sunnan við Leirhnjúk, ASA um Leirbotna og Grænagil og allt að austurbrún öskjunnar við Sandabotna. Þegar dýpra kemur breiðist viðnámsfrávikid til SV frá Leirhnjúk, eftir sprungustykkinu. Ennfremur fer að koma fram viðnámsfrávik undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og austanverðu Sandabotnaskarði, kringum Leirhól. Þetta viðnámsfrávik kemur fram sem sjálfstæður "kúfur", aðskilinn frá meginfrávikinu norðar. Útbreiðsla fráviksins vex með dýpi þar til það loks tengist meginfrávikinu á 700-800 m dýpi (300 m neðan sjávarmáls). Neðan þess dýpis breytast suður og suð-austurmörkin lítið með dýpi og fylgja að mestu öskjurímanum. Frá því er þó ákveðin og veigamikil undantekning því að ekki kemur fram lágt viðnám undir svæði sem teygir sig eftir autanverðum Hlíðardal til NNA undir SV-brún Sandabotnafjalls.

## 6. JARÐHITAFRÆÐILEG TÚLKUN Á NIÐURSTÖÐUM VIÐNÁMSMÆLINGA

Í kafla 5 hér að framan er fjallað um samband eðlisviðnáms og jarðhita. Þar kemur fram að viðnámsmælingar á háhitasvæðum hérlendis, sem ekki eru settuð söltu vatni, sýna að þau hafa öll svipaða viðnámsskipan. Fram kemur lágviðnámskápa og neðan hennar háviðnámskjarni þar sem eðlisviðnám er u.þ.b. stærðargráðu hærra en í lágviðnámskápunni. Nokkuð eindregin fylgni virðist vera milli eðlisviðnáms og ríkjandi ummyndunarsteinda. Viðnám er hátt í fersku og óumynduðu bergi, lækkar mjög (verður lægra en 10 Ωm) þegar við tekur ummyndun með ráðandi smektíti og zeólítum en hækkar svo aftur á meira dýpi þar sem klórít tekur við af smektíti sem ríkjandi ummyndunarsteind. Við ummyndun basalts ræður hitastig mestu um hvaða ummyndunarsteindir eru ríkjandi. Bergið fer ekki að ummyndast að ráði fyrir en hitastig er orðið hærra en 50 °C. Á bilinu 100-200 °C er ummyndun orðin veruleg og smektít og zeólítar eru ráðandi ummyndunarsteindir. Á bilinu 200-230 °C taka blandlagssteindir við af smektíti og zeólítar víkja, í svokölluðu blandlagssteindabelti. Við hitastig hærra en 230 °C er klórít orðið ráðandi og þegar kemur yfir 250 °C verður epidót einnig til í miklum mæli.

Þar sem eðlisviðnámið virðist einkum ráðast af ríkjandi ummyndun má, að gefinni þeirri forsendu að ummyndunarsteindir séu í jafnvægi við hitastig, áætla hitastigsdreifingu í jarðhitageyminum út frá viðnámsskipaninni. Lágviðnámskápa og háviðnámskjarni undir afmarka, samkvæmt þessu jarðhitageyminn. Lágviðnámskápan svarar til bergs þar sem hitastig er á bilinu 100-200 °C og háviðnámskjarninn endurspeglar berg þar sem hitastig er um og yfir 230 °C. Ef ummyndun er hinsvegar ekki í jafnvægi við hitastig er ekki á þennan hátt hægt að áætla hitastig beint út frá eðlisviðnámi. Ef ummyndun er ekki í jafnvægi við hitastig hefur það annaðhvort hækkað eða lækkað það nýlega að ummyndun bergsins, sem stöðugt er í gangi, hefur ekki haft tíma til að gera þær ummyndunarsteindir, sem eru í jafnvægi við núverandi hitastig, ríkjandi. Margar háhitasteindir, svo sem klórít og epidót, eru mjög stöðugar og hverfa ekki né breytast í aðrar steindir þótt hitastig lækki og aðrar ummyndunarsteindir fari að myndast. Meginatriði málsins er það, að gera verður ráð fyrir því að ríkjandi ummyndunarsteindir ráði eðlisviðnámi og að þær þurfa ekki endilega að endurspegla núverandi hitastig.

Viðnámsmælingar í Kröflu sýna að viðnámsskipan í austurhluta öskjunnar hefur sömu einkenni og á öðrum háhitasvæðum þ.e. lágviðnámskápu og háviðnámskjarna. Mynd 35 sýnir samanburð á eðlisviðnámi undir lfnu-12 (sem liggur frá Leirhnjúk, SA um suðurhlíðar Kröflu og í Sandabotna, sjá mynd 13) og ummyndun í þeim borholum, sem næstar eru sniðinu og ummyndun hefur verið greind í smáatriðum. Holurnar eru um 50-300 m sunnan við sniðið og hefur þeim verið varpað inn á það. Mynd 35 sýnir að lágviðnámskápan fellur saman við smektít-zeólítabeltið og að viðnám hækkar aftur þegar kemur niður í blandlags- og klórítbeltin. Það er því ljóst að hin hefðbundna túlkun á viðnámsskipan yfir í dreifingu ummyndunarsteinda, sem lýst er að framan, á einnig við hér.

Samanburður á ríkjandi ummyndun og hitastigi í borholum á Kröflusvæðinu sýnir að í hluta jarðhitakerfisins er ekki jafnvægi milli ummyndunar og hitastigs (Halldór Ármannsson o.fl., 1987). Jafnvægi er í jarðhitakerfinu við Hvíthóla og í suðurhlíðum Kröflu nema í austustu holunni, KJ-18, þar sem hitastig er nú verulega lægra en svarar til ríkjandi ummyndunar. Í Leirbotnum og vestan Hveragils, er enn fremur verulega lægra hitastig á dýptarbilinu 400-1000 m en ríkjandi ummyndun gefur til kynna. Af þessu er ljóst að ekki má gera ráð fyrir að ummyndun sé í jafnvægi við hitastig og þar af leiðandi má ekki túlka viðnámsdreifinguna beint yfir í hitastig.



Sú kæling sem fram kemur SA við Kröflu og undir Leirbotnum og vestan Hveragils sýnir að jarðhitakerfið hefur tekið verulegum breytingum í tímans rás. Niðurstöður viðnámsmælinganna ber því að túlka þannig að viðnámsfrávikið sýni útbreiðslu jarðhitakerfisins eins og hún hefur mest orðið.

Jafnviðnámskortin sýna að ofan sjávarmáls, þ.e. niður á 450-500 m dýpi er jarðhitavirknin í grófum dráttum bundin við beltí með VNV-ASA-læga stefnu, frá Leirhnjúk, um suðurhlíðar Kröflu og að öskjujaðrinum við Sandabotna. Dýpið á jarðhitavirknina er nokkuð breytilegt eftir beltinu. Hún nær til yfirborðs við Leirhnjúk og sunnan og vestan við Kröflu. Þegar kemur niður á um 200 m dýpi (350 m ofan sjávarmáls) sjást ákveðin merki um jarðhita við austurbrún öskjunnar við Sandabotna, en hik virðist vera SA við Kröflu. Á um 350 m dýpi (200 m ofan sjávarmáls) er jarðhitavirknin orðin samfelld eftir VNV-ASA-læga beltinu en einnig er farin að sjást jarðhitavirkni við öskjujaðarinn undir Leirhnjúkshrauni vestur af Hvíthólaklifi.

Norðurmörk VNV-ASA-læga beltisins eru nokkuð óregluleg því að jarðhitavirkni hefur teygst sig til norðurs frá Víti og þegar kemur norður undir öskjujaðarinn sveigir hún til vesturs en virðist síðan enda þegar kemur að þeim hluta sprungusveimsins í gegnum Kröflusvæðið sem virkastur hefur verið upp á síðkastið. Suðurmörk jarðhitabeltisins eru mun skarpari og breytast lítið með dýpi niður að sjávarmáli. Í ljósi þess, að ríkjandi brotastefna er hin NNA-SSV-læga stefna sprungusveimsins í gegnum Kröflueldstöðina hefði mátt búast við að streymi jarðhitavökvans væri einkum eftir brotum með þá stefnu. Jarðhitabeltið ofan sjávarmáls hefur hins vegar stefnu nokkurn veginn þvert á ríkjandi sprungustefnu. Það verður varla skýrt með öðru móti en því að til staðar séu lítt- eða torgegndræpir veggir sem takmarka útbreiðslu jarðhitans ofan sjávarmáls, einkum til suðurs.

Ógegndræpa veggir eins hér virðist um að ræða er eðlilegast að skýra með brotum og/eða göngum. Eins og áður hefur komið fram sjást á yfirborði brot á þeim slóðum sem jarðhitabeltið er og með sömu stefnu. Í suðurhlíðum Kröflu eru brot með VNV-ASA-læga stefnu sem hreyfðust í Kröflueldum. Samskonar brot sjást einnig í Leirhnjúk og eins á ásnum upp af skemnum Kröfluvirkjunar. Suðurmörk jarðhitabeltisins ofan sjávarmáls eru einmitt um línu sem liggur nokkurn veginn um síðastnefnda brotið og Grænagil.

Greining jarðlaga í borholum sýnir að mikill munur er í dýpi á innskotaberg milli holu KJ-11 í Leirbotnum og holu KJ-6 í dalnum austan Kröfluvirkjunar (Halldór Ármannsson o.fl., 1987). Þær eru sín hvoru megin við suðurmörk jarðhitabeltisins. Í holu KJ-6, sunnan markanna, kemur innskotabergið fram um 700 m neðar en í holu KJ-11 norðan þeirra. Jarðlög ofan innskotabergsins benda til að þarna séu misgengi með fall til suðurs. Harla ólíklegt er að lóðrétt færsla um misgengin sé um 700 m. Líklega er innskotabergið svermur ganga sem skotist hafa inn í berglagastaflann og trúlega koma innskotin fram á minna dýpi innan jarðhitabeltisins að hluta til vegna þess að innskotagangarnir ná þar hærra upp í staflann.

Þyngdarkort af Kröfluöskjunni, byggt á þyngdarmælingum frá árunum 1975 til 1978 (Ragna Karlsdóttir o.fl., 1978; Gunnar V. Johnsen 1995), sýna að þyngdarlægð gengur í gegnum öskjuna með stefnu VNV-ASA. Norðurmörk þyngdarlægðarinnar falla saman við suðurmörk jarðhitabeltisins. Trúlega ber að líta svo á að innan öskjunnar sé almenn þyngdarlægð vegna eðlisléttara bergs í öskjufyllingunni, en að innan jarðhitabeltisins sé þyngdarsviðið hærra vegna minna dýpis á innskotaberg. Vestan við Kröflu og við Leirhnjúk sjást staðbundnar þyngdarhæðir teygja sig til norðurs á svipuðum slóðum og viðnámsfrávikið teygir sig til norðurs frá VNV-ASA-læga beltinu. Af þessu sést að jarðhitavirknin, sem fram kemur ofan sjávarmáls, virðist falla saman við þau svæði þar sem þyngdarmælingarnar sýna innskot næst yfirborði og þarf það

ekki að koma á óvart því innskot eru megin varmagjafi jarðhitakerfisins.

Suðurmörk viðnámsfráviksins (ofan sjávarmáls) eru mun skarpari en norðurmörkin. Þau hafa ákveðna VNV-ASA stefnu og falla saman við skarpa hækkun í þyngdarsviðinu til norðurs. Hin skörpu suðurmörk viðnámsfráviksins sýna að til staðar eru ógegndræpir veggir með VNV-ASA-læga stefnu og þar sem þeir falla saman við skarpt þyngdarfrávik er nærtækast að álfta að þeir séu gangar sem skotist hafa, eftir VNV-ASA brotum, upp í móbergs- og basaltstaflann sem fyllir öskjuna. Við rannsóknir á jarðhitakerfinu við Nesjavelli á Hengilssvæðinu komu áþekkar aðstæður í ljós. Þegar niðurstöður viðnáms- og þyngdarmælinga voru skoðaðar í samhengi sást að úrbreiðsla jarðhitans í móbergsfyllingu sigdalsins virtist stjórnað að verulegu leyti af göngum sem skotist hafa inn í móbergsfyllinguna samfara síðustu gosvirkni á svæðinu.

Um sjávarmál og þar fyrir neðan fara ummerki jarðhitavirkni (viðnámsfrávik) að teygja sig til norðurs og suðurs eftir sprungureininni vestan dalsins og ná, þegar neðar kemur, barma á milli í öskjunni. Neðan sjávarmáls fara einnig að koma fram ákveðin merki um jarðhitavirkni sunnan við VNV-ASA-læga jarðhitabeltið, undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og í Sandabotnaskarði austanverðu. Þessi jarðhitavirkni kemur fram sem aðskilið svæði allt niður á 300 m neðan sjávarmáls (um 800 m dýpi), en þar fyrir neðan virðist hún fara að tengjast meginjarðhitnum fyrir norðan. Það er því líkast sem undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og við suðurbrún öskjunnar í austurhluta Sandabotnaskarðs sé uppstreymissvæði jarðhita, sem er að einhverju leyti aðskilið frá megin jarðhitnum norðar og vestar. Ef lesið er nánar í smátriði viðnámskortanna sést reyndar að ofantil koma þessi jarðhitaummerki fram sem tvö aðskilin svæði; annarsvegar undir sunnanverðu Sandabotnafjalli, vestan við Hrafninnuhrygg og hinsvegar við öskjubrúnina austan við Leirhól. Hikið sem þar verður á milli er í beinu framhaldi af Hrafninnuhrygg, sem gæti bent til þess að þar sé til staðar þéttara berg en uppstreymi beggja vegna.

Eins og rakið var hér að framan er ummyndun í jarðhitakerfinu í Kröflu ekki allsstaðar í jafnvægi við hitastig þ.a. ummerki jarðhita (ríkjandi ummyndun) sem fram koma í viðnámsmælingunum má ekki fortakslaust túlka yfir í hitastig. Innskot tengd eldvirkni eru meginhitagjafir jarðhitakerfa á háhitasvæðum. Með því að skoða sögu eldvirkni má öðlast betri skilning á jarðhitavirkninni og gera sér hugmyndir um hvar jarðhitinn sé virkastur og hvar hann sé ef til vill dvfnandi.

Kristján Sæmundsson (1991) hefur rannsakað og ritað mjög ítarlega og greinargóða lýsingu á jarðfræði og eldvirkni á Kröflusvæðinu. Megindrættina í núverandi ásynd Kröflusvæðisins má rekja til síðasta jökulskeiðs. Skömmu eftir upphaf þess, eða fyrir um 100.000 árum, varð mikið sprengigos á Kröflusvæðinu og í kjölfar þess myndaðist askja í hálendinu sem þá þegar var til staðar. Á fyrrihluta jökulskeiðsins fylltist askjan af gosefnum, einkum móbergi. Þegar kom fram um og yfir mitt jökulskeiðið fóru að myndast þau fjöll sem einkenna svæðið nú, þ.e. Krafla, Gæsafjöll, Hlíðarfjall og Jörundur og síðar Sandabotnafjall. Á seinnihluta jökulskeiðsins mynduðust Ísparft og móbergshryggir svo sem Hrafninnuhryggur og fleiri smáhryggir uppi á Sandabotnafjalli svo og Dalfjall, Þrúhyrningar og Leirhnjúkur. Undir lok jökulskeiðsins einkenndist eldvirknin innan öskjunnar af sprengigosum. Þá urðu til allmargir sprengigígar svo sem Hveragil og sprengigígar í vesturhlöðum Kröflu, í Grænagili sunnan í Kröflu, röð sprengigíga meðfram Hrafninnuhrygg og Krókóttuvötn við vesturjaðar öskjunnar. Í lok jökulskeiðsins urðu síðan mikil dyngjugos norðan öskjunnar.

Eldvirkni á núttíma (síðustu 11.000 árin) skiptir Kristján í þrjú skeið: Lúdentsskeið, Hvannstóðsskeið og Hverfjallsskeið. Á Lúdentsskeiði, sem stóð frá lokum Ísaldar og þar til fyrir tæplega 8.000 árum, var nokkur eldvirkni á Kröflusvæðinu. Þá gaus á sprungu í Grunnaskurði og

áfram norður austan við Þrífyrningadal og einnig á gossprungu norður af Víti. Mesta eldvíkin var við Kröfluháls (hálsinn milli Kröflu og Graddabungu) og NA-brún öskjunnar við Graddabungu en einnig hefur gosið austan við Hrafninnuhrygg og við Litla Leirhnjúk. Tvö sprengigos urðu á Kröflusvæðinu á Lúdentsskeiði, annað vestarlega í öskjunni og hitt í grennd við Víti. Eftir Lúdentsskeið varð nokkur þúsund ára hlé í gosvirkni, eða fram til fyrir um 5.800 árum. Þá var gos- og sprunguvirkni í vestanverðri sprungurein Kröflu og þá myndaðist Hvannsóð í sprengigosi. Kristján finnur ekki óyggjandi merki um frekari eldvirkni á þessu skamma skeiði sem hann kennir við meginatburðinn og kallar Hvannstöðsskeið.

Eftir Hvannstöðsskeið varð aftur um 2.800 ára hlé, fram til Hverfjallsskeiðs, sem hófst fyrir um 2.800 árum og hefur staðið til dagsins í dag. Eldvirkni á Kröflusvæðinu, sem tilheyrir Hverfjallsskeiði, skiptist í Hverfjallselda fyrir um 2.800 árum, Hólselda fyrir um 2.000 árum, Dalelda fyrir um 1.100 árum, Mývatnselda 1724-29 (eftirhreytur til 1746) og loks Kröfluelda 1975-84. Í Hverfjallseldum myndaðist Hverfjall og þá gaus á 25 km löngum kafla norður af Hverfjalli. Innan Kröfluöskjunnar er vitað að gosið hafi við Leirhnjúk og Rauðkoll og talið er að upp hafi komið mikið hraun. Hólseldar hófust með gosi á sprungum meðfram Kröflu að austan og kallar Kristján þetta gos Hólselda fyrri. Í upphafi Hólselda síðari gaus á Sandabotnafjalli á sprungum austan við drög Grænagils og austan við og í suðurframhaldi hryggjarins vestan Hrafninnuhryggs og ennfremur austan í Kröfluhálsi og á Vítismó. Næst urðu tvö sprengigos; það fyrra skammt sunnan Vítis og það síðara um 1 km norður af Víti. Þriðji þáttur Hólselda er hraun og gjallgos á sprungum austan í Kröfluhálsi og yfir Graddabungu og þaðan norðvestur með öskjuaðrinum að meginsigdæld sprungusveimsins og nokkuð norður eftir honum. Lokaþáttur Hólselda var gos á sprungum sem liggja á sveig um norðanverðan Vítismó suður undir Víti. Litlir sprengigögar hafa myndast allvíða á gossprungunni.

Næstir í röðinni eru Daleldar, fyrir um 1.100 árum. Kristján telur þá hafa byrjað með sprengigosi norðvestan við Víti. Á eftir fylgdi hraungos undir hlöðinni vestan við virkjunina, frá Leirbotnum og langleiðina suður að Hvíthólum og stendur Kröfluvirkjun á gígum frá þeim tíma. Einnig gaus á Dalfjalli og ennfremur syðst í Námfjalli og sunnan þess. Mývatnseldar hófust með sprengigosi í Víti árið 1724, en hraungos hófust ekki að ráði fyrr en 1727 og er getið um fjórar hrinur til loka september 1729. Gosvirknin var á sprungu sem nær frá norðujadri öskjunnar, suður um Lerihnúk og suður með Þrífyrningum. Einnig gaus lítillega í Bjarnarflagi og Hrossadal skammt norðan Bjarnarflags. Talið er að árið 1746 hafi orðið minniháttar sprengigos við Leirhnjúk sem teljist til eftirhreytna Mývatnselda.

Kröflueldar hófust í desember 1975. Gosvirknin var í nýu hrinun á sprungum frá Leirhnjúk og norður í Gjástykki og síðast gaus í september 1984. Atburðarásin verður ekki rakin hér í smáatriðum, en í Kröflueldum varð mönnum ljósara eðli umbrotavirkni á gliðnunarbeltum. Á fyrrihluta Kröfluelda var eldvirkni á yfirborði ekki mikil, en kvikuhlaup út eftir sprungubeltinu voru tíð, einkum til norðurs. Á seinnihluta eldanna virðist sem sprungur gliðnunarbeltisins hafi ekki lengur tekið jafn greiðlega við kvikunni og gosvirkni á yfirborði jókst. Talið er að Kröflueldum sé ekki að fullu lokið því að skjálftahrinur mælast enn og landhæð breytist lítillega. Talið er að innskot séu að myndast í þakinu yfir kvikuhólfinu, en slík innskot eru varmagjafar háhitakerfa.

Af þessari stuttu samantekt um eldvirkni Kröflusvæðisins er áberandi að í lok síðasta jökulskeiðs og á nútíma hefur virknin verið mest í miðrein sprungusveimsins og í austurhluta öskjunnar. Ennfremur má, þegar grannt er skoðað, greina ákveðin einkenni gosvirkinnar í þá veru að sjaldgæft er að sjá samfelldar gossprungur í gegnum öskjuna. Gosvirknin virðist hafa tilhneigingu til að vera annað hvort sunnan við eða norðan við belti sem gengur frá Leirhnjúk og



ASA um suðurhlíðar Kröflu. Eldvirkni er reyndar mun meiri norðan þessa beltis. Þetta gæti bent til þess að gliðnunin sé ekki samstíga beggja vegna þessa beltis og að þar eigi sér stað mis-munahreyfing. Eins og áður er komið fram varð, í Kröflueldum, hreyfing á misgengi með VNV-ASA stefnu í suðurhlíðum Kröflu. Vel má hugsa sér að í umbrotahrinum verði hreyfingar á þessu VNV-ASA-læga beltí og inn skjótist gangar sem hindra rennsli jarðhitavökva eftir sprungum með stefnu sprungusveimsins, en jafnframt geta myndast rennislisleiðir með VNV-ASA-læga stefnu. Austast í öskjunni, austan Kröflu, ná gossprungur yfir þetta "þverbrotabelti", en þar er komið austur fyrir virkasta gliðunarbeltið og gossprungurnar eru farnar að vera sveiglagla sem bendir til brotamynsturs tengt sjálfri öskjunni.

Annað einkenni gosvirkinnar er eftirtektarvert, en það er sú áráttu eldsumbrota að byrja með sprengigosum norður með vestanverðri Kröflu, en lítið er um að þar komi upp hraunbráð. Krisján Sæmundsson telur að þarna sé grunnt á kvíkuhólf með súru bergi. Við innskot basískrar kvíku inn í slíkt berg, sem hefur verulega lægra bræðslumark, getur það yfirhitnað og valdið sprengigosi. Einhverra hluta vegna nær basísk kvíka ekki til yfirborðs og fyllir ekki brot og gosrásir sprengigosanna. Þetta getur þýtt að vatnslekt sé meiri á þessum slóðum og mikið vatn í berginu getur átt þátt í tíðum sprengigosum.

Sjá má nokkra fylgni milli útbreiðslu jarðhitavirkni, eins og hún kemur fram í viðnámsmælingunum, og eldvirkinnar. VNV-ASA-læga jarðhitabeltið frá Leirhnjúk og ASA um suðurhlíðar Kröflu fellur saman við það beltí sem virðist skipta eldvirkinni innan öskjunnar. Jarðhitavirknin endurspeglar trúlega meiri innskotavirkni á þessum slóðum en annarstaðar í öskjunni og þyngdarmælingar benda til hins sama. Eins og sést á jafnviðnámskortunum frá 250 m ofan sjávarmáls og niður að sjávarmáli (myndir 25-30) kemur fram veruleg jarðhitavirkni norður með vesturhlíðum Kröflu sem sýðar sveigir til NV þegar nálgast öskjubrúnina. Þessi jarðhitavirkni fellur saman við það svæði þar sem sprengigos hafa verið tíðust og norðurhlutinn er á þeim slóðum þar sem eldvirknin var við lok Hólselda með bæði hraun og sprengigosum. Þarna eru innskot undir sem virka sem hitagjafir og hugsanlega er vatnslekt með meira móti eins og líkum var leitt að áður.

Þegar kemur niður fyrir sjávarmál teygir jarðhitavirknin sig eftir miðrein sprungukerfisins, gegnum Leirhnjúk, nokkurn veginn barma á milli í öskjunni. Á þessum slóðum hefur eldvirkni verið hvað mest á nútíma og trúlega má gera ráð fyrir að jarðhitavirknin fari þarna vaxandi í kjölfar Mývatns- og Kröfluelda. Einnig kemur fram, neðan sjávarmáls, jarðhitavirkni undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og austan Leirhóls. Virkni undir Sandabotnafjalli er á þeim slóðum þar sem eldvirknin var á Sandabotnafjalli í Hólseldum fyrir um 2.000 árum. Jarðhitavirknin er trúlega tilkomin vegna innskota frá þeim atburði. 2.000 ár er ekki langur tími í lífi háhitakerfis og sé jarðhitinn undir Sandabotnafjalli tengdur innskotum frá Hólseldum verður að teljast líklegt að þar sé enn til staðar mikill hiti. Kulnuð ummyndun á yfirborði við Leirhól kann hinsvegar að benda til þess að virkni hafi verið meiri, en bæði er að aðfærsluæðar til yfirborðs geta verið forgengilegar vegna útfellinga og eins er mögulegt að ummyndunin við Leirhól sé frekar tengd viðnámsfrávikinu austan við Leirhól, sem ekki þarf endilega að vera af sama uppruna og undir Sandabotnafjalli því þau virðast aðskilin um 200 m niðurfyrir sjávarmál (sjá mynd 33).

Árið 1991 var boruð 204 m djúp hola við Leirhól. Mælingar í holunni sýna háan hita (óbirt gögn Orkustofnunar). Ofan 150 m dýpis sýna mælingar merki um viðsnúin hitaferil, sem bendir til láréttis streymis jarðhitavats þannig að holan virðist vera til hliðar við uppstreymisrás. Neðan 150 m vex hitastigið nokkurnvegin línulega og er orðið um 175 °C á 204 m dýpi. Holan



sýnir því að á þessu svæði er virkt jarðhitakerfi og kulnuð ummyndun á yfirborði er því trúlegast merki eftir rás til yfirborðs, sem lokast hefur af útfellingum.

Eins og áður hefur komið fram finnast merki þess að ummyndun sé ekki í jafnvægi við hitastig og að kæling hafi orðið í hluta jarðhitakerfisins. Þetta á við um efsta kílómetrann undir Leirbotnum og sunnanverðum Vítismó annarsvegar og í holu KJ-18 austast undir suðurhlíðum Kröflu. Kælingu í holu KJ-18 má skýra í ljósi eldvirkinnar. Ofan sjávarmáls er á þessum slóðum mjódd í viðnámsfrávikinu sem sýnir að jarðhitavirknin hefur verið minni en bæði vestan- og austan við. Trúlegast hefur jarðhitavirknin ofan sjávarmáls á þessum stað verið vegna aðrennslis jarðhitavatns eftir VNV-ASA-lægum sprungum frá öflugum uppstreymi í suðurhlíðum Kröflu. Hóla KJ-18 er rétt austan við gossprungu upp af rótum Grænagils, þar sem gaus í Hólseldum. Við gosið hefur myndast berggangur sem lokaði fyrir streymi jarðhitavatns úr vestri og svæðið austan gangsins tók að kólna. Aðstæður svipaðar þessu sáust í holu NJ-12 í Kýrdal á Nesjavallasvæðinu (Knútur Árnason o.fl., 1987), en samanburður á hitamælingum og ummyndun sýnir að þar hefur orðið kæling. Hóla NJ-12 er skammt vestan við gossprungu sem var virk fyrir um 2.000 árum. Talið er að við gosið hafi myndast gangur sem lokaði fyrir aðrennslis jarðhitavatns úr austri.

Kælingu í hinu svokallaða efra kerfi undir Leirbotnum og Vítismó hafa menn einnig látið sér detta í hug að tengja við eldvirni í Mývatnseldum. Sú tilgáta hefur verið sett fram að við sprengigosið í Víti hafi þrýstingur í efra kerfinu, vestan við Víti og Hveragil, fallið mikið og hitastig lækkað í kjölfar suðu. Ekki skal hér lagður dómur á þessa tilgátu, en einnig má hugsa sér að kælingin sé vegna aðstreymis kalds vatns úr norðri eftir sprungum og brotum. Jafnvíðnámskort 350 m ofan sjávarmáls (mynd 23) sýnir vik frá norðri inn í viðnámsfrávikinu undir Vítismó. Vikið hefur sömu stefnu og sprungur og misgengi og er túlkað sem minni jarðhitavirkni vegna niðurstreymis kalds vatns eins og áður hefur komið fram.

Auk fylgni milli jarðhitavirkni og eldvirkni og brota innan öskjunnar sýna viðnámsmælingarnar nokkra fylgni milli jarðhitavirkni og öskjujaðarins. Viðnámsmælingarnar sýna að á þremur stöðum rís jarðhitavirkni hátt við öskjujaðarinn án þess að þar hafi verið sérstök eldvirkni, þ.e. undir Leirhnúkshrauni vestan við Hvíthólaklif, austast í Sandabotnaskarði austan Leirhóls og upp af Sandabotnum. Þarna kemur hvort tveggja til greina að til staðar séu varmagjafar (innskot) við öskjujaðarinn og/eða að lekt sé meiri við öskjubrotið og þar sé uppstreymi jarðhitavatns djúpt að. Gufur sjást í hrauninu vestur af Hvíthólaklifi þannig að þar sýnir viðnámsfrávikinu vafalítið háan hita. Eins virðist meiga gera ráð fyrir að viðnámsfrávikinu þar þýði háan hita, út frá háum hita í holunni við Leirhól. Þó er reyndar ekki alveg ljóst hvort jarðhitavirknin austan Leirhóls sé aðskilin frá virkninni undir Sandabotnafjalli, en viðnámsmælingarnar benda til þess að svo sé að einhverju leyti. Ekki er vitað hvort viðnámsfrávikinu upp af Sandabotnum endurspegli háan hita. Hugsanlega hefur þar verið jarðhiti sem síðan hefur dvínað. Ekki fæst úr því skorið nema með borunum.

Viðnámsmælingarnar sýna tvö áberandi köld svæði í efsta kílómetra staflans innan austurhluta öskjunnar. Annarsvegar norður eftir austanverðum Hlíðardal og undir vesturbrún Sandabotnafjalls norður að malarnámunum og hinsvegar í norð-austur hluta öskjunnar frá Kröflu að Hágöngum og Graddabungu. Kalda tungan norður eftir austanverðum Hlíðardal og undir vesturbrún Sandabotnafjalls stingur nokkuð í augu, en hún er að hluta til staðfest með borunum. Árið 1991 var boruð 166 m djúp hola í vesturmynni Sandabotnaskarðs, í austurjaðri köldu tungunnar. Hitamælingar í holunni sýndu að hitastig á 160 m dýpi er einungis 40 °C (óbirt gögn Orkustofnunar), sem er um 100 °C lægra en við Leirhól fyrir austan og Hvíthóla fyrir vestan. Eld-

virgni hefur ekki verið á þessum slóðum á nútíma, en í lok síðasta jökulskeiðs varð sprengigos þar sem nú eru malarnámur Kröfluvirkjunar, við norðurmörk köldu tungunnar. Líklegast er að berggangar hindri rennsli jarðhitavats úr norðri, vestri og austri og hugsanlega er þarna niðurrennsli kalds vatns á leið inn í hringrás jarðhitakerfisins.

Á kalda svæðinu NA við Kröflu hefur eldvirkni verið mjög lítil á nútíma nema við Graddabungu og Hreindýrahól. Reyndar gaus sprunga austast í öskjunni mjög þunnfljótandi og gasríku hraun á Lúdentsskeiði við lok ísaldar, en þó að hraunið hafi flæmst yfir stórt svæði er rúmmál þess ekki mikið. Gosvirkni var þó nokkur við Graddabungu og Hreindýrahól bæði á Lúdentsskeiði og í Hólseldum á Hverfjallskeiði. Ástæða þess að sú eldvirkni hefur ekki leitt til jarðhitavirkni er ekki augljós, en líklega hafa innskot ekki safnast fyrir á þessum slóðum heldur hafi kvika átt greiða leið til yfirborðs og norður eftir sprungusveimnum. Þarna getur líka verið meiri lekt en annars staðar innan austurhluta öskjunnar og aðstreymi kalds grunnvatns til jarðhitakerfisins þannig að varminn skili sér ekki upp með hræringu grunnvatns heldur inn til meginjarðhitakerfisins.

Það er eftirtektarvert að viðnámsmælingarnar sýna að jarðhitavirknin nær í megindráttum alveg að og jafnvel út fyrir öskjubrúnina að sunnanverðu, en að norðnaverðu nær hún varla að öskjubrúninni. Sprungugos á nútíma, tengd umbrotum í megineldstöðinni, hafa verið mun tíðari norðan VNV-ASA-læga beltisins í gegnum öskjuna. Þetta bendir til þess að gliðnun hafi verið meiri norðan við þverlæga beltið og kvika átt greiðari leið norður úr öskjunni en til suðurs. Mælingar á láréttum hreyfingum yfir sprungusveiminn, samfara Kröflueldum, sýna meiri gliðnun norðan við öskjuna en sunnan hennar (Páll Einarsson, 1991). Hugsanlegt er því að innskotavirkni hafi verið minni við norðurbrúnina. Ennfremur má gera ráð fyrir að meiri gliðnun valdi meiri lekt og ágangi kalds grunnvatns við norðurbrún og norðan öskjunnar. Vegna hins mikla fjölda opinna sprungna og gjáa norður úr öskjunni, lækkar grunnvatnsborð trúlega mikið við norðurbrún öskjunnar og kann það að vera ein af ástæðum þess að minni jarðhitavirkni sést við norðurjaðarinn.

## 7. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

Viðnámsmælingarnar gefa skýra mynd af jarðhitavirkni í efsta kílómetra jarðlagastafans í austurhluta Kröfluöskjunnar. Ofan sjávarmáls kemur fram VNV-ASA-lægt jarðhitabelti frá Leirhnjúk, ASA um suðurhlíðar Kröflu og að austurbrún öskjunnar við Sandabotna. Beltið fellur saman við þyngdarhæð innan öskjunnar og er talið tilkomið vegna mikilla innskota við brot með sömu stefnu. Norður úr því gengur jarðhitavirkni norður eftir miðrein sprungusveimsins og eins norður frá Víti og NV undir Vítismó og fellur hún að verulegur leyti saman við megingosvirkni innan öskjunnar á nútíma. Suðurmörk VNV-ASA-læga jarðhitabeltisins eru mun skarpari. Þau eru hugsanlega tilkomin vegna þéttra ganga sem skotist hafa upp í öskjufyllinguna.

Neðan sjávarmáls teygir jarðhitavirkni sig eftir miðrein sprungusveimsins innan öskjunnar. Einnig kemur fram jarðhitavirkni undir sunnanverðu Sandabotnafjalli og austur af Leirhól. Hún virðist vera, að einhverju leyti a.m.k., aðskilin frá meginjarðhitabeltinu og hugsanlega eru þarna tvö uppstreymissvæði sem skiljast í sundur af SV framhaldi Hrafninnuhryggs. Jarðhitavirknin undir Sandabotnafjalli fellur saman við um 2.000 ára gamla eldvirkni í Hólseldum sem bendir til þess að þar geti verið öflug jarðhitavirkni. Borun við Leirhól sýndi hátt hitasig sem styrkir þá skoðun enn frekar.

Nokkra þætti í breytingu jarðhitavirkinnar með tíma, svo sem kælingu austast undir suðurhlíðum Kröflu og í efrakerfinu undir Leirbotnum og Vítismó má ef til vill einnig skýra í ljósi eldvirkinnar. Kælingu SA við Kröflu má skýra með tilkomu ganga samfara eldvirkni, sem loka af rennsli jarðhitavökva úr vestri. Einnig hefur verið stungið upp á því að kælingin í efrakerfinu í Leirbotnum og undir Vítismó sé afleiðing sprengigossins í Víti í upphafi Mývatnselda. Viðnámsmælingarnar benda til þess að einnig geti verið um að ræða kælingu vegna leka kalds grunnvatns niður í kerfið því að þær sýna hik í jarðhitavirkninni grunnt undir Vítismó, sem talið er sína ágang kalds grunnvatns niður um brot.

Auk fylgni við eldvirkni virðist mega sjá fylgni jarðhitavirkni og öskjujaðarsinns. Merki sjást um uppstreymissvæði í Leirhnjúkshrauni vestur af Hvíthólaklifi, austur af Leirhól og við austurjaðarinn upp af Sandabotnum. Gufur í hrauninu vestur af Hvíthólaklifi og hár hiti í holunni við Leirhól sýna að á þeim stöðum er trúlega nokkuð öflugur jarðhiti. Óljósara er hvort enn er til staðar verulegur jarðhiti við austurjaðarinn upp af Sandabotnum.

Tvö áberandi köld svæði koma fram í efsta kílómetra stafans innan austurhluta öskjunnar. Annars vegar norður eftir austanverðum Hlíðardal og undir vesturbrún Sandabotnafjalls og hinsvegar í norð-austur hluta öskjunnar frá Kröflu að Hágöngum og Graddabungu. Á þessum slóðum hefur eldvirkni verið lítil á nútíma og getum er að því leitt að þar sé niðurstreymi kalds grunnvatns á leið inn í hringrás jarðhitakerfisins. Viðnámsmælingarnar benda ennfremur til þess að jarðhitavirkni sé ekki eins áberandi við norðurjaðar öskjunnar eins og við suðurjaðarinn. Það er talið geta verið vegna þess að gliðnun hafi í seinni tíð verið meiri norðan þverlæga beltisins í gegnum öskjuna og kvika hafi átt greiðari leið norður úr öskjunni en suður og því sé þar minna af innskotum. Meiri gliðnun veldur líka meiri vatnslekt þannig að grunnvatnsborð er trúlega mun lægra norðan öskjunnar og meiri kæling af ágangi kalds grunnvatns.

Núverandi vinnslusvæði Kröfluvirkjunar eru annars vegar innan VNV-ASA-læga jarðhitabeltisins, í suðurhlíðum Kröflu og Leirbotnum, og hinsvegar við Hvíthóla, við suðurjaðar öskjunnar. Skömmu eftir upphaf Kröfluelda kom fram mengun af kvikugösum í vestanverðu VNV-ASA-læga jarðhitabeltinu þannig að jarðhitavökvinn var ekki nýtanlegur til virkjunar. Seinnitíma boranir hafa sýnt að jarðhitavökvinn þar er of súr til beinnar notkunnar og því ekki ljóst hvenær sá

hluti jarðhitakerfisins, sem trúlega er sá öflugasti, verður nýtanlegur til frekari virkjunar.

Niðurstöður viðnámsmælinganna sýna jarðhitavirkni vöða innan austurhluta Kröfluöskjunnar. Mörk jarðhitavirkninnar eru vel ákvörðuð til norðurs, austurs og suðurs en mælingar vantar í vesturhluta Kröfluöskjunnar. Líkum hefur verið að því leitt að öflugan jarðhita geti verið að finna á stöðum sem ekki, eða lítið, hefur verið borað. Þau svæði sem þar koma einkum til greina eru:

- Svæðið norður með vesturhlöðum Kröflu og norður af Víti
- Á sunnanverðu Sandabotnafjalli
- Við öskjujaðarinn austan Leirhóls
- Í Leirhnjúkshrauni vestur af Hvíthólaklifi
- Við austurjaðar öskjunnar við Sandabotna.

Hitaástand og vinnslueiginleika þessara svæða þarf að kanna nánar með borunum.

Að fengnum niðurstöðum þessarar rannsóknar má segja að yfirborðsrannsóknir svæðisins séu komnar á það stig að hægt sé að staðsetja borholur markvisst í austurhluta Kröfluöskjunnar. Það er ljóst að því fer fjarri að möguleikar á vinnslu gufu í austurhluta öskjunnar hafi verið kannaðir til fulls og líklegt verður að teljast að þar megi vinna mun meiri orku en nú er gert.

## 8. HEIMILDIR

- 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.
- Fredrik H. Andersen, 1981: *Den magnetotelluriske metode, samt eksempel på dens anvendelse i det geotermiske højtemperatur område Krafla, nord Island*. Laboratoriet for Geofysik, Århus Universitet, októberr 1981.
- Freyr Þórarinnsson, 1980: *KRAFLA. Viðnámsmælingar með fjórþólaðferð sumarið 1979*. Orkustofnun, OS80013/JHD07.
- 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 Hengils svæði. 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.
- Helga Tulinius, 1980: *Time-Domain Electromagnetic Survey in Krafla, Iceland*. Lokaritgerð til Msc prófs, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, Bandaríkin, 1980.
- Hjalti Franzson, 1988: *Nesjavellir. Borholujarðfræði. Vatnsgeymd 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.
- Kaufman, Alexander A. og George V. Keller, 1983: *Frequency and Transient Soundings*. Methodes in Geochemistry and Geophysics, Vol. 16. Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam.
- Knútur Árnason, 1984: *The effect of finite potential electrode separation of Schlumberger soundings*. 54th Annual International SEG Meeting, Atlanta. Extended Abstracts, 129-132.
- Knútur Árnason, Brynjólfur Eyjólfsson, Karl Gunnarsson, Kristján Sæmundsson og Axel Björnsson, 1984: *Krafla-Hvítthóll. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðikönnun 1983*. Orkustofnun, OS-84033/JHD-04.
- 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, 1989: *Central-Loop Transient ElectroMagnetic Soundings 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, 845-851.
- Knútur Árnason, Hjálmar Eysteinnsson og Einar Hrafnkell Haraldsson, 1991: *Viðnámsmælingar í Kröflu 1991*. Orkustofnun, greinargerð KÁ/HE/EHH-91/5.
- Knútur Árnason, 1993: *Jarðhiti á Ölkelduhálssvæði. Viðnámsmælingar 1991 og 1992*. Orkustofnun, OS-93037/JHD-10, 82 s.
- Kristján Sæmundsson, Guðmundur Guðmundsson, Guðmundur Pálmason, Karl Grönvold, Karl Ragnars og Stefán Arnórsson, 1971: *Námafjall-Krafla. Áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðanna*. Orkustofnun, júní 1971.
- Kristján Sæmundsson, 1991: *Jarðfræði Kröflukerfisins. Í: Náttúra Mývatns*. Ritstj. Arþór Garðarsson og Árni Einarsson. Hið íslenska náttúrufræðifélag, 25-95.
- Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius, 1983: *Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjaneskaga 1981 og 1982*. Orkustofnun, OS-83049/JHD-09, 70 s.
- Ólafur G. Flóvenz, 1984: *Application of the Head-on resistivity method in geothermal exploration*. Geothermal Resources Council, V 8, 1984, bls. 493-498.
- Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Knútur Árnason, 1985: *Resistivity structure of the upper crust in Iceland*. J. Geophys. Res., 90, 10136-10150.
- Páll Einarsson, 1991: *Umbrotin við Kröflu 1975-1989*. Í Náttúra Mývatns. Ritstj. Arþór 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.
- Ragna Karlsdóttir, 1993: *Námafjall, TEM-viðnámsmælingar 1992*. Orkustofnun OS-93022/JHD-12 B 34 s.
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988: *Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings*. Geophysics, v. 53. bls. 1459-1468.

## ENGLISH SUMMARY

This report summarizes the results of several resistivity surveys carried out in the eastern part of the Krafla caldera. The data set used comprises Schlumberger-, head-on resistivity-, and central-loop TEM-data collected in several surveys in the period from 1970 to 1994. The interpretation of the resistivity data is presented both as resistivity sections and iso-resistivity maps.

The observed resistivity structure gives a clear picture of the geothermal activity in the uppermost 1 km of the eastern part of the caldera. Rocks affected by geothermal activity appear as a resistivity anomaly composed of low resistivity cap underlain by a resistive core. Comparison with well data shows that, like in other fresh water saturated high temperature geothermal systems in Iceland, the low resistivity cap reflects the smectite-zeolite zone and the resistive core appears in the mixed-layer-clay- and chlorite zones.

Above sea-level, the geothermal activity has a general WNW-ESE trend in a zone running from Leirhnjúkur, through the southern slopes of Mount Krafla, and to the caldera rim at Sandabotnar, probably due to intense dike intrusions associated to a buried WNW-ESE tectonics. Geothermal activity is also observed to the north of this zone, to the north and north-west from Víti. This activity correlates with postglacial volcanic activity. The southern margin of the WNW-ESE geothermal zone is much sharper and is thought to be controlled by impermeable dikes.

Below sea-level geothermal activity extends across the caldera from NE to SW along the central part of the active fissure swarm. Geothermal activity is also observed below the southern part of Sandabotnafjall and at the caldera rim east of Leirhóll. This activity seems to be, at least to some extent, separated from the main activity to the north. The activity under Sandabotnafjall is found in an area where volcanic activity occurred about 2,000 years ago. This is taken as an indication of substantial activity at present, despite minor surface manifestations. A 204 m deep testwell drilled near Leirhóll, showing high temperatures, lends a strong support to this.

In addition to the correlation to the volcanic activity, a correlation is found between geothermal activity and the caldera rim. The resistivity data indicate the presence of geothermal plumes at the caldera rim west of Hvíthólaklif, east of Leirhóll and in Sandabotnar. Steaming ground west of Hvíthólaklif and high temperature in the well at Leirhóll indicate high temperatures, but the present thermal conditions in Sandabotnar need to be obtained by drilling.

Two cool zones are observed in the uppermost kilometer of the eastern part of the caldera. A cool (high resistivity) zone is found under the eastern part of Hlíðardalur and the western part of Sandabotnafjall, and also in the NE part of the caldera, from Mount Krafla and towards Hágöng and Graddabunga. No, or only minor, postglacial volcanic activity is found in these areas and it is suggested that these cool zones reflect down-flow of cold groundwater, descending towards the convecting geothermal system. The resistivity data seem to indicate that geothermal activity is not as pronounced at the northern caldera rim as at the southern rim. Post glacial volcanic activity and geodetic surveys, during and after the most recent rifting and volcanic episode, indicate larger spreading across the the fissure swarm to the north of the caldera, than to the south. This could mean that the magma has had relatively open



flow paths out of the caldera to the north and intrusions are more common at the southern rim.

The present production fields are in the eastern part of the WNW-ESE geothermal zone, in Leirbotnar and the southern slopes of Mount Krafla, and at Hvíthólar, at the southern caldera rim. The western part of the WNW-ESE geothermal zone is, since the Krafla volcanic eruptions, contaminated by magmatic gases and will probably not be exploitable in near future. The resistivity survey indicates however some promising drilling targets in the eastern part of the caldera. These are:

- Along the western slopes of Mount Krafla and to the north of the crater Víti.
- On the southern part of the mountain Sandabotnafjall,
- At the caldera rim east of Leirhóll,
- In Leirhnjúkshraun lava field west of Hvíthólaklif,
- At the eastern caldera rim at Sandabotnar.



## VIÐAUKI I: Viðnámsmæliaðferðir

Í þessum viðauka er gerð stuttlega grein fyrir þeim viðnámsmæliaðferðum sem beitt er í jarðhitarannsóknnum og fjallað er um í þessari skýrslu. Viðnámsmæliaðferðum má skipta í tvo meginflokka þ.e. jafnstraumsaðferðir (e. direct current methods) og rafsegulaðferðir (e. electromagnetic methods). Í jafnstraumsaðferðum er sendur rafstraumur ofan í jörðina og mælt hversu mikið af honum hleypur í yfirborði (mældur spennunundur í yfirborði). Í rafsegulaðferðum er notað tímavaháð rafsegulsvið og mæld spenna (rafsvið) og/eða span (breyting í segulsviði) á yfirborði jarðar. Fram til ársins 1988 var nær eingöngu beitt jafnstraumsaðferðum til að kanna viðnám í efsta kílómetra jarðskorpunnar hér á landi. Eftir 1988 hafa TEM-mælingum með straumlykkju sem uppsprettu að mestu leyst jafnstraumsaðferðir af hólmi við rannsóknir á háhitasvæðum.

### Jafnstraumsaðferðir

Í jafnstraumsaðferðum er sendur rafstraumur ofan í jörðina og mælt hversu mikið af honum hleypur í yfirborði með því að mæla spennun milli skauta á yfirborði. Til eru margar gerðir jafnstraumsmælinga þar sem mismunurinn liggur í breytilegri uppsetningu straum- og spennumæliskauta.

**Schlumbergermælingar** eru þær jafnstraumsmælingar sem mest hafa verið notaðar hérlendis. Með þeim er kannað viðnám sem fall af dýpi undir mælistað. Tveimur straumskautum og tveimur spennumæliskautum er komið fyrir á beinni línu. Straumskautin eru yst en spennuskautin innst og er uppsetning skautanna samhverf um mælimiðju. Til þess að kanna viðnám sem fall af dýpi er fjarlægðin milli straumskautanna aukin jafnt og þétt en fjarlægðinni milli spennuskautanna haldið líttill. Út frá útsendum straum og mældri spennu er reiknað sýndarviðnám sem fall af straumarmslengd (hálfri lengd senditvívól) og er sýndarviðnámið síðan túlkað yfir í raunverulegt viðnám undir mælistað.

**Viðnámsnniðsmælingar** eru notaðar til að kanna breytingar viðnáms jarðar í lárétta stefnu (Ólafur G. Flóvenz, 1984). Uppsetning skauta er svipuð og í Schlumbergermælingum að öðru leyti en því að sett er upp þriðja straumskautið fjarri mælistað. Straumsendirásinni er því hægt að loka á þrjá vegu, þ.e. milli straumskautanna á mællínunni og milli fjarlæga skautsins og annars skautsins á mællínunni og síðan hins. Með því loka straumrásinni milli fjarlæga skautsins og straumskauts á mællínunni er líkt eftir spennu merki frá aðeins einu straumskauti. Í stað þess auka fjarlægðina milli straumskautanna, eins og gert er í Schlumbergermælingum eru öll fjögur skautin færð, oftast um 25 m í senn, eftir mællínunni og með því móti fást upplýsingar um breytingar viðnáms á sem næst föstu dýpi eftir línunni. Til að fá upplýsingar um breytileika viðnáms á mismunandi dýpi undir mællínunni er hún gjarnan mæld með nokkrum (tveimur til þremur) mismunandi straumarmslengdum senditvívól.

**Tvívólmælingar** hafa verið notaðar til að reyna að kanna viðnám á meira dýpi en hægt er að gera með góðu móti með Schlumbergermælingum. Dýptarskynjun jafnstraumsmælinga vex með fjarlægð milli straum- og spennumæliskauta. Til að fá mikla dýptarskynjun í Schlumbergermælingum þarf að gera senditvívólinn (fjarlægðina milli straumskauta) mjög stóran. Slíkt er óhentugt og tímafrekt. Í tvívól mælingum er þess í stað komið fyrir föstum senditvívól og spennan í yfirborði mæld með spennumælingatvívól sem færður er skref fyrir skref í átt frá senditvívólum til að kanna viðnám á vaxandi dýpi. Til eru nokkrar gerðir tvívólmælinga með mismunandi afstöðu straum- og spennutvívóla. Í þeirri aðferð sem mest hefur verið

notuð hérlendis eru tv p larnir hafðir samsíða og spennutv p llin færður hornrétt út frá straumtv p lnum. Reynolds af tv p lm lingum hefur ekki verið jafn góð og af Schlumbergermælingum því að breytilegar aðstæður   næsta nágrenni spennutv p lsins geta valdið því að m lini urst  urnar verða óreglulegar og því erfitt að túlka gögnin.

**Fj r p lm lingar** eru náskyldar tv p lm lingum.   þeim eru settir upp tveir straumtv p lar nálægt hvor öðrum og þeir hafðir hornréttir hvor   annan. Sömuleiðis eru m eld spenna yfir tvo spennutv p la hornr tta hvorn   annan. Straumur er fyrst sendur   annan straumtv p llinn og hinir tveir hornr ttu þættir spennusvi sins mældir   mælistað. Straumur er síðan sendur   hinn straumtv p llinn og hornréttir þættir spennusvi sins mældir. Með þessu móti má fá nánari upplýsingar um dreifingu straumsins frá senditv p lunum og jafnframt er dregið úr áhrifum staðbundinna aðstæðna við spennum littv p lana. Til að kanna viðnám með vaxandi dýpi eru spennum littv p larnir færðir fj r senditv p lunum. Túlkun fj r p lm linga er, eins og annarra jafnstraumsmælinga sem ætlað er að skyggjast djúpt   jörðu, erfð og vandasöm. M lini urst  urnar eru undir áhrifum staðbundinna aðstæðna við spennum lista inn og umfangsmiklir pr fvi ir líkanreikningar aru því nauðsynlegir ef vel   að vera.

## Rafsegula fer ir

  rafsegulaðferðum er notað t mah   rafsegulsvið   stað t ma h  s spennusvi s frá jafnstraum eins og gert er   jafnstraumsaðferðum. Rafsegula fer ir skiptast raunar   tvo flokka eftir uppruna rafsegulsvi sins. Annarsvegar eru aðferðir þar sem rafsegulsvið með þekktri og fyrirfram ákveðinni hegðun er framkallað með sendib na i og hinsvegar aðferðir sem nota rafsegulsvið frá sveiflum   segulsviði jarðar.

**TEM-mælingar** (transient electromagnetic) með straumlykkju sem uppsprettu nota rafsegulsvið sem er gert af manna völdum. L g  er v rlykkja   jörðina, yfirleitt ferningslaga og um 300 m   kant. Rafstraumur er sendur   lykkjuna og hann síðan rofinn skyndilega. Straumurinn b r til segulsvið og þegar hann er rofinn fer segulsviðinu að hnigna. Við það spanast straumar   jörðinni sem leitast við að viðhalda segulsviðinu. Eftir því sem lengra líður frá því að straumurinn var rofinn n  spanstraumarnir dýpra   jörðu og segulsviðið   yfirborði dofna. Hnignun segulsviðsins er m eld með því að m la span   spólu   miðju sendilykkjunnar.  t frá styrk spansins   m tt kusp lunni, sem falli af tíma frá því slökkt var   straumnum, má síðan ákvarða eðlisviðnámið undir mælistað, sem fall af dýpi (Knútur Árnason 1989).

**Tv p l-TEM-mælingar** eru skyldar TEM-mælingum með straumlykkju. Dýptarskynjun TEM-mælinganna vex með fjarlægðinni milli straumv rsins sem b r til segulsviðið og spólunnar sem nemur spani . Hana má því auka með því að stækka sendilykkjuna, en slíkt er  hengugt ef kanna   viðnám   miklu dýpi því lykkjan þarf það vera mjög stór.   tv p l TEM-mælingum er,   stað þess að nota lykkju, notaður jar tengdur tv p ll og m tt kusp lan færð skref fyrir skref frá senditv p lnum til að auka d ptarskynjunina. Þetta hefur reyndar þann  kost   f r með sér að m lini urst  urnar verða h  ar vi n msa st  um nálægt senditv p lnum og einv  túlkun mælinganna er oft ófullnægjandi.

**MT-mælingar** (Magneto Telluric) nota sveiflur   segulsviði jarðar sem uppsprettu rafsegulsviðs.   yfirborði er m eld spenna yfir tvo hornr tta tv p la og samtímis er m eld breyting   láréttum  ttum segulsviðsins með því að m la span   sp lum hornr ttum hvorri   aðra.  t frá sambandi spennu og spans má fá upplýsingar um elisvi n mi  undir mælistað. Spennan og breytingarnar   segulsviðinu er skráð, hvort tveggja sem fall af tíma en er síðan greint   sveifluh tti með mismunandi tíðni. Sveiflur með mismunandi tíðni gefa upplýsingar um við-

nám á mismunandi dýpi og er dýptarskynjunin því meiri sem tðnin er lægri. Styrkur í sveiflum jarðsegulsviðsins er því meiri sem tðnin er lægri og því hafa MT-mælingar einkum verið notaðar til að kanna viðnám á miklu dýpi (2-40 km).

## Túlkun viðnámsmælinga

Mæliniðurstöður viðnámsmælinga eru yfirleitt settar fram sem sýndarviðnám. Samband uppsprettumerkis og mælds merkis er háð eðlisviðnámi jarðar. Niðurstöður einstakra mæligilda eru settar fram sem það viðnámsgildi einsleitrar (e. homogeneous) jarðar sem gefa mundi hið mælda merki við það uppsprettumerki sem notað var, og er það kallað sýndarviðnám. Fyrir mælingar sem kanna viðnám sem fall af dýpi er sýndarviðnámið fært sem fall af fjarlægð milli straum- og spennumæliskauta í jafnstraumsmælingum, sem fall af tíma eftir að straumur er rofinn í uppsprettu í TEM-mælingum og sem fall af tðni í MT-mælingum. Niðurstöður viðnámsniðsmælinga eru settar fram sem sýndarviðnám sem fall af staðsetningu á mæliðnu. Túlkun mælinganna felst í því að ákvarða raunverulega dreifingu eðlisviðnáms jarðarinnar út frá sýndarviðnámsferlunum eftir því sem kostur er.

Einvíð túlkun gerir ráð fyrir því að viðnám breytist einungis með dýpi (eina átt), en ekki í láréttar stefnur. Af þessu leiðir að ekki er um að ræða einvíða túlkun á viðnámsniðsmælingum, heldur eingöngu á mælingum sem kanna viðnám sem fall af dýpi. Gert er ráð fyrir því að jörðinni undir mælistað megi skipta upp í endanlega mörg lárétt lög með mismunandi eðlisviðnámi. Túlkunarmaður velur fjölda viðnámslaga og gefur ágiskun gildi fyrir þykktir og eðlisviðnám laganna. Tölvuforrit ákvarðar síðan viðnámsgildi og þykktir laga sem best svara til mælda sýndarviðnámsferilsins fyrir þann fjölda viðnámslaga sem valinn var. Hver sýndarviðnámsferill er túlkaður þannig með mismunandi fjölda viðnámslaga. Að öllum jafnaði er það viðnámslíkan valið sem lokalskan, sem gefur reiknaðan sýndarviðnámsferil sem fellur að þeim mælda og hefur fæst viðnámslög.

Að lokinni frumtúlkun mælinganna eru teiknuð viðnámsnið og nærliggjandi viðnámslíkөн borin saman. Ef þurfa þykir er valið líkan fyrir einstaka mælingar með öðrum fjölda laga en upphaflega var valið. Lagafjöldi er valinn til að gæta samræmis við næstu mælingar en þó þannig að ekki sé slegið af kröfum um að reiknaður líkanferill falli að mælda ferlinum.

Tvívíð túlkun gerir ráð fyrir því að eðlisviðnám jarðar geti breyst með dýpi og í eina lárétta stefnu. Tvívíð túlkun er mun tímafrekari og flóknari en einvíð túlkun en gefur að jafnaði mun áreiðanlegri niðurstöður. Orkustofnun hefur yfir að ráða forritum til tvívíðrar túlkunar jafnstraumsmælinga og MT-mælinga. Tvívíð túlkun á TEM-mælingum er mun flókanari og er enn á rannsóknarstigi. Orkustofnun kom sér fyrst upp hugbúnaði til tvívíðrar túlkunar á jafnstraumsmælingum árið 1981. Árið 1985 var þróaður fullkomnari hugbúnaður þar sem hægt er að taka tillit til áhrifa landslags á mæliferlana. Í fyrstu var tvívíð túlkun gerð þannig að sett var upp líkan og reiknað í tölvu hvaða mæliniðurstöður fengjust ef viðnámsskipan jarðarinnar væri eins og líkanið gerir ráð fyrir og þær bornar saman við gögnin sem verið var að túlka. Út frá mismunni mældra og reiknaðra ferla var líkaninu síðan breytt og nýir ferlar reiknaðir og þannig koll af kalli þar til viðunandi samræmi fékkst. Þetta var mjög tímafrekt og hefur hugbúnaðurinn því verið þróaður enn frekar þannig að hann breytir líkaninu að hluta til sjálfvirk.

## Samanburður aðferða

Hér verður stuttlega fjallað um kosti og galla þeirra mæliaðferða sem taldar hafa verið upp hér að framan. Athyglinni er einkum beint að þeim aðferðum sem notaðar voru við öflun þeirra gagna sem fjallað er um í þessari skýrslu þ.e.a.s. Schlumberger-, viðnámsniðs- og TEM-mælingum. (Hér á eftir verður, þegar talað er um TEM-mælingar, átt við TEM-mælingar með straumlykkju)

Schlumbergermælingar eru að öllum jafnaði gerðar af 4 mönnum og þær er einungis hægt að gera að sumarlagi á ófrosinni og snjólausri jörð. Afköst við slíkar mælingar hérlendis hafa, í áronna rás, reynst vera um 2 mælingar á dag að jafnaði. Á þurrum og gróðurlitlum svæðum eru þær erfiðar og seinlegar vegna erfiðleika við að koma nægum straumi til jarðar. Eins og áður segir er fjarlægðin milli straumskauta í Schlumbergermælingum aukin til að kanna breytingar í viðnámi með dýpi. Til að kanna viðnám frá yfirborði og niður á um 800 m dýpi þarf að hafa þessa fjarlægð frá nokkrum metrum og upp í um 3 km. Af því leiðir að það eru ekki einungis viðnámsbreytingar með dýpi sem hafa áhrif á mæliniðurstöður heldur einnig viðnámsbreytingar í lárétta stefnu. Þetta verður til þess að einvöld túlkun mælinganna er oft ófullnægjandi og beita verður tvívíðri túlkun. Fram til 1981 voru Schlumbergermælingar einungis túlkaðar með einvöldri túlkun og voru þær staðsettar og senditvívól þeirra snúið eins og best þótti henta vegna landslags. Til þess að hægt sé að beita tvívíðri túlkun á Schlumbergermælingar þarf að gera nokkrar mælingar á beinni línu og hafa senditvívóla þeirra samsíða línunn. Mælingarnar á línunn eru síðan túlkaðar í heild með því að gera eitt líkan af viðnámsdreifingunni undir línunn.

Viðnámsniðsmælingar eru að öllum jafnaði gerðar af 6 mönnum og eru afköst u.þ.b. 1 km á dag að meðaltali með 25 m milli mælistöðva. Um þær gildir það sama og Schlumbergermælingar, að þær er einungis hægt að gera á ófrosinni og snjólausri jörð. Til að fá upplýsingar um breytingu viðnáms í lárétta stefnu á mismunandi dýpi eru mælingarnar yfirleitt gerðar með nokkrum mismunandi straumörmum senditvívól.

Með því að beita saman Schlumberger- og viðnámsniðsmælingum og túlka öll mæligögnin með tvívíðum líkanreikningum má fá nákvæma mynd af viðnámsskipan í efsta kílómetranum undir mællínunum. Þessu var fyrst beitt við rannsóknirnar við Hvíthóla árið 1983 og síðar við yfirborðsrannsóknirnar á Nesjavallasvæðinu árin 1985 og 1986 með góðum árangri. Helsti gallinn við þessa aðferð er að hún er tímafrek og dýr, bæði við gagnasöfnun og túlkun. Þetta var ein meginástæða þess að farið var að kanna möguleika á beita fljótvirkari og ódýrari aðferðum.

TEM-mælingar með straumlykkju sem uppsprettu voru fyrst reyndar hér á landi sumarið 1986. Nesjavallasvæðið varð fyrir valinu sem þarf 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 fljótlegrar í 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 einvöld túlkun TEM-mælinga getur gefið allt að því jafn mikla upplausn og tvívöld túlkun jafnstraumsmælinga. Ástæða þessa er sú að TEM-mælingar eru í miklu meira mæli háðar viðnámsskipan 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 lágviðnámslag

er oft er 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 einvörðri túlkun TEM-mælinga mun áreiðanlegri mynd en samsvarandi nið byggð einvörðri túlkun á Schlumbergermælinga. Tilraunamælingarnar á Nesjavöllum sumarið 1986 sýndu að einvörð túlkun TEM-mælinga gefur lítið lakari upplausn en tvívörð túlkun á jafnstraumsmælingum (Knútur Árnason, 1987 og 1990). Vonast hafði verið til þess að TEM-mælingarnar hefðu meiri dýptarskynjun en Schlumbergermælingar, en í ljós kom að hún var mjög sambærileg.

TEM-mælingar hafa þann ótvíræða 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 komast auðveldlega um mælisvæði seinni hluta vetrar sem eru lítt- eða ófær farartækjum að sumarlagi. Helsti gallinn við mælivinnu seinni part vetrar er að meiri hætta er á að veður hamli vinnu en að sumri til.





## VIÐAUKI II: Viðnámsmælingar sem notaðar eru

Eftirfarandi töflur innihalda upplýsingar um þær viðnámsmælingar sem stuðst er við í þessari skýrslu, svo sem heiti, dagsetningu, staðsetningu í landshnitum og hæð yfir sjó.

*Tafla-1.* Staðsetning Schlumbergermælinga sem túlkaðar eru einvítt.

Heiti mæl.	Dagsetn.	X-hnit	Y-hnit	Hæð (m y.s.)
KR-16	70.07.22	441354	574750	475
KR-36	71.07.24	439323	576058	500
KR-54	71.08.13	441742	583515	660
KR-55	71.08.13	443461	584064	560
KR-71	76.07.05	444845	581163	545

Tafla-2. Staðsetning Schlumbergermælinga sem túlkaðar eru tvívítt.

Heiti mæl.	Dagsetn.	X-hnit	Y-hnit	Hæð (m y.s.)
KR-63	76.06.30	443450	578387	454
KR-64	76.07.03	443703	577400	440
KR-70	76.07.06	443357	578882	460
KR-73	76.07.06	443781	579145	463
KR-76	76.07.08	443280	577281	454
KR-78	76.07.09	443897	576344	392
KR-79	76.07.10	444033	575008	383
KR-99	83.07.05	443573	577901	454
KR-100	83.07.05	443773	576839	396
KR-101	83.07.06	444182	576786	400
KR-102	83.07.06	444091	577521	455
KR-103	83.07.07	444284	575943	388
KR-104	83.07.07	444334	575276	385
KR-105	83.07.08	444074	577525	454
KR-106	83.07.08	443681	577423	441
KR-107	83.07.09	443974	578304	461
KR-108	83.07.10	442531	576997	470
KR-109	83.07.10	443319	577307	452
KR-110	83.07.11	443505	575767	393
KR-111	83.07.12	443359	576460	434
KR-112	83.07.13	443315	578023	457
KR-113	83.07.13	444393	574657	380
KR-114	83.07.13	441767	576689	500
KR-115	83.07.14	441027	576422	491
KR-116	83.07.19	444811	577740	468
KR-117	83.07.20	444772	576687	501
KR-118	83.07.20	444626	577419	457
KR-119	83.07.20	444917	576054	476
KR-120	83.07.22	444424	578220	520
KR-121	83.07.22	444206	578944	487
KR-122	83.07.23	445659	578042	482

Tafla-3. Viðnámssniðsmælingar mældar 1983.

Heiti lífnu	Dagsetning	Fj. arma	Straumarmar (m)
<b>VS-1</b>	<b>83.7.24.-8.5.</b>	<b>3</b>	<b>250, 500, 750</b>
Punktur	X-hnit	Y-hnit	Hæð m y.s.
vs1_-1200	444242	576358	404
vs1_-900	444199	576649	402
vs1_-600	444162	576947	414
vs1_-300	444120	577260	428
vs1_0	444091	577523	454
vs1_300	444029	577836	480
vs1_600	443999	578131	462
vs1_900	443956	578419	469
vs1_1200	443925	578725	480
Heiti lífnu	Dagsetning	Fj. arma	Straumarmar (m)
<b>VS-2</b>	<b>83.8.5.-12.</b>	<b>3</b>	<b>250, 500, 750</b>
Punktur	X-hnit	Y-hnit	Hæð m y.s.
vs2_-1175	443841	576417	392
vs2_-900	443771	576694	393
vs2_-600	443728	576989	407
vs2_-300	443664	577262	437
vs2_0	443605	577562	442
vs2_300	443554	577856	455
vs2_475	443523	578029	457
vs2_900	443443	578429	457
vs2_1200	443387	578727	465
Heiti lífnu	Dagsetning	Fj. arma	Straumarmar (m)
<b>VS-3</b>	<b>83.7.16.-26.</b>	<b>3</b>	<b>250, 500, 750</b>
Punktur	X-hnit	Y-hnit	Hæð m y.s.
vs3_-1200	444758	577922	514
vs3_-900	444502	577824	518
vs3_-600	444265	577717	499
vs3_-250	443959	577562	469
vs3_0	443719	577467	444
vs3_300	443438	577360	438
vs3_600	443145	577245	459
vs3_900	442891	577121	468
vs3_1200	442602	577023	471

Tafla-4. Viðnámssniðsmælingar mældar 1984.

Heiti línu	Dagsetning	Fj. arma	Straumarmar (m)
<b>VS-4</b>	84.7.24.-8.5.	3	250, 500, 750
Punktur	X-hnit	Y-hnit	Hæð m y.s.
vs4_1075	444546	578451	518
vs4_600	444161	578158	498
vs4_300	443913	577996	472
vs4_0	443668	577819	452
vs4_-400	443341	577588	436
vs4_-700	443103	577416	441
vs4_-1000	442860	577238	449
vs4_-1250	442655	577087	464
Heiti línu	Dagsetning	Fj. arma	Straumarmar (m)
<b>VS-5</b>	84.7.24.-8.5.	2	500, 750
Punktur	X-hnit	Y-hnit	Hæð m y.s.
vs5_900	444571	578285	518
vs5_600	444254	578296	524
vs5_300	443960	578294	459
vs5_0	443679	578308	454
vs5_-300	443376	578315	458
vs5_-900	442778	578347	563
vs5_-1500	442194	578303	614

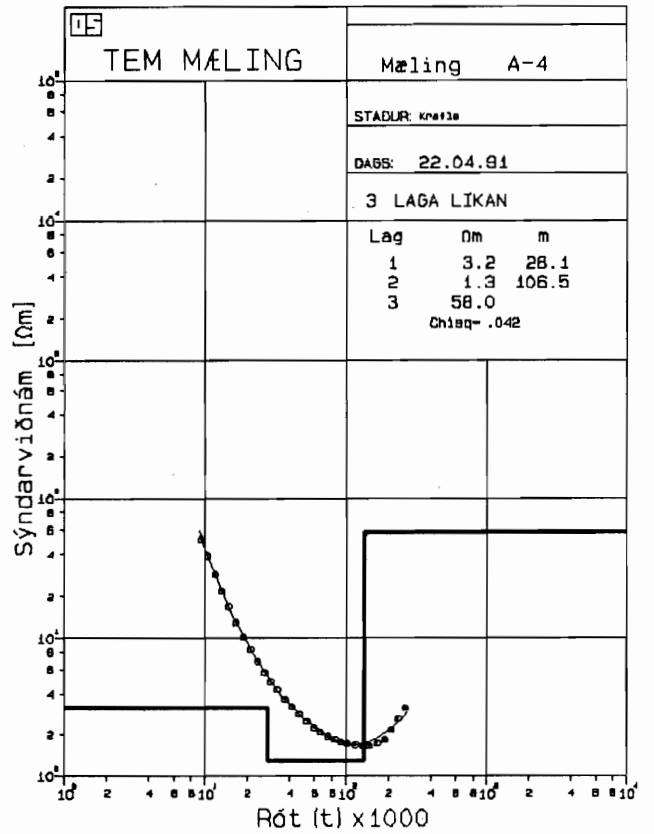
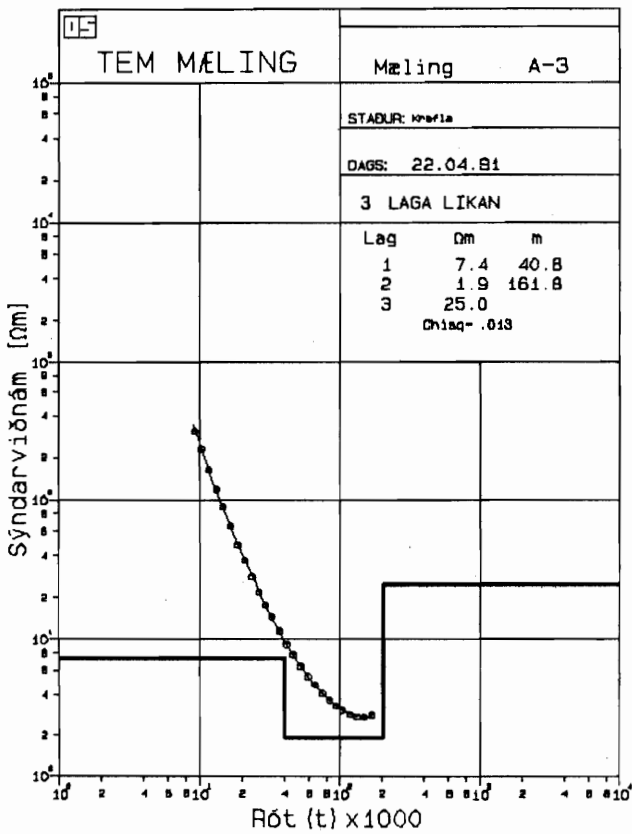
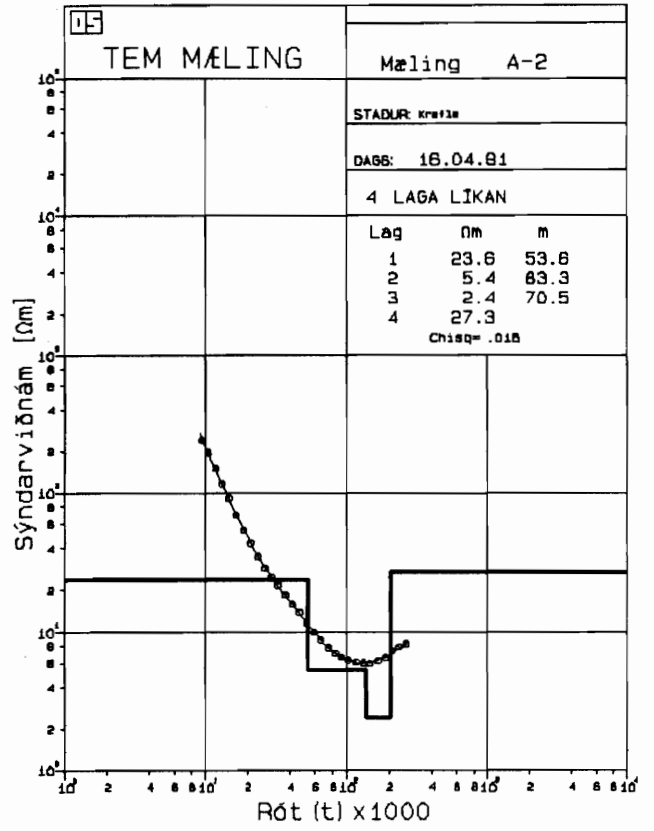
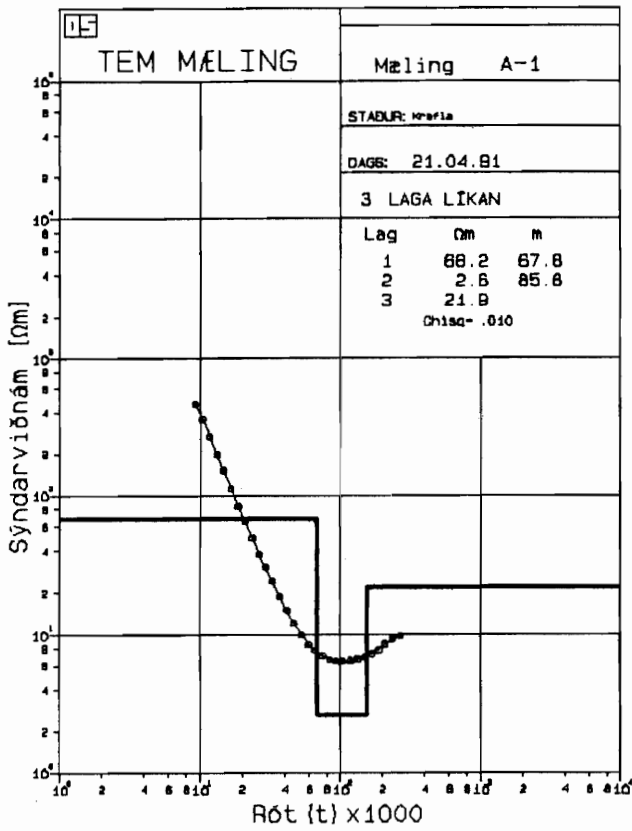
Tafla-5. TEM-mælingar mældar 1991.

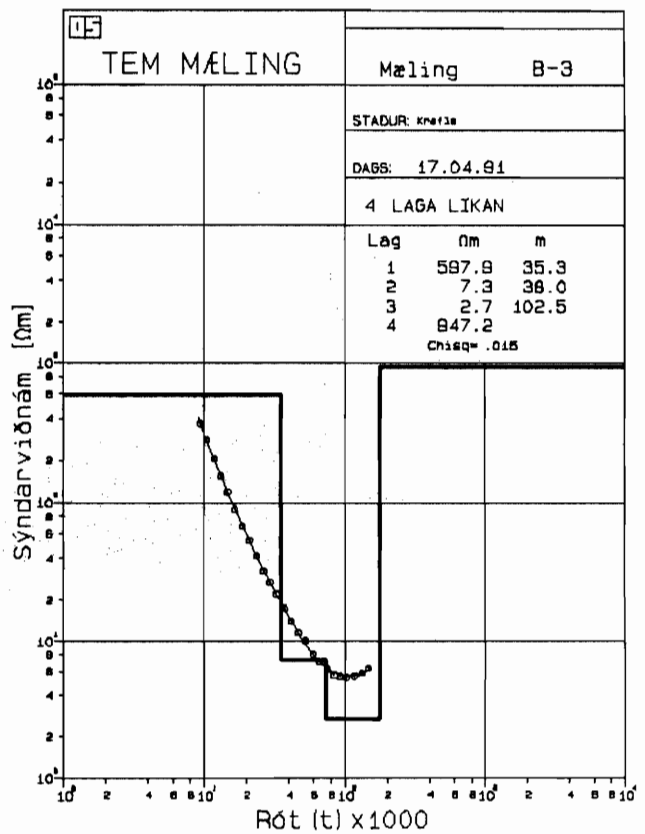
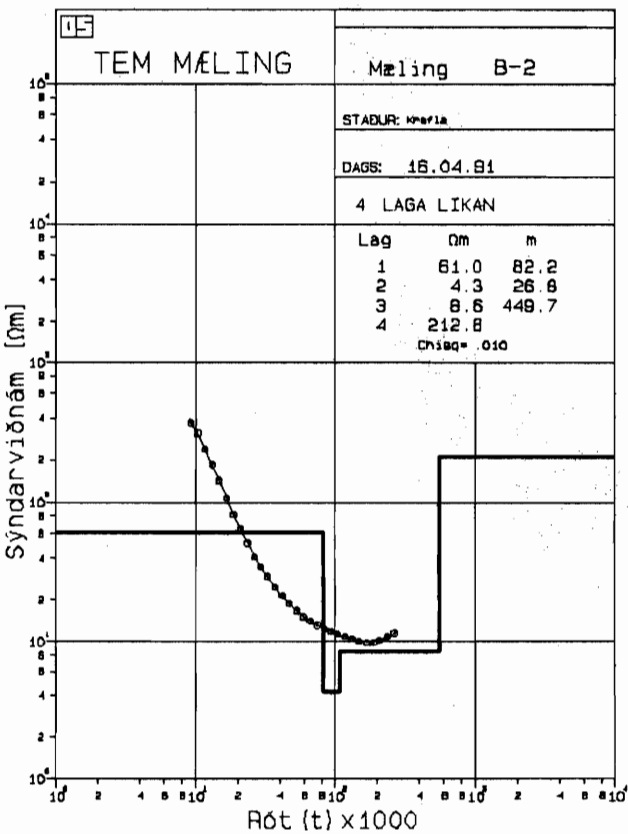
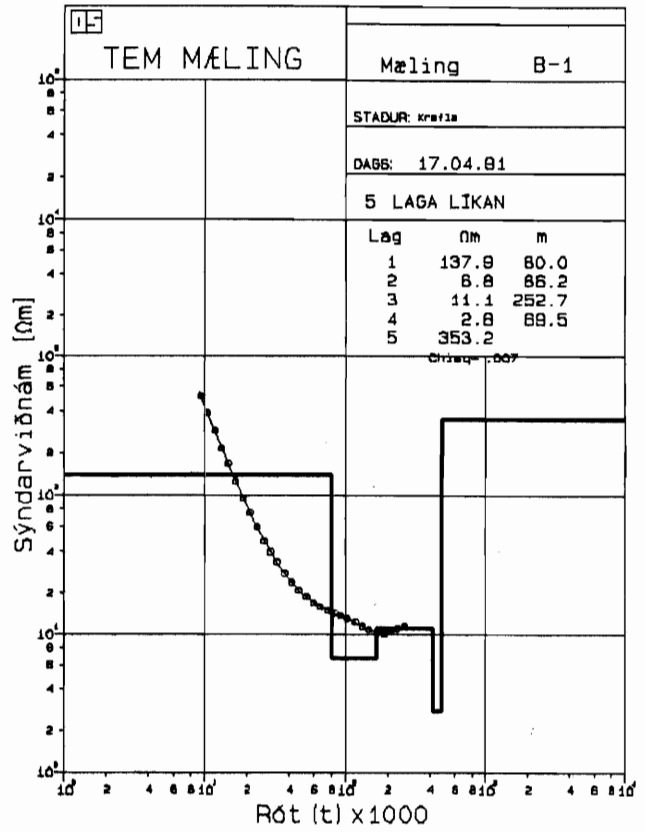
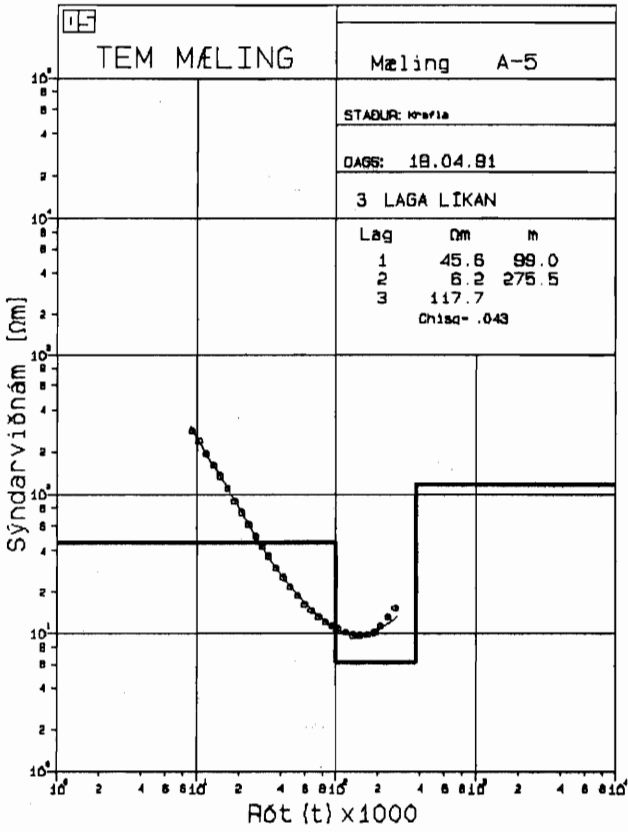
Heiti mæl.	Dagsetn.	X-hnit	Y-hnit	Hæð (m y.s.)
A1	91.04.20	444185	580580	545
A2	91.04.16	443680	580345	532
A3	91.04.22	442395	580630	600
A4	91.04.22	442320	579525	658
A5	91.04.19	441510	579065	620
B1	91.04.16	444100	581605	550
B2	91.04.16	443205	581300	544
B3	91.04.17	442615	581155	575
B4	91.04.18	441740	581055	655
B5	91.04.19	440980	580205	620
C1	91.04.20	443605	582254	549
C2	91.04.16	442980	581960	545
C3	91.04.22	442330	581689	580
C5	91.04.18	440720	580850	620
D1	91.04.21	443499	583110	560
D2	91.04.17	442775	582791	568
D3	91.04.21	441801	582140	647
D4	91.04.18	441165	581900	618
D5	91.04.18	440475	581585	614
E3	91.04.23	443255	580170	550
E5	91.04.19	441937	578260	595
F5	91.04.23	442095	577495	590

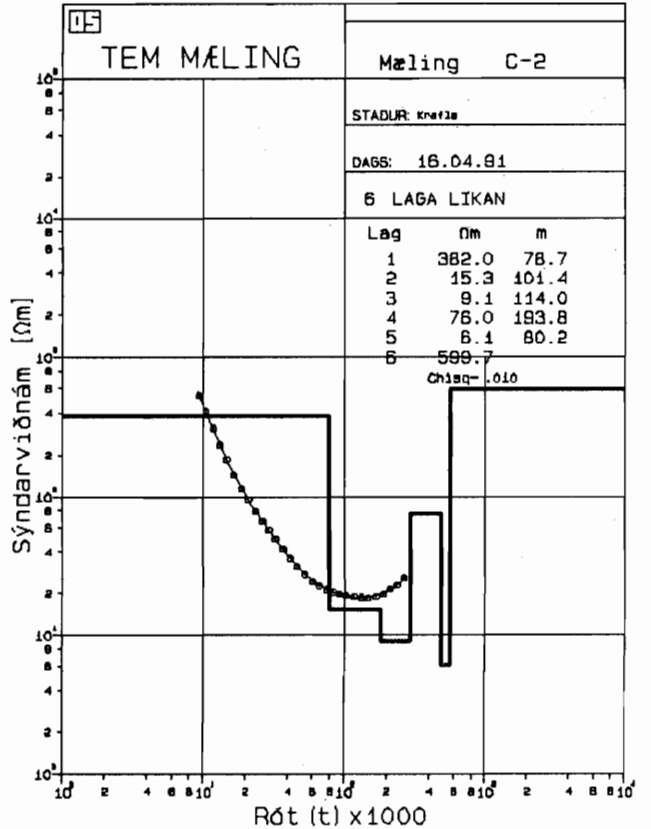
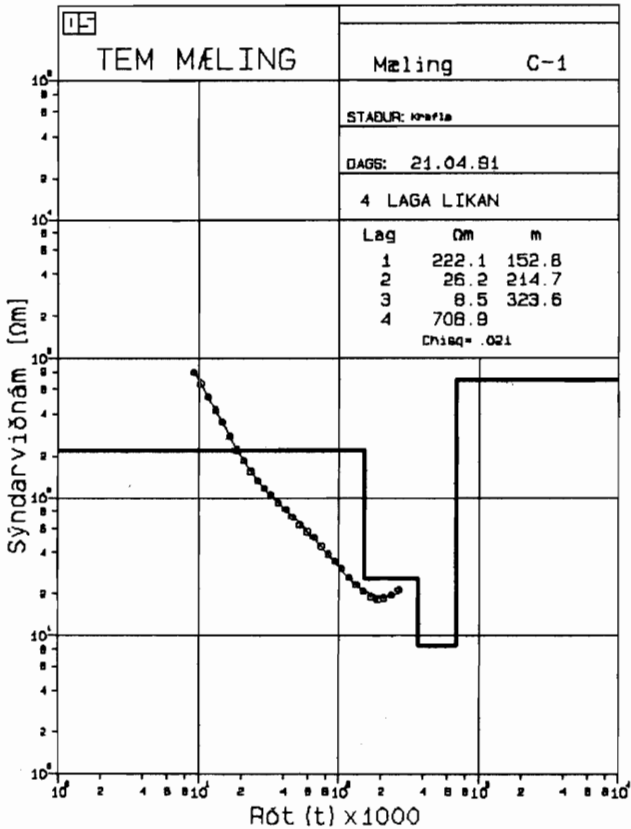
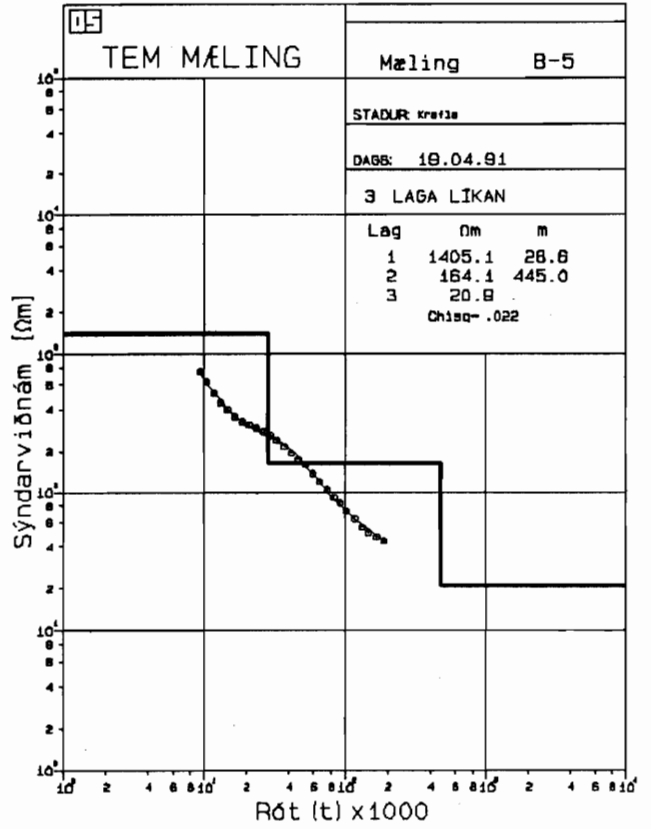
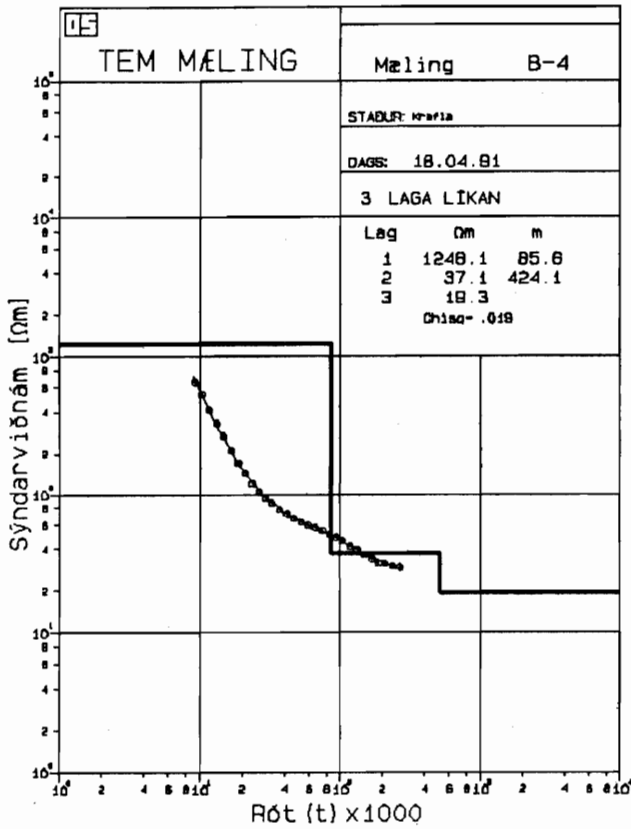


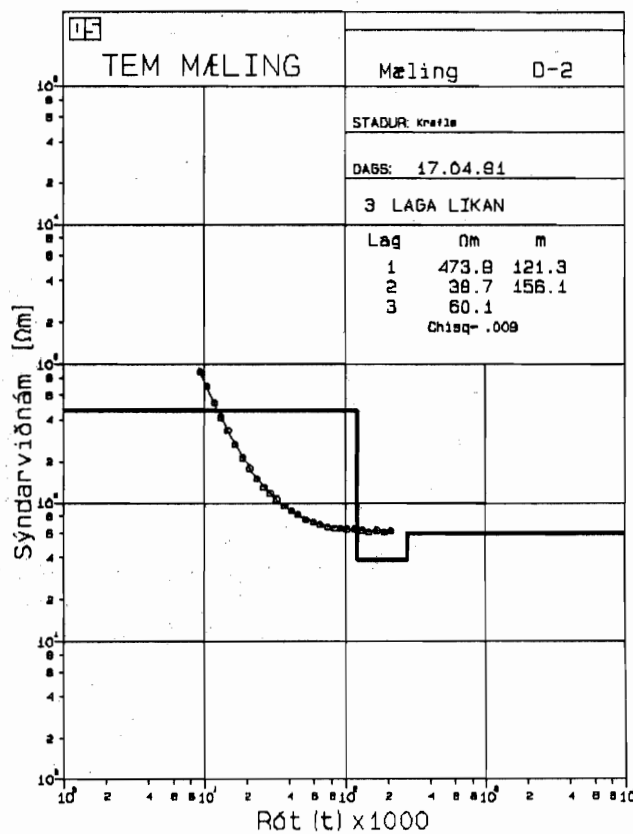
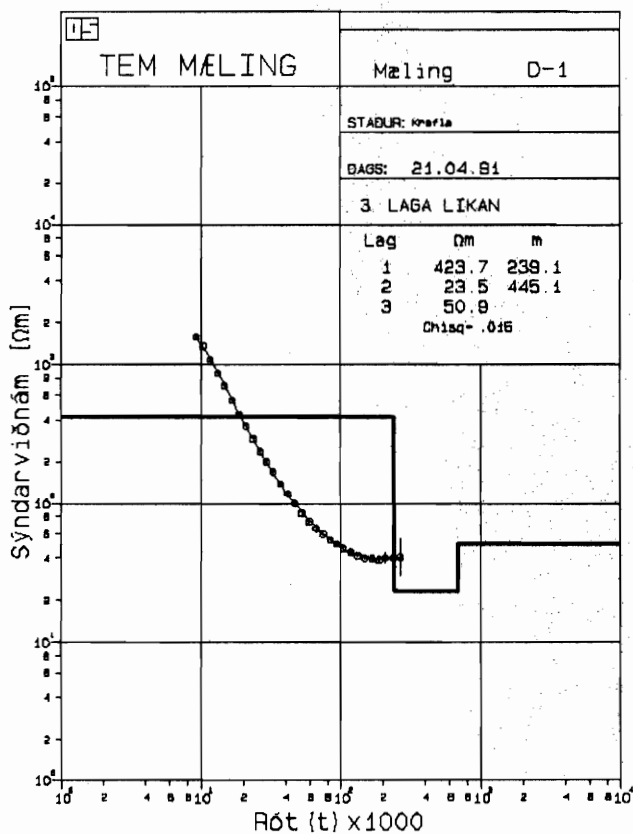
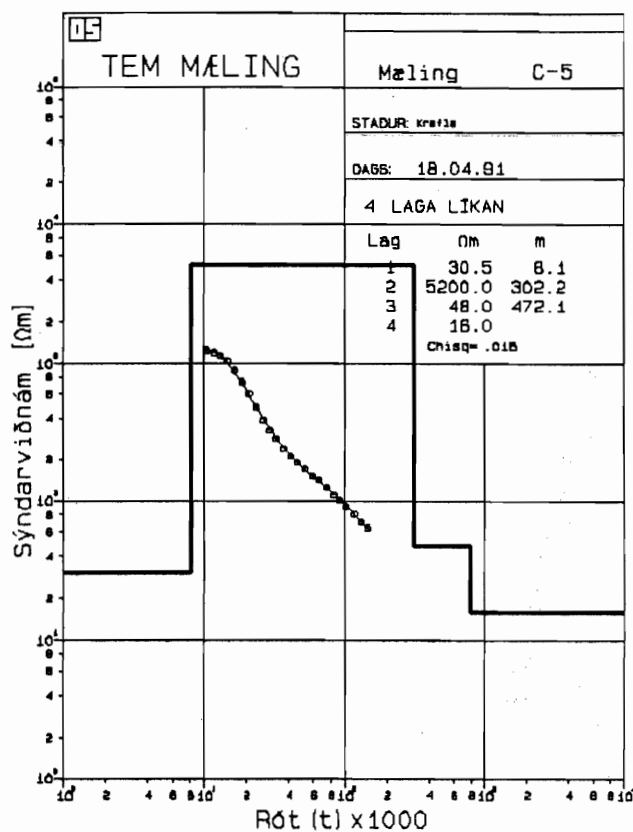
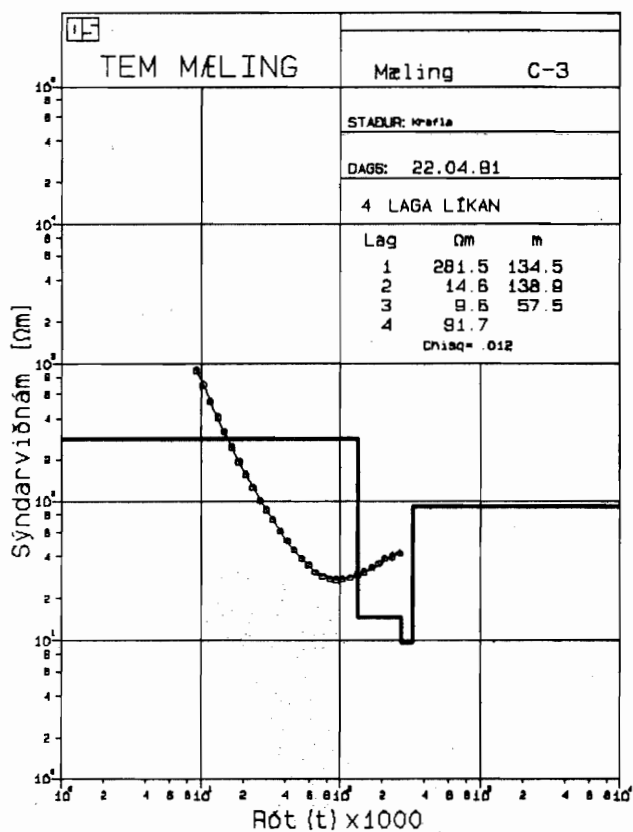
Tafla-6. TEM-mælingar mældar 1993.

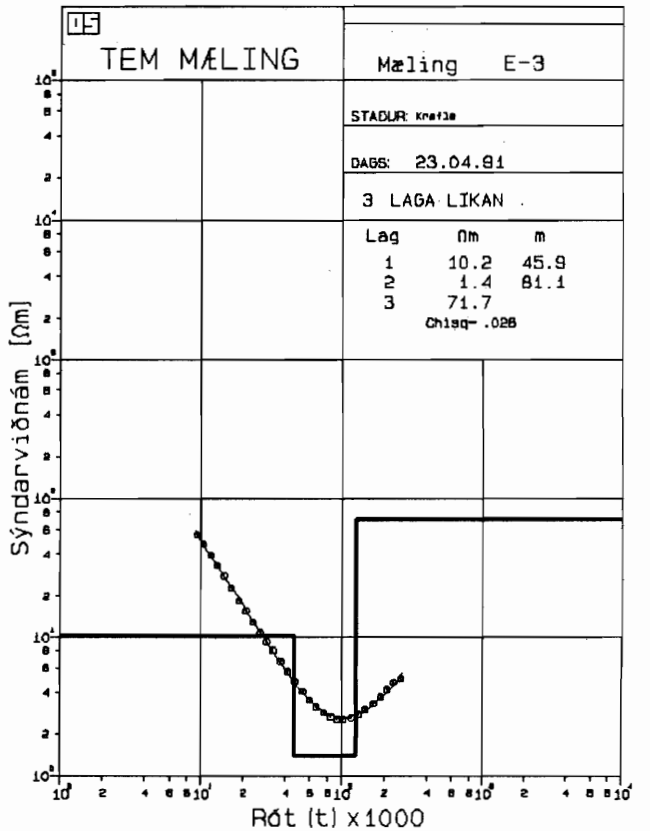
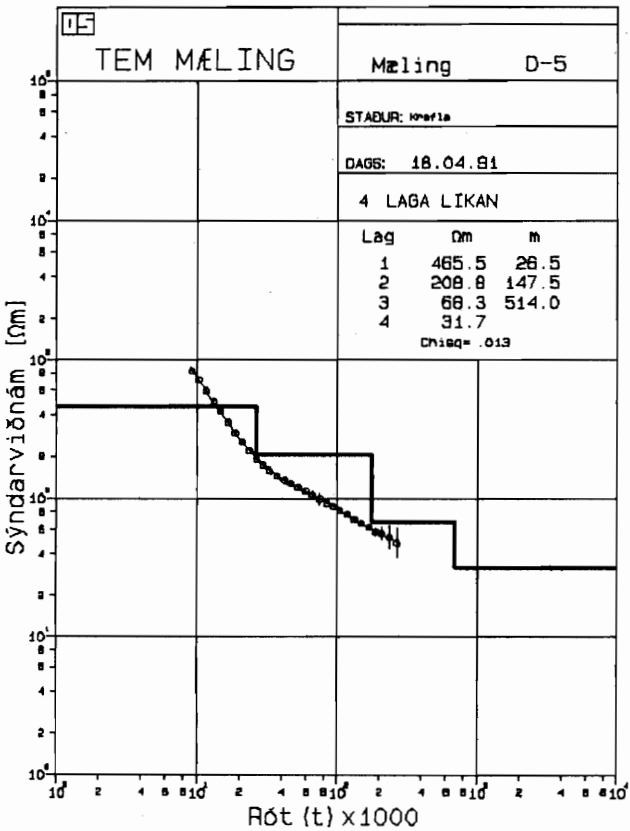
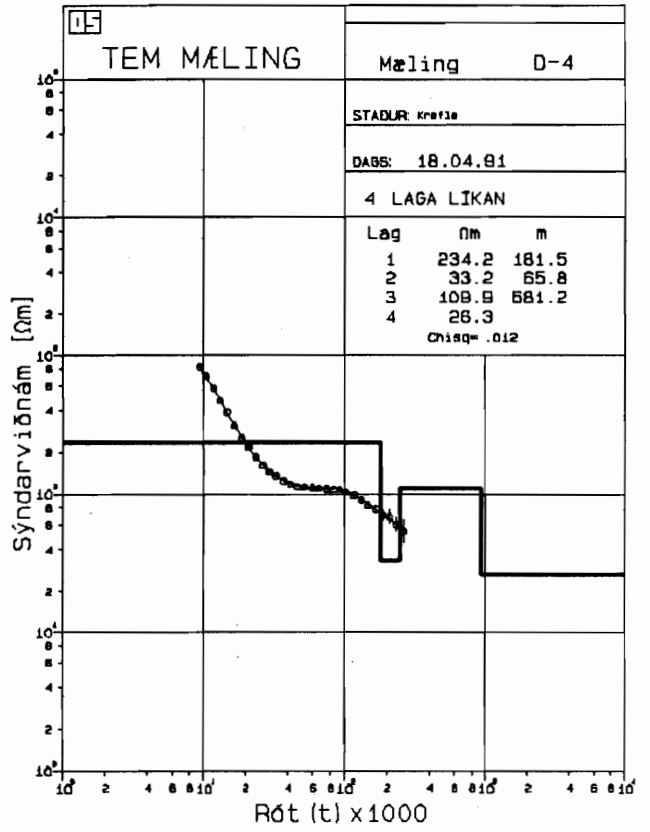
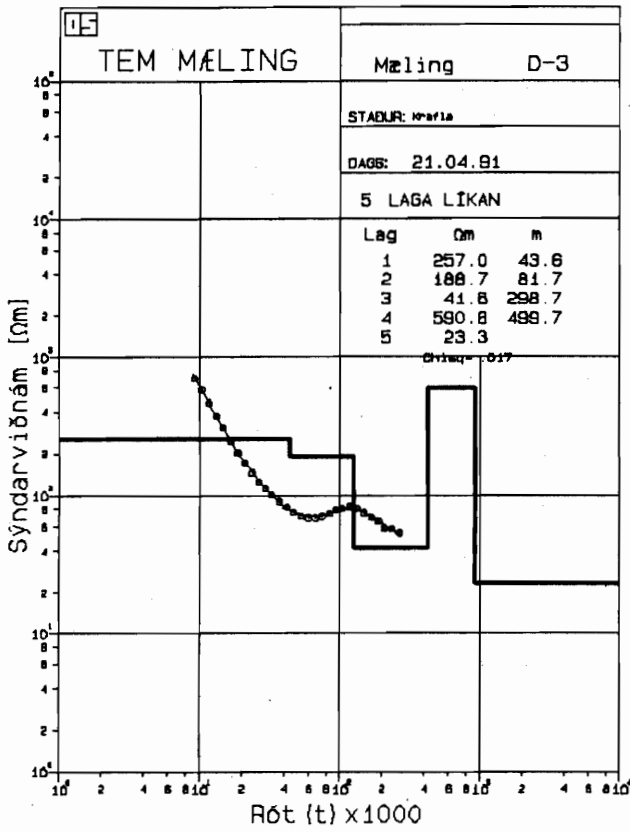
Heiti mæl.	Dagsetn.	X-hnit	Y-hnit	Hæð (m y.s.)
K9301	93.04.14	441438	576448	495
K9302	93.04.14	440605	576369	495
K9303	93.04.14	439876	576313	500
K9304	93.04.14	442124	576816	480
K9305	93.04.14	442777	577065	465
K9306	93.04.15	444112	579877	535
K9307	93.04.15	444791	580044	540
K9308	93.04.15	445168	579233	525
K9309	93.04.15	445183	578373	485
K9310	93.04.15	445648	577632	475
K9311	93.04.16	440805	579402	615
K9312	93.04.16	440690	578457	525
K9313	93.04.16	440180	577860	510
K9314	93.04.16	440063	577084	505
K9315	93.04.18	440096	575661	495
K9316	93.04.18	440774	575588	495
K9317	93.04.18	441639	575668	520
K9318	93.04.18	442346	575804	495
K9319	93.04.19	442969	576065	490
K9320	93.04.19	441824	576620	500
K9321	93.04.19	439521	578312	540
K9322	93.04.20	439981	579342	575
K9323	93.04.20	441083	577898	600
K9324	93.04.20	441298	577347	635
K9325	93.04.20	440098	580338	615
K9326	93.04.21	442679	577741	560
K9327	93.04.21	442729	578270	560

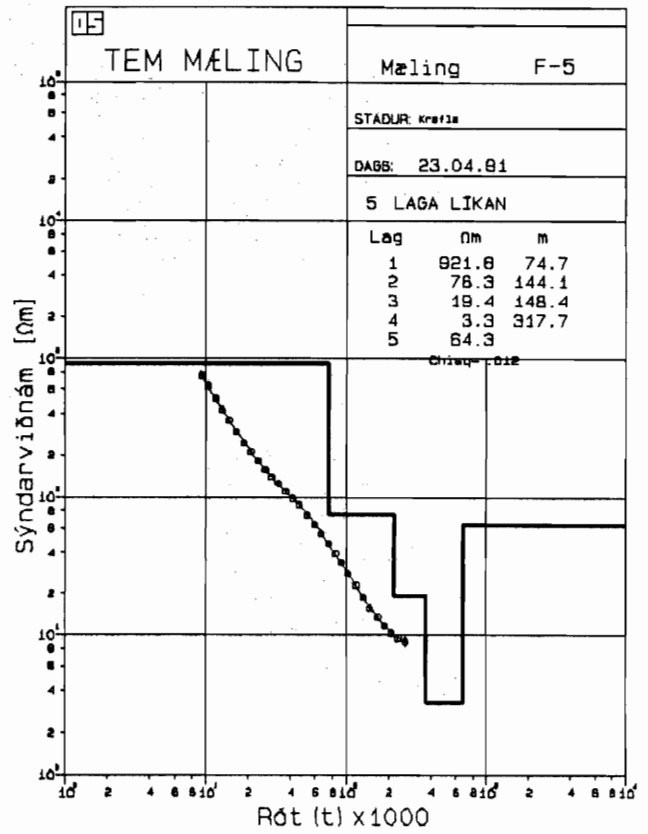
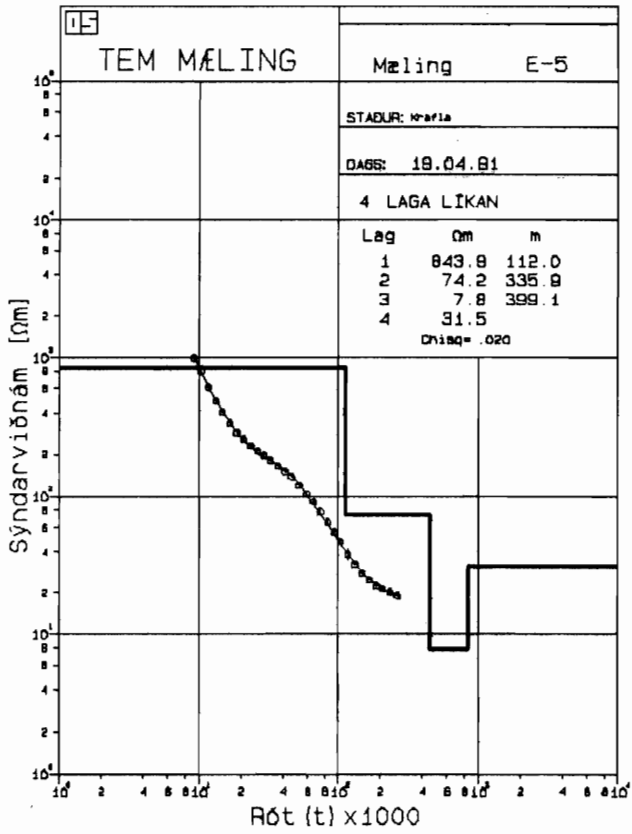




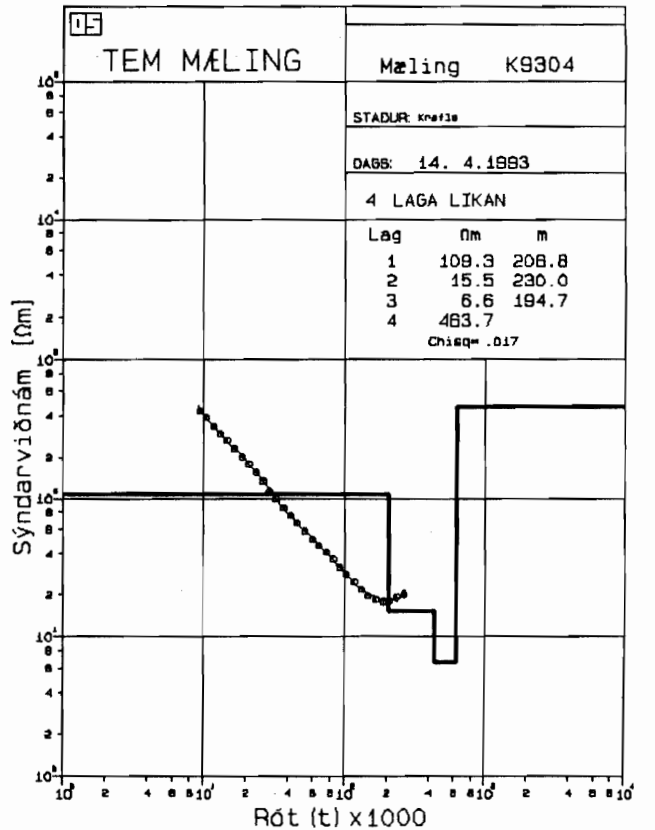
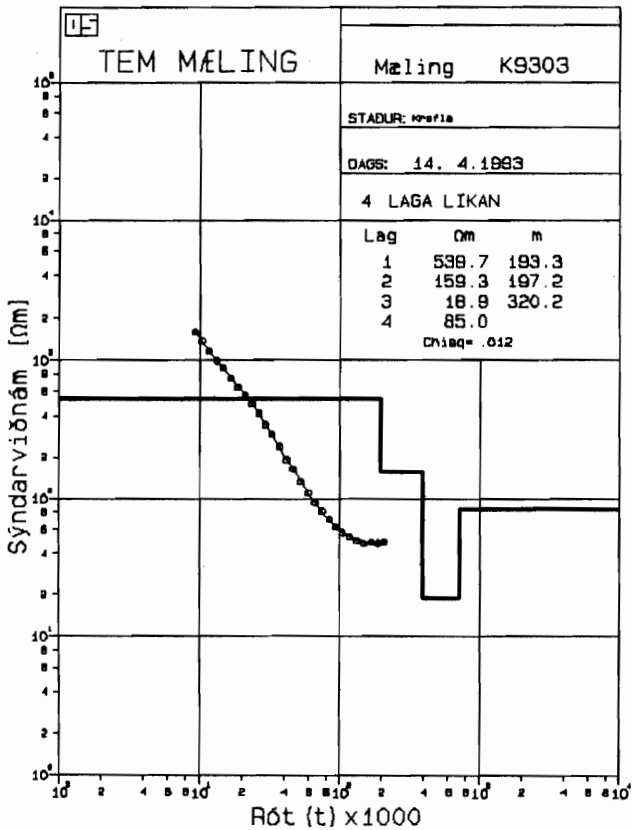
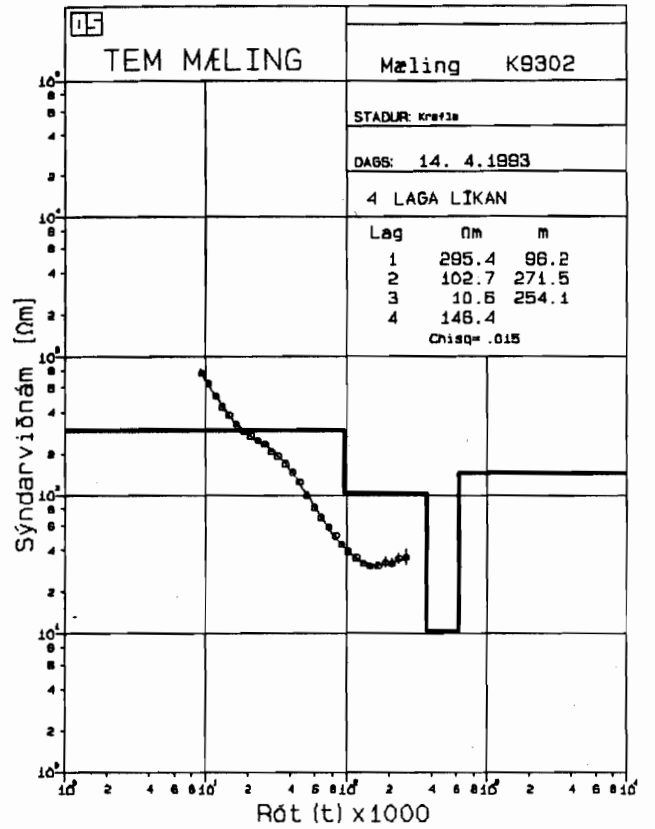
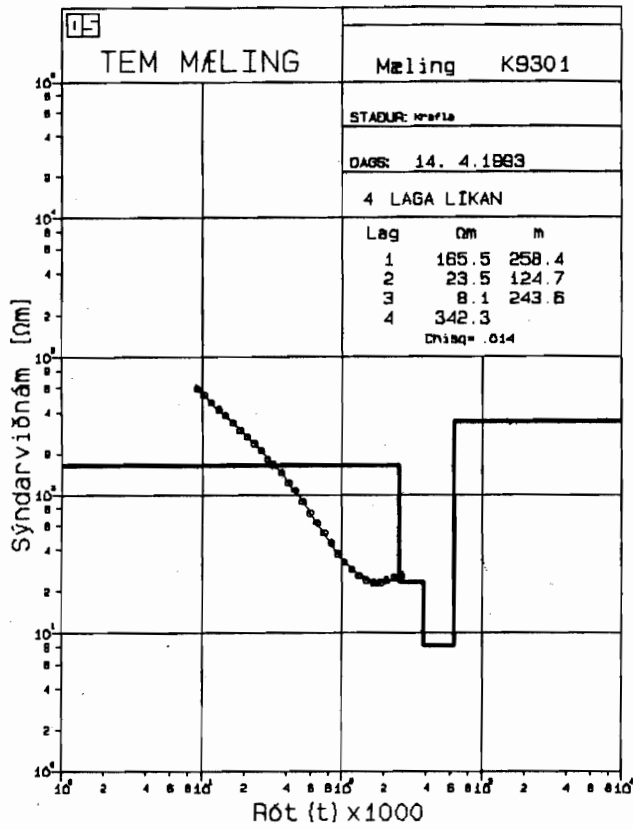


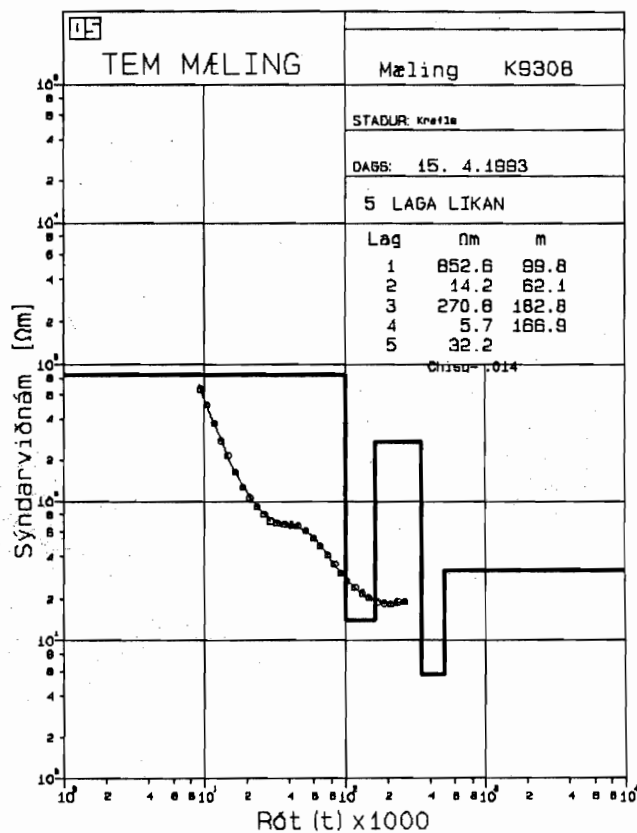
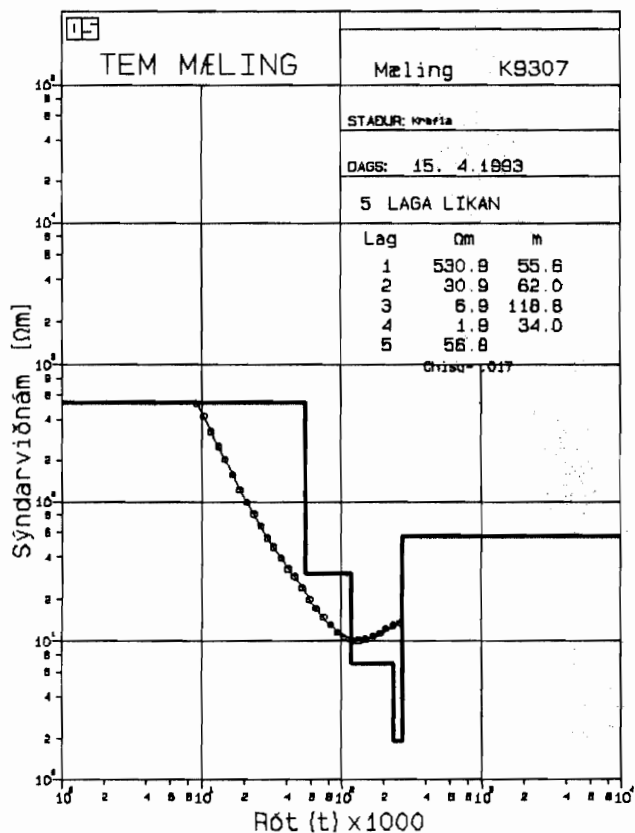
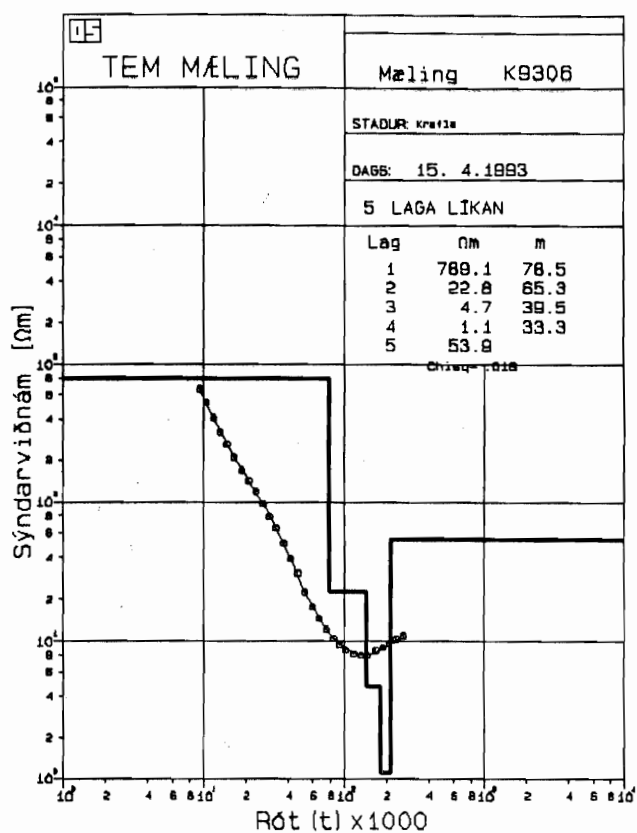
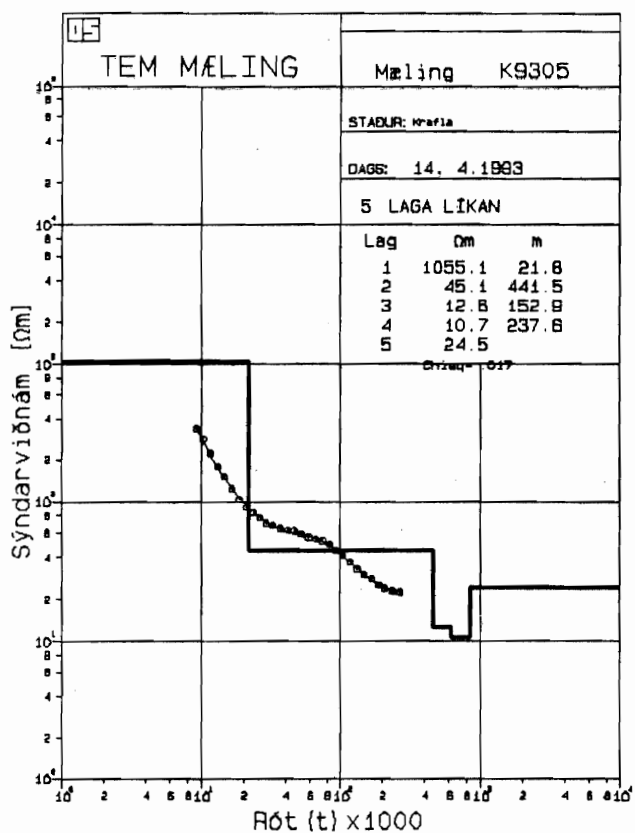


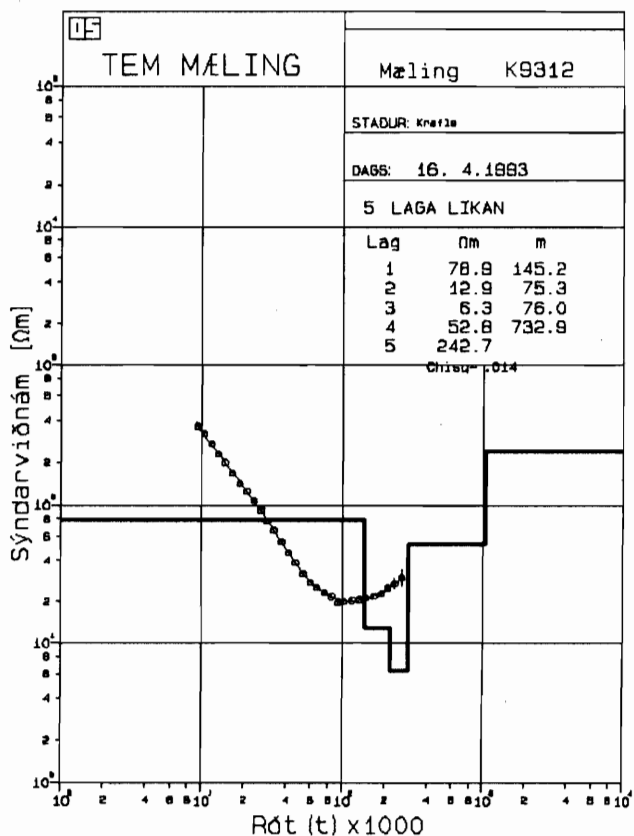
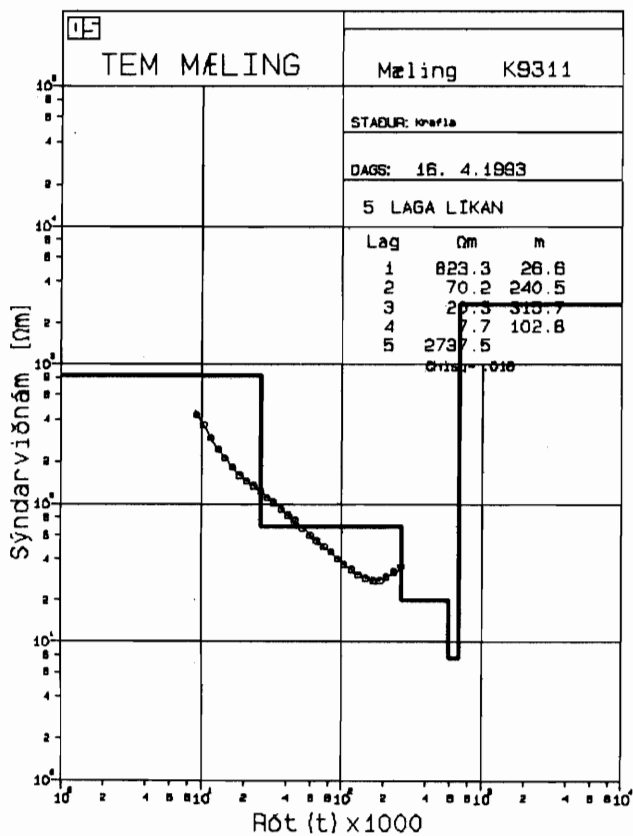
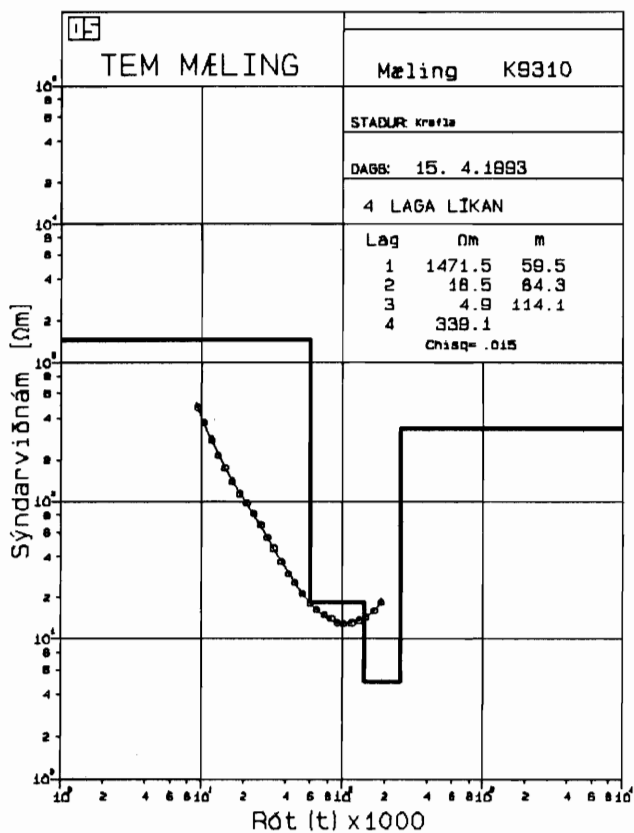
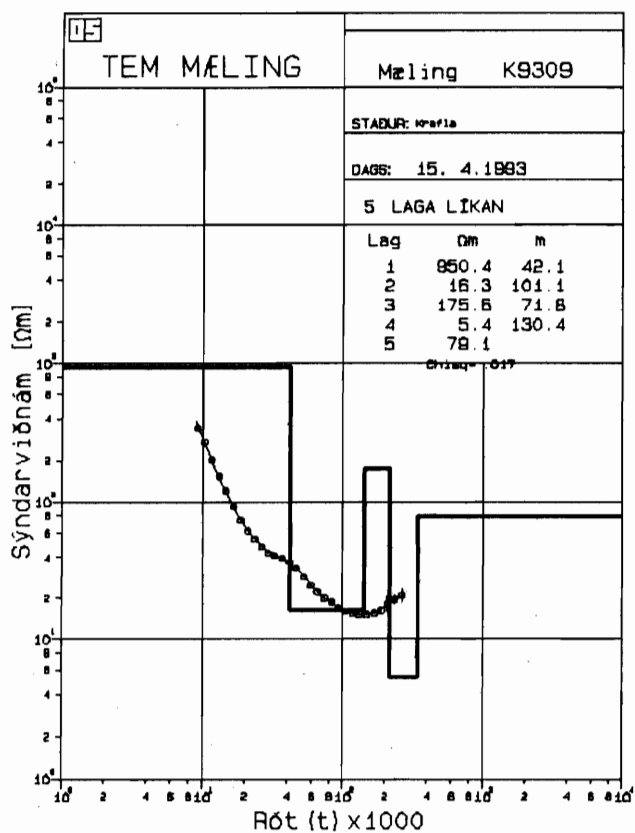


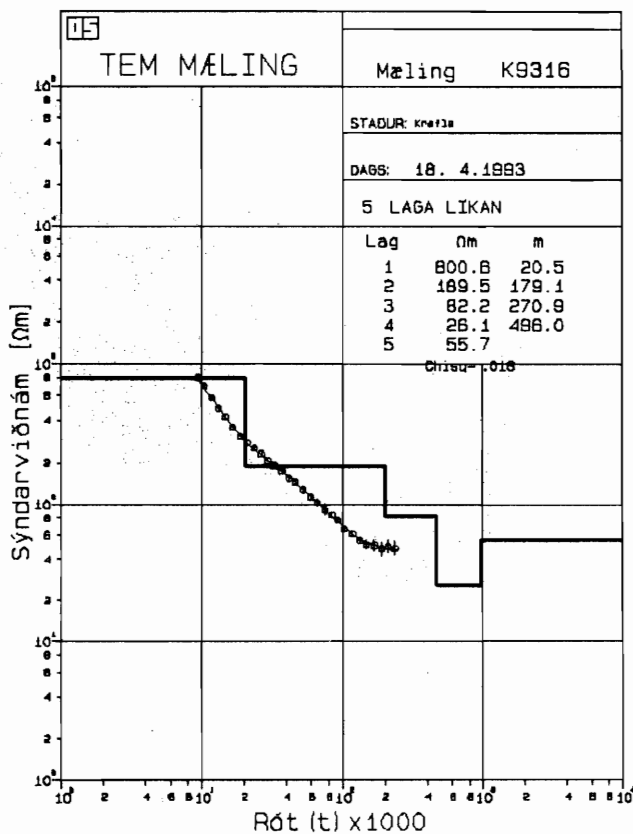
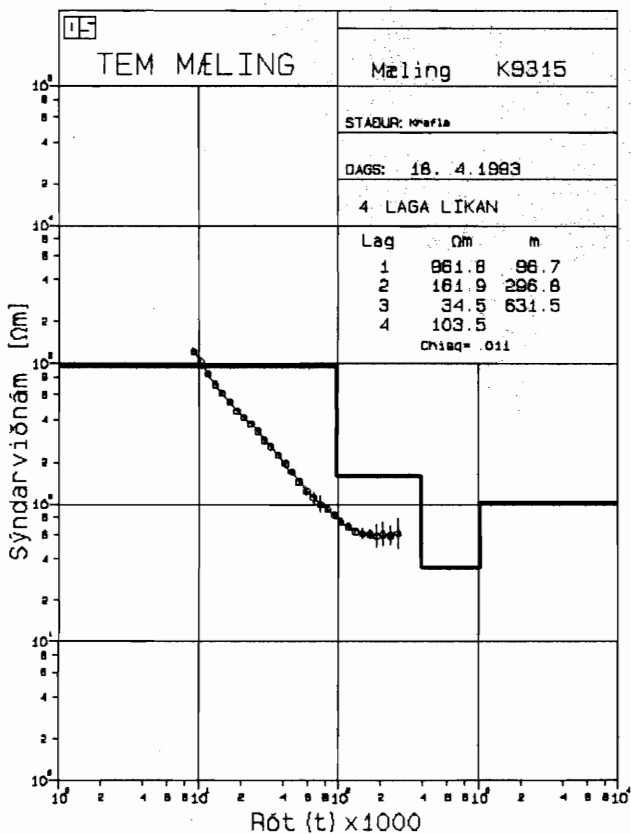
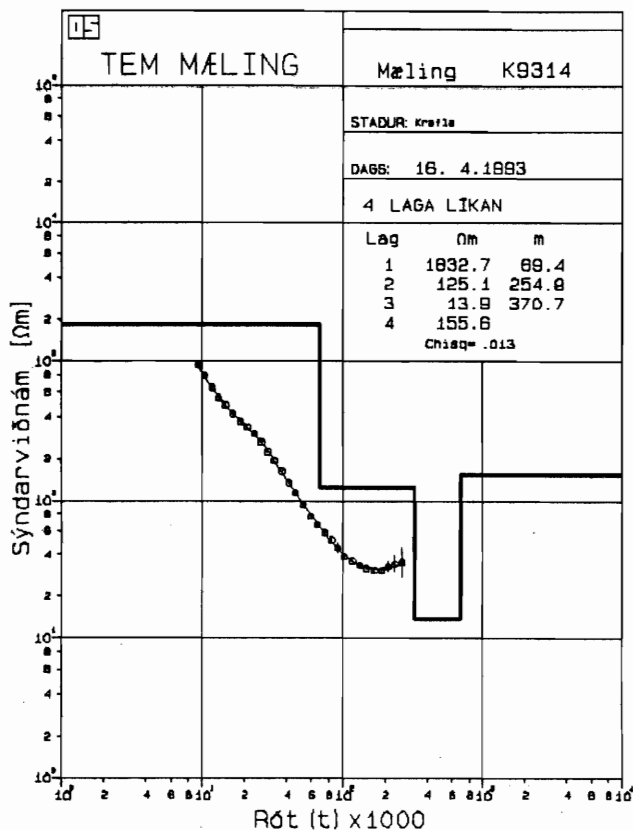
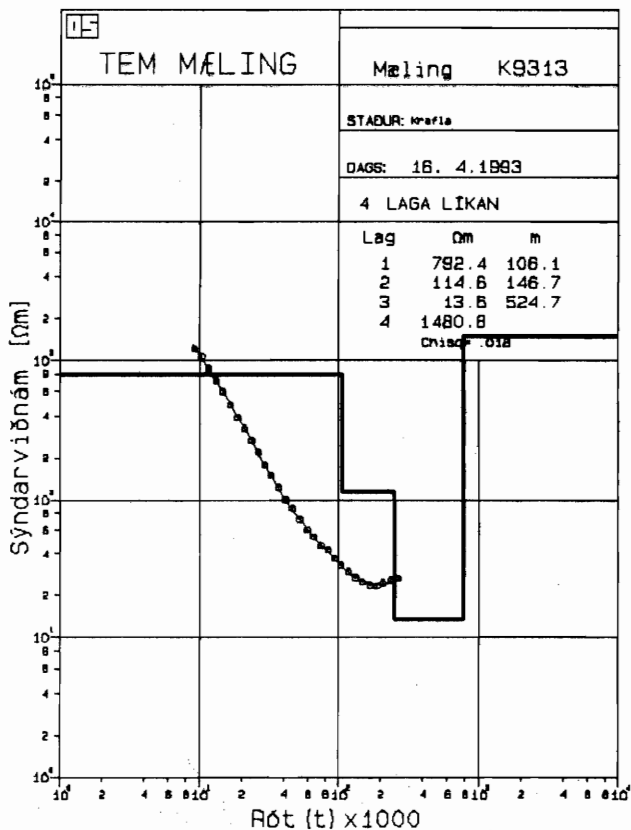


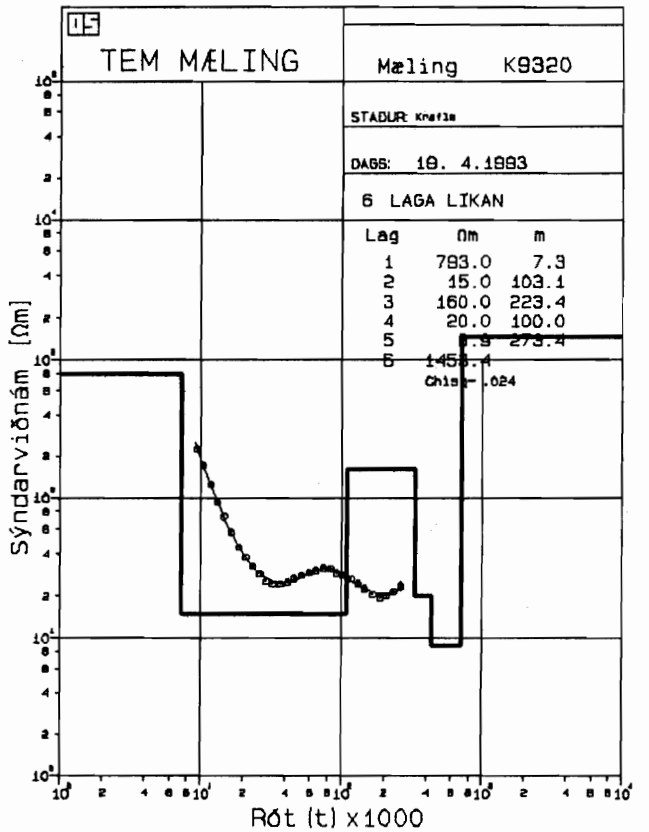
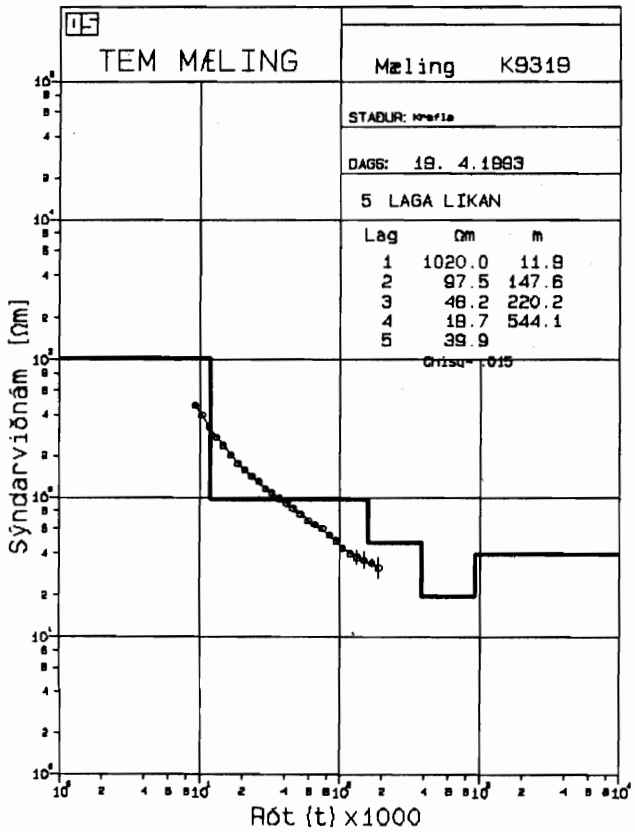
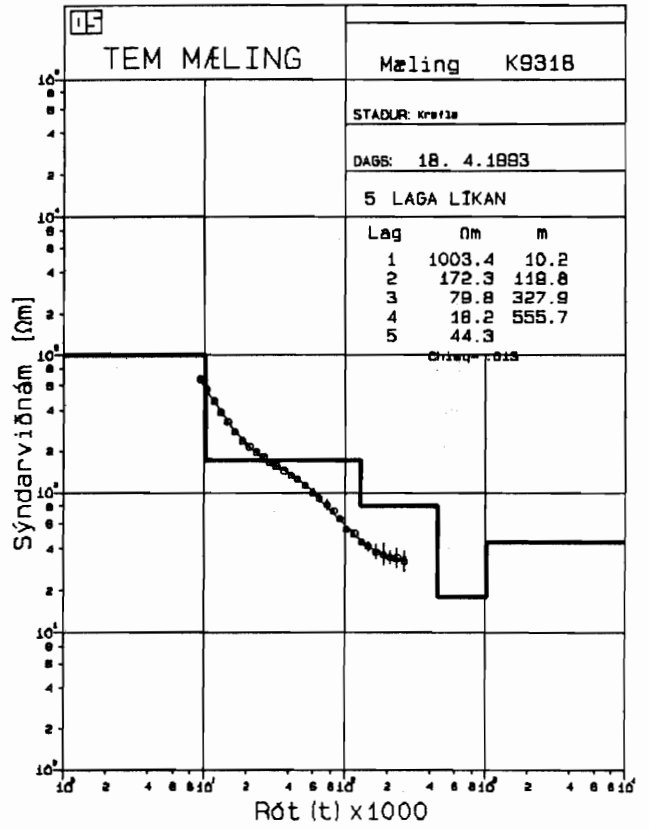
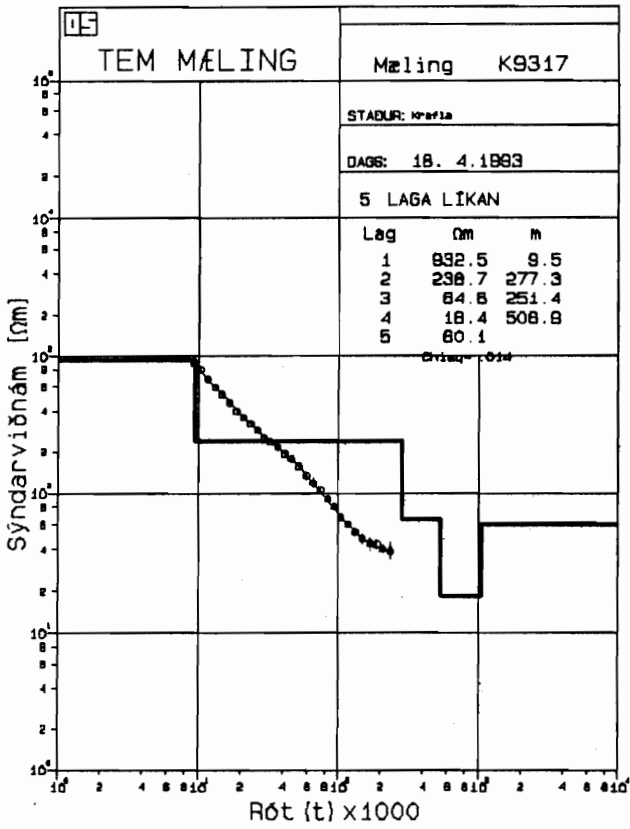


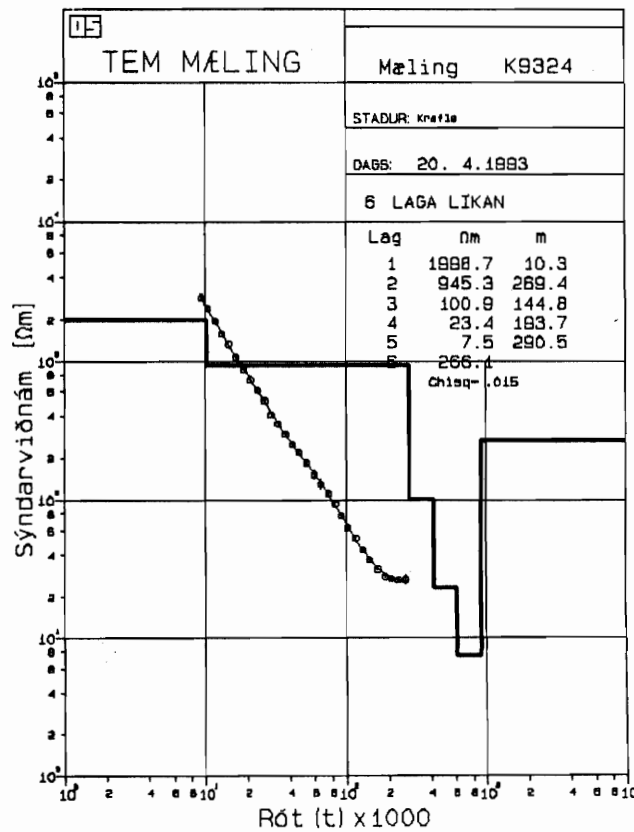
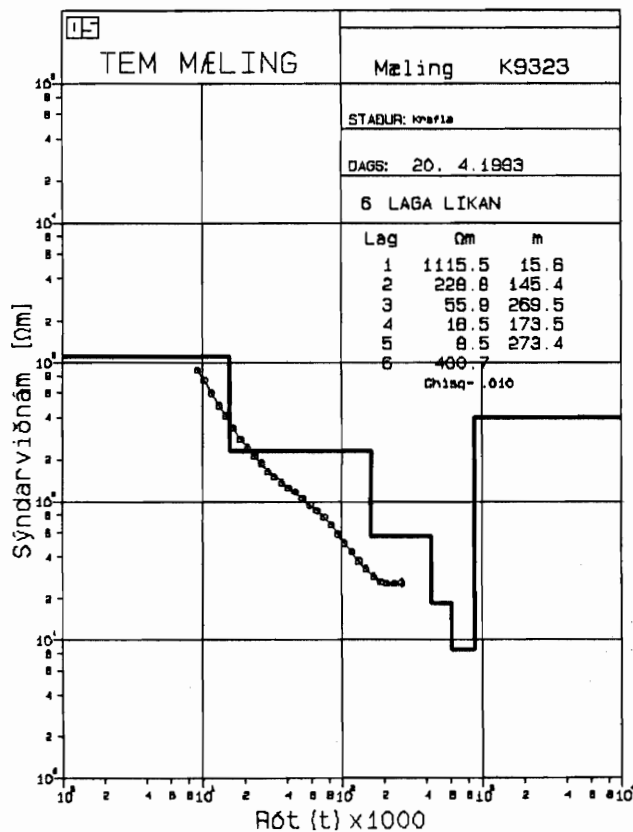
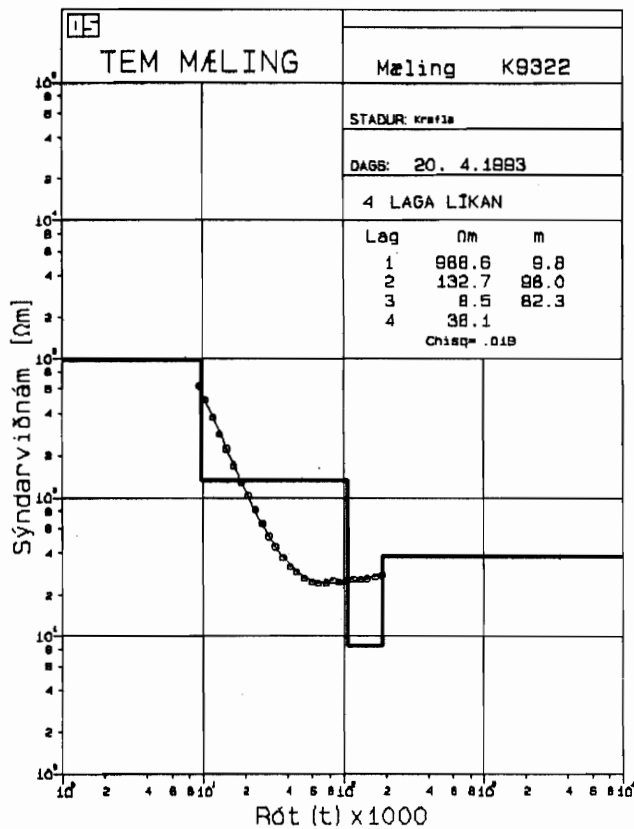
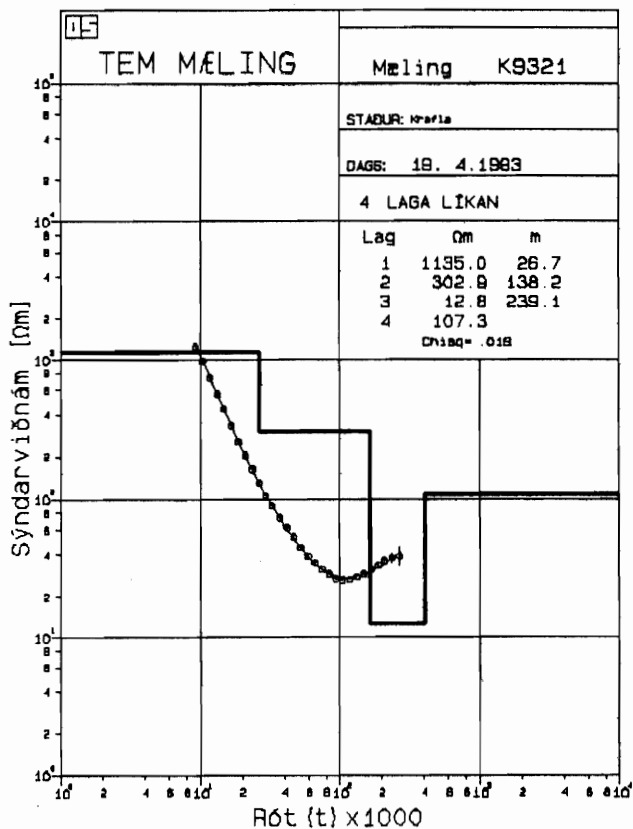


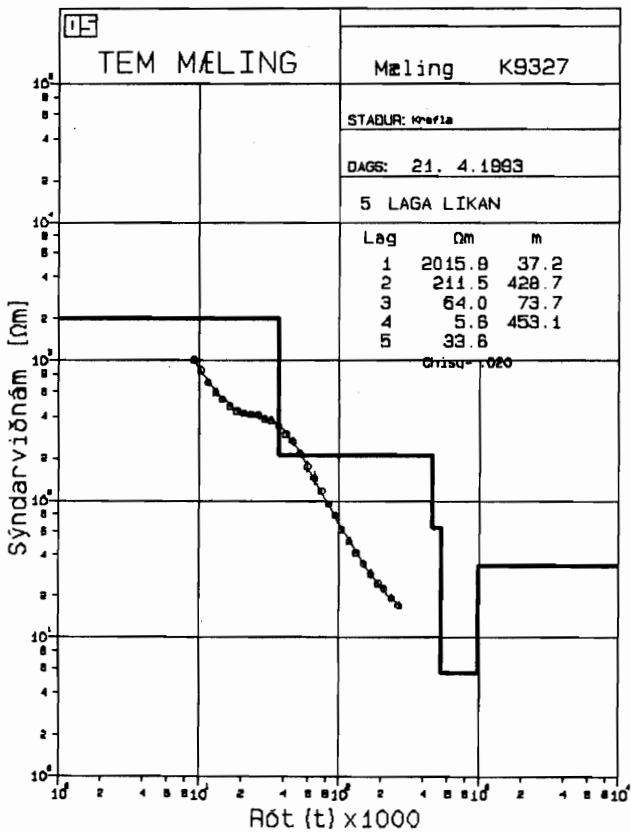
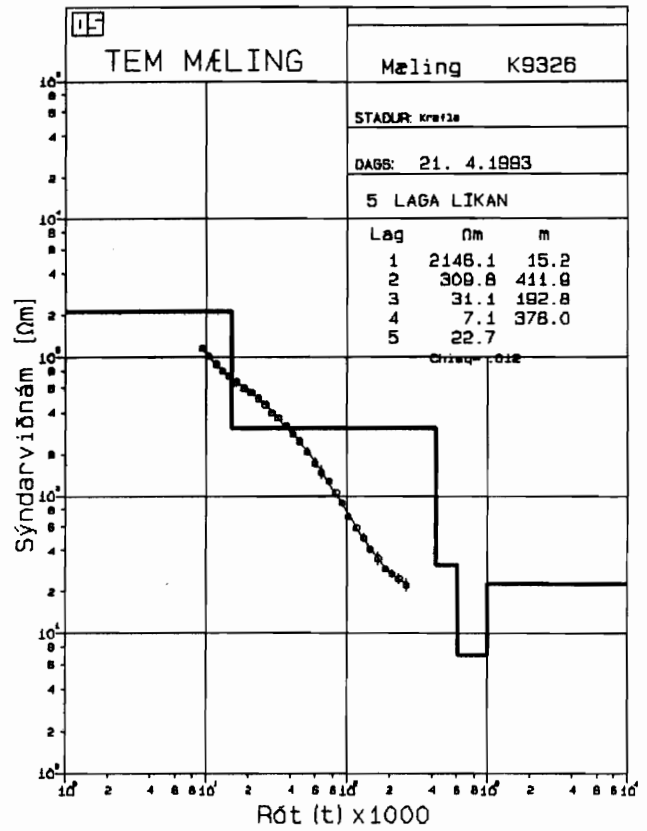
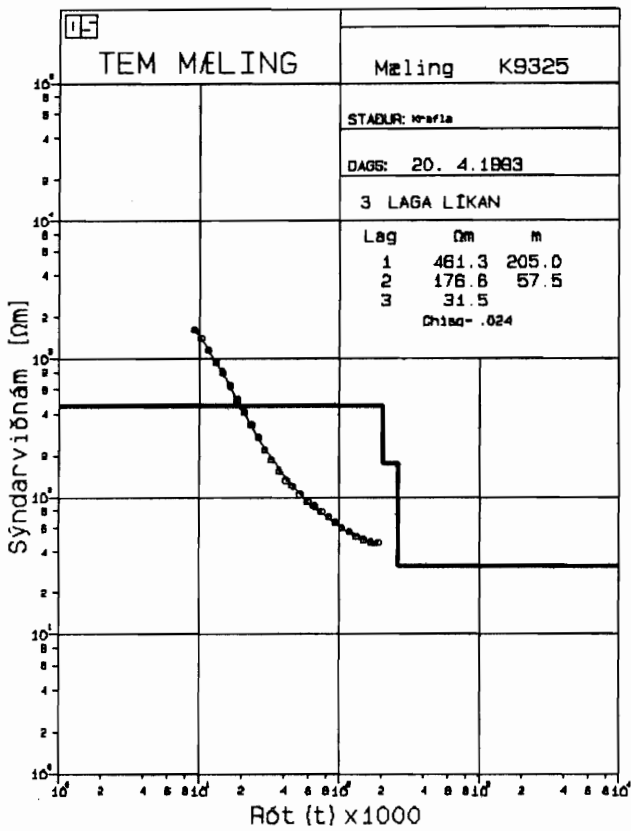








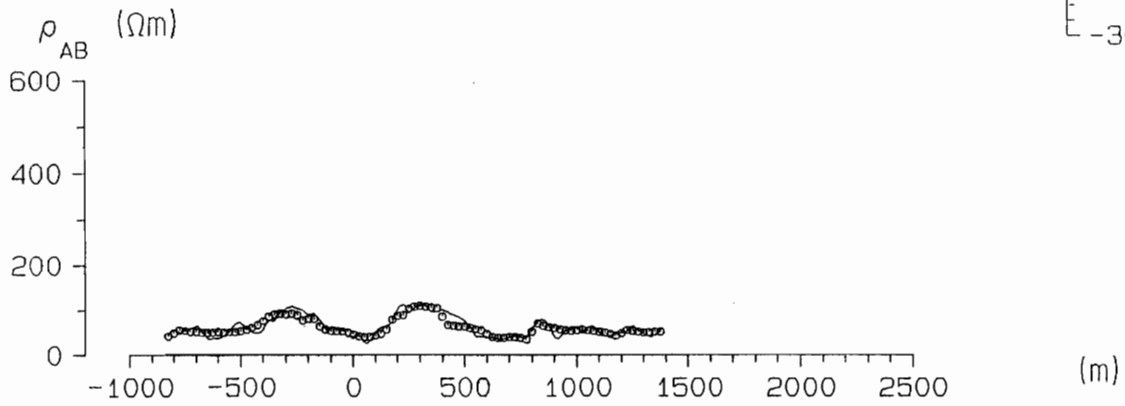
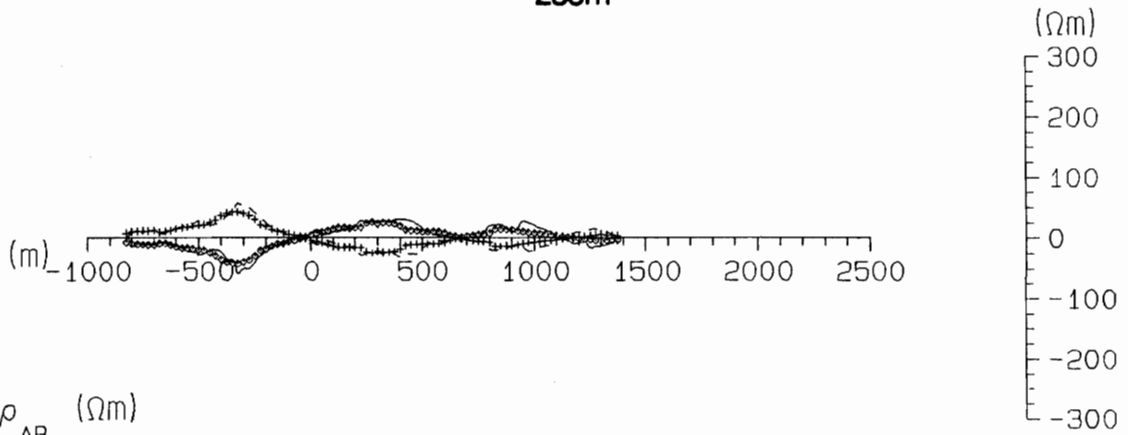






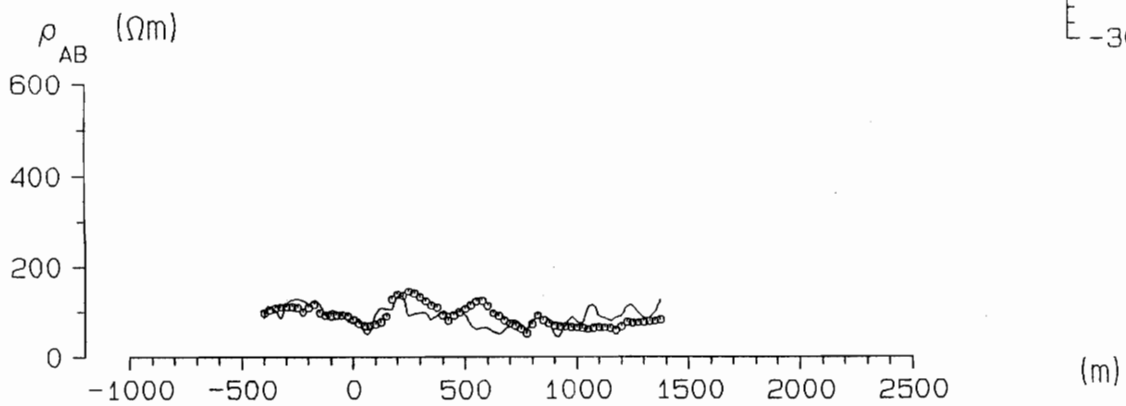
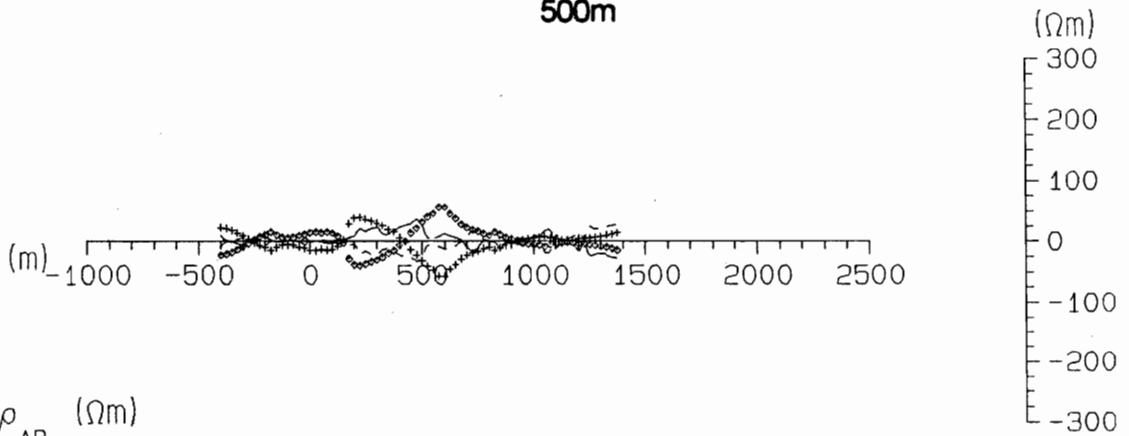
**KRAFLA**  
**Lína 4**  
**250m**

◇ —  $\rho_{AC}$  —  $-\rho_{AB}$   
+ ---  $\rho_{BC}$  —  $-\rho_{AB}$



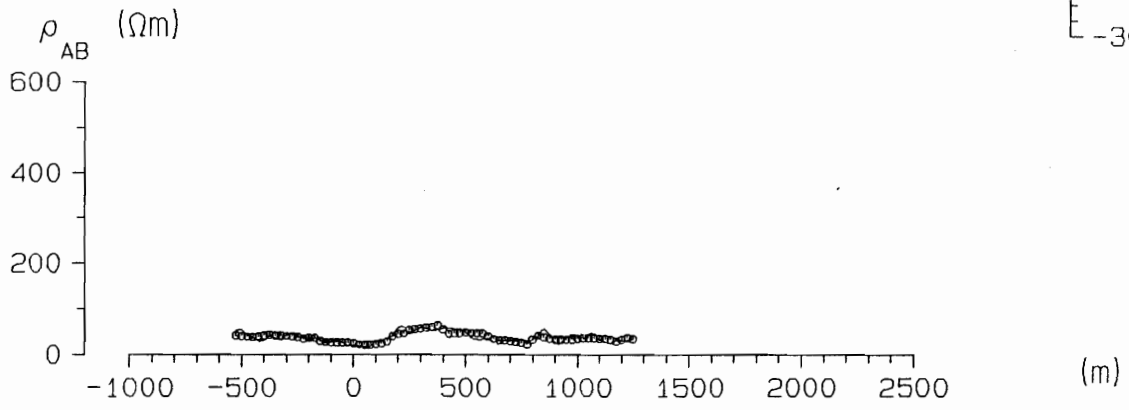
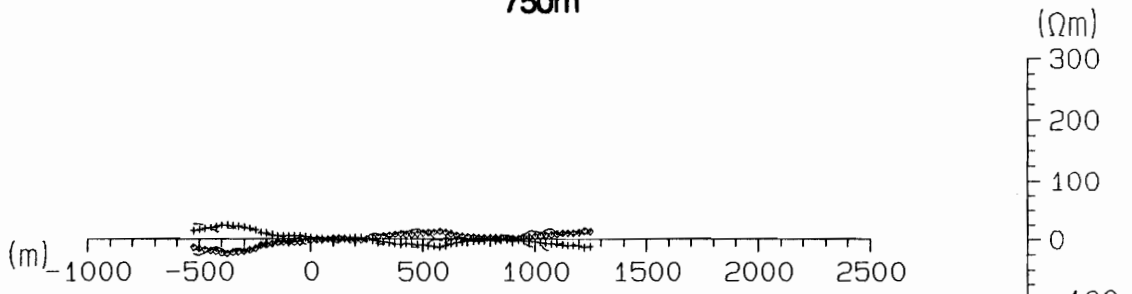
**KRAFLA**  
**Lína 4**  
**500m**

◇ —  $\rho_{AC}$  —  $-\rho_{AB}$   
+ ---  $\rho_{BC}$  —  $-\rho_{AB}$



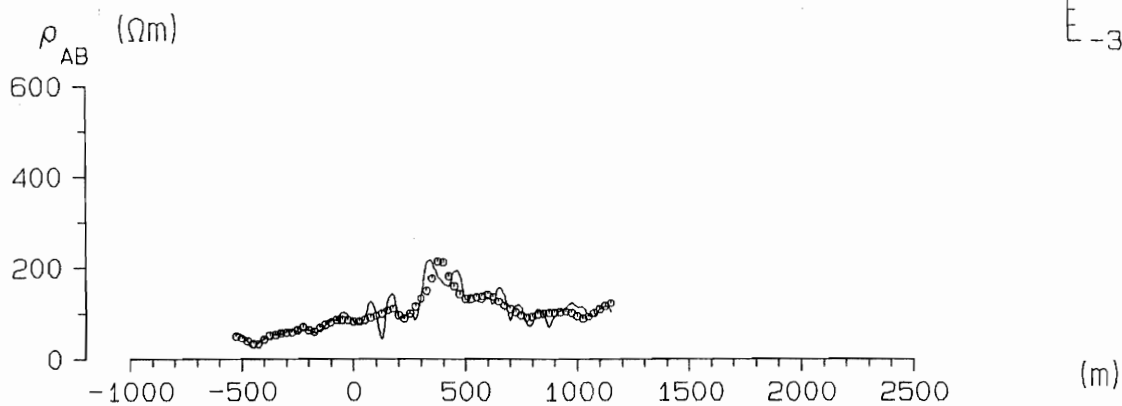
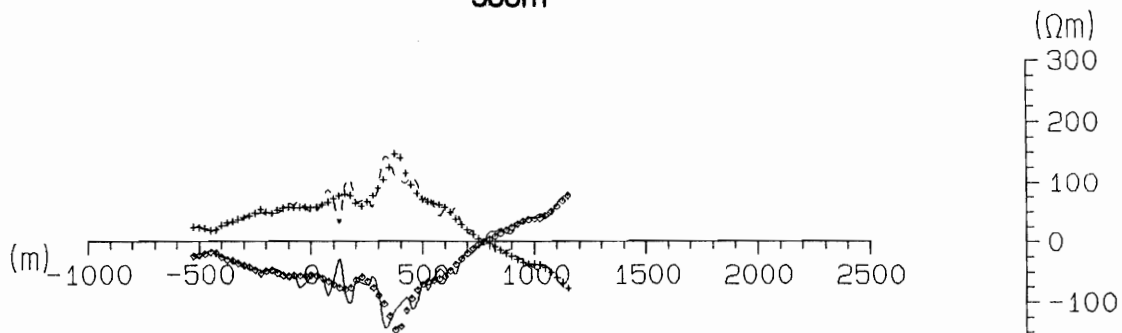
KRAFLA  
Lína 4  
750m

◇ —  $\rho_{AC}$  —  $-\rho_{AB}$   
+ ---  $\rho_{BC}$  —  $-\rho_{AB}$



**KRAFLA**  
**Línea 5**  
**500m**

◇ —  $\rho_{AC} - \rho_{AB}$   
 + ---  $\rho_{BC} - \rho_{AB}$



**KRAFLA**  
**Línea 5**  
**750m**

◇ —  $\rho_{AC} - \rho_{AB}$   
 + ---  $\rho_{BC} - \rho_{AB}$

