



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Knútur Árnason

**JARÐHITI Á ÖLKELDUHÁLSSVÆÐI
Viðnámsmælingar 1991 og 1992**

Samvinnuverkefni Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar

OS-93037/JHD-10

Reykjavík, júlí 1993



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 720 103
[/os/pi/jhd.os/mælingar.jel/olkelduh.t](http://os/pi/jhd.os/mælingar.jel/olkelduh.t)

Knútur Árnason

JARÐHITI Á ÖLKELDUHÁLSSVÆÐI

Viðnámsmælingar 1991 og 1992

Samvinnuverkefni Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar

OS-93037/JHD-10

Reykjavík, júlí 1993

ISBN 9979-827-25-4

ÁGRIP

Árin 1991 og 1992 voru gerðar 35 TEM-viðnámsmælingar austan Hengils til að kanna útbreiðslu jarðhita á því svæði sem í daglegu tali gengur undir nafninu Ölkelduhálssvæði. Verkið var í upphafi greitt af Hitaveitu Reykjavíkur en síðan breytt í samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar.

Viðnámsmælingarnar sýna útbreitt lágviðnámsvæði sem talið er afmarka jarðhitasvæðið. Neðan lágviðnámsins kemur fram hærra viðnám sem talið er endurspeglar ummyndun sem hefur orðið við hitastig hærra en 240 °C. Lágt viðnám og hátt viðnám neðan lágviðnáms rísa hæst undir Hengli og til austurs frá Hengli að Ölkelduhálsi þar sem fram kemur staðbundið hámark. Þetta er talin vísbending um að á þeim svæðum sé jarðhitavirknin mest.

Norðurmörk jarðhitavirkinnar eru nokkuð skörp undir Þverárdal og Hrómundartindi, en þar dýpkar mjög ört á lágviðnámslagið. Suðurmörkin eru ekki jafn skýr, en yfirleitt dýpkar þó á lágviðnám til suðurs frá Hengli og Ölkelduhálsi. Jarðhitafræðileg túlkun á viðnámsskipan jarðlaga á syðri hluta mælisvæðisins er ekki jafn einhlít og norðurhlutanum því að nokkuð víst má telja að jarðhitakerfið hafi afrennsli til suðurs og við slíkar aðstæður getur viðnámsskipan verið flókin. Ekki sáust nein austurmörk á jarðhitavirkninni enda er samfelld jarðhitavirkni frá Ölkelduhálsi til Hveragerðis, vel út fyrir austurmörk þess mælisvæðis sem tekið var fyrir að þessu sinni.

Undir norðanverðri Bitru sýna viðnámsmælingarnar staðbundið lágviðnámsvæði innan háviðnámsins neðan meginlágviðnámslagsins. Þetta staðbundna lágviðnám er talið endurspeglar lægri hita en umhverfis og þá trúlega vegna niðurstreymis kaldara grunnvatns í jarðhitakerfið. Þessi túlkun fær stuðning af mælingum á styrk og hlutföllum gastegunda í gufuaugum sem benda til fblöndunar ferskara vatns á þessum slóðum. Mælingar sýna enn fremur nokkuð stöðuga skjálftavirkni á þessu svæði og hefur hún verið sett í samband við varmanám úr heitu bergi.

Auk þessa staðbundna lágviðnáms eru talin sjást merki um kælingu á norðurmörkum jarðhitasvæðisins, því þar er viðnám í lágviðnámslaginu til þess að gera hátt. Enn fremur sýnir hitamæling í borholu í Klambragili lægra hitastig en ætla mætti út frá ummyndun.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. TEM-MÆLIADFERÐIN	8
3. FRAMKVÆMD MÆLINGA	10
4. ÚRVINNSLA OG TÚLKUN	14
5. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA	15
6. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGANNA	17
6.1 Viðnámsnið	17
6.2 Jafnviðnámskort	19
6.3 Efri mörk lágviðnámskápu	21
6.4 Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms	21
6.5 Viðnám í lágviðnámskápu	22
6.6 Staðbundið lágviðnám innan háviðnáms	23
7. AÐRAR RANNSÓKNIR	45
7.1 Jarðfræðiathuganir	45
7.2 Skjálftamælingar	46
7.3 Styrkur gass í gufu	48
7.4 Boranir	50
8. SAMANBURÐUR Á NIÐURSTÖÐUM VIÐNÁMSMÆLINGA OG ANNARRA RANNSÓKNA	59
9. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	64
10. HEIMILDIR	66
ÞAKKIR	68
ENGLISH SUMMARY	69
VIÐAUKI: Viðnámsmæligögn	71

TÖFLUSKRÁ

1. Staðsetning TEM-mælinga austan Hengils 1991 og 1992	11
2. Staðsetning TEM-mælinga á Nesjavallasvæði 1986	12
3. Staðsetning Schlumbergermælinga frá 1972-1983	12

MYNDASKRÁ

1. Yfirlitsmynd	7
2. Staðsetning viðnámsmælinga og viðnámsniða	13
3. Viðnámsnið eftir línu 1	25
4. Viðnámsnið eftir línu 2	26
5. Viðnámsnið eftir línu 3	27
6. Viðnámsnið eftir línu 4	28
7. Viðnámsnið eftir línu 5	29
8. Viðnámsnið eftir línu 6	30
9. Viðnámsnið eftir línu 7	31
10. Viðnámsnið eftir línu 8	32
11. Viðnámsnið eftir línu 9	33
12. Viðnámsnið eftir línu 10	34
13. Viðnámsnið eftir línu 11	35
14. Viðnám 250 m ofan sjávarmáls	36
15. Viðnám 100 m ofan sjávarmáls	37
16. Viðnám 50 m neðan sjávarmáls	38
17. Viðnám 200 m neðan sjávarmáls	39
18. Viðnám 350 m neðan sjávarmáls	40
19. Efri mörk lágviðnáms	41
20. Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms	42
21. Viðnám í lágviðnámslagi	43
22. Staðbundið lágviðnám innan háviðnáms	44
23. Skjálftar á Hengilssvæði 12.7. - 9.10. 1981	52
24. Skjálftar á Hengilssvæði 1.7. 1991 - 31.1. 1993	53
25. Styrkur koltvíoxíðs í gufu	54
26. Styrkur brennisteinsvetnis í gufu	55
27. Styrkur vetnis í gufu	56
28. Hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis í gufu	57
29. Hlutfall súrefnisísótópa í gufu	58
30. Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms og styrkur vetnis í gufu	61
31. Hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis, dreifing skjálfta og staðbundið lágviðnám	62
32. Viðnám í lágviðnámslagi og hlutfall súrefnisísótópa	63

1. INNGANGUR

Í þessari skýrslu er greint frá niðurstöðum TEM-viðnámsmælinga á svæðinu austan Hengils sem gerðar voru árin 1991 og 1992. Það mælisvæði sem tekið var fyrir að þessu sinni afmarkast af Orustuhólshrauni, Litla-Skarðsmýrarfjalli og Hengladalsá í suðri, Reykjadal og Katlatjörnum í austri, norðurhluta Hrómundartinds og Krossfjalla í norðri og Hengli og Skarðsmýrarfjalli í vestri, sjá mynd 1. Tilgangur þessarar rannsóknar var að kortleggja jarðhitakerfið austan Hengils og kanna innra ástand þess að svo miklu leyti sem slíkt er hægt með viðnámsmælingum á yfirborði. Rannsóknin var í upphafi greidd af Hitaveitu Reykjavíkur en verkinu var síðar breytt í samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar undir verkefninu "Jarðhiti til raforkuvinnslu" (verknúmer 720-103).

Á Hengilssvæðinu er samfelldur jarðhiti frá Hengli í norðvestri til Hveragerðis í suðaustri. Þrátt fyrir að jarðhitinn sé nær samfelldur á yfirborði hníga jarðfræðileg rök að því að um sé að ræða þrjú samliggjandi jarðhitakerfi, tengd þremur eldstöðvakerfum (Knútur Árnason o.fl. 1987a). Syðst og austast er jarðhitakerfi sem tengt er rofinni megineldstöð í Grensdal, sem einnig er oft kennd við Hveragerði, og er talin vera 300-700 þúsund ára gömul. Nöfn eru hér nokkuð á reiki. Grensdalur mun í raun heita Grænidalur og er merktur þannig á kortum í þessari skýrslu. Mönnum er hinsvegar tamt í munni að kenna megineldstöðina upp af Hveragerði við Grensdal og er þeirri venju haldið hér. Jarðhitinn í Hveragerði er afrennsli til suðurs frá þessu kerfi. Vesturmörk Grensdalskerfisins eru ekki skörp á yfirborði en talin vera við Reykjadal. Norðan og vestan við jarðhitakerfi Grensdalseldstöðvarinnar er jarðhitakerfi sem tengt er eldstöð undir Hrómundartindi. Þetta kerfi er venjulega kennt við Ölkelduháls sem er sunnan og vestan við Hrómundartind, en þar er jarðhitavirkni þess mest á yfirborði. Vestan við Ölkelduhálskerfið tekur síðan við jarðhitakerfi tengt megineldstöðinni undir Hengli. Mörkin milli Ölkelduháls- og Hengilskerfanna eru ekki skýr en hafa verið talin vera um línú frá Sandklettum í norðri, um Brúnkollubletti og suður í Litla-Skarðsmýrarfjall.

Samkvæmt þessari skiptingu jarðhitans nær sú rannsókn sem greint er frá hér til austurhluta Hengilskerfisins og Ölkelduhálskerfisins.

Kerfisbundnar rannsóknir á jarðhita á Hengilssvæði hófust árið 1947 með rannsóknum Gunnars Böðvarssonar, Trausta Einarssonar og fleiri (Gunnar Böðvarsson 1951; Trausti Einarsson o.fl. 1951). Frá þeim tíma hafa verið gerðar all umfangsmiklar rannsóknir á svæðinu og er sú rannsóknarsaga stuttlega rakin af Gylfa Páli Hersi o.fl. (1990a) og heildarniðurstöður dregnar saman. Þessar rannsóknir eru nokkuð misdreifðar í tíma og rúmi og hér verða einungis tíundaðar þær rannsóknir sem nýtast til samanburðar við niðurstöður viðnámsmælinganna.

Á árunum 1985 og 1986 var gerð ýtarleg jarðfræðirannsókn á Hengli, Nesjavallasvæði og svæðinu austan Hengils að Reykjadal (Knútur Árnason o.fl. 1986 og 1987a). Upphleðslueiningar voru kortlagðar og þeim raðað í tíma. Ennfremur voru sprungur og misgengi kortlögð.

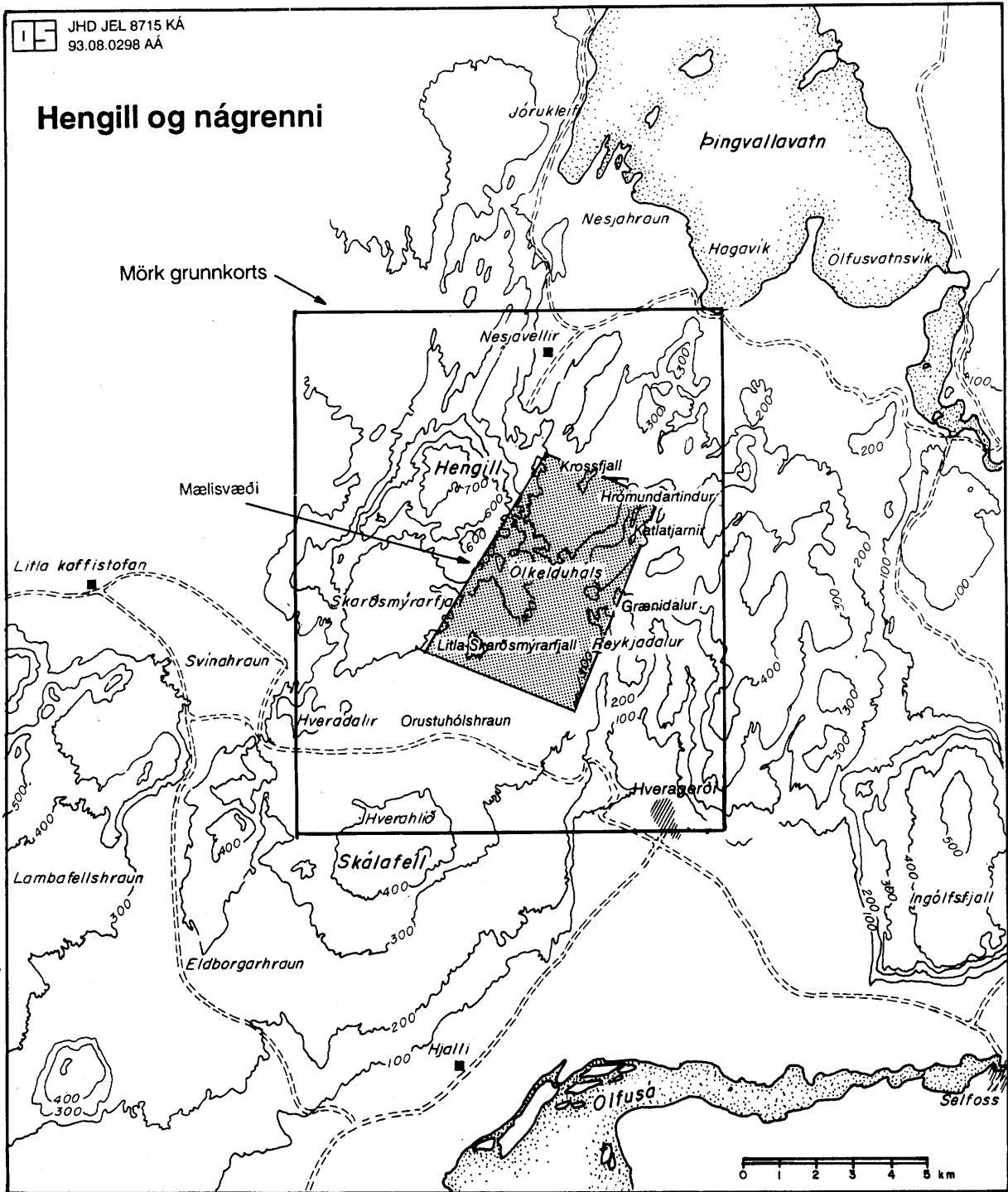
Á árunum 1970-1984 voru gerðar 85 Schlumbergerviðnámsmælingar á Hengilssvæðinu auk 18 tvíþólvíðnámsmælinga. Af þessum eldri mælingum eru 17 Schlumberger- og 4 tvíþólmælingar innan eða á jöðrum þess mælisvæðis sem hér er fjallað um. Við einvíða túlkun er upplausn Schlumbergermælinga mun minni en TEM-mælinga og því eru niðurstöður Schlumbergermælinganna einungis notaðar á jöðrum mælisvæðisins til að áætla legu jafnvíðnámslína. Niðurstöður tvíþólmælinga er yfirleitt erfitt að túlka tölulega og er því ekki byggt á þeim að öðru leyti en því að þær sýna allar hækkandi viðnám neðan lágviðnáms.

Árin 1985 og 1986 gerði Jarðhitadeild Orkustofnunar umfangsmiklar yfirborðsrannsóknir á Nesjavallasvæðinu norðaustan Hengils. Þar voru gerðar 59 Schlumbergermælingar auk viðnámsniðsmælinga eftir 8 línum. Gerð var tvívíð túlkun á mæliniðurstöðum og fékkst með því móti allnákvæm mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins á Nesjavallasvæði (Knútur Árnason o.fl. 1986 og 1987a). Sumarið 1986 voru í fyrsta skipti hérlendis gerðar TEM-mælingar með lykkju sem straumuppsprettu. Mælt var eftir tveimur af mæliðnunum á Nesjavöllum til að fá samanburð við eldri mæliaðferðir. Viðnámsmæligögnin frá Nesjavöllum eru tekin hér með og viðnámsnið og kort látin ná þangað norður.

Árið 1982 stóð Hitaveita Reykjavíkur fyrir könnun á gasstyrk í gufuaugum á Hengilssvæðinu (Helgi Torfason o.fl. 1983). Sýni voru tekin úr gufuaugum á öllu svæðinu frá Hveragerði í suðaustri, norðvestur um Ölkelduháls og Hengil í vestri. Árin 1984 og 1985 stóð Orkustofnun enn fremur fyrir töku sýna til efnagreininga á Hengilssvæðinu (Hrefna Kristmannsdóttir og Kristján H. Sigurðsson 1993). Sýnatökustaðir voru að verulegu leyti þeir sömu og hjá Hitaveitu Reykjavíkur auk nokkurra nýrra, einkum í austanverðum Hengli og milli Hengils og Tjarnarhnúks. Niðurstöður um styrk og hlutföll gass í gufu og hlutfall súrefnisísótópa eru hér bornar saman við niðurstöður viðnámsmælinganna.

Sumarið 1981 var skjálftavirkni á Hengilssvæðinu skráð með þéttu neti næmra skjálftamæla (Foulger 1984; Foulger og Toomey 1989). Smáskjálftavirkni reyndist nokkuð mikil og misdreifð um Hengilssvæðið. Þessi rannsókn á skjálftavirkni er að því leyti merkileg að hún sýndi í fyrsta skipti, svo óyggjandi megi teljast, smáskjálfta með brotlausnum sem svara til hreinnar rifnunar bergs, en ekki hliðrunarhreyfingu á brotflötum. Þessir rifnunar-skjálftar voru túlkaðir (Foulger, 1984; Foulger og Long, 1984) sem brestir í bergi sem er að dragast saman við kælingu. Tilvist slíkra skjálfta endurspeglar, samkvæmt þeirri túlkun, svæði þar sem varmanám á sér stað.

Veðurstofa Íslands hefur, frá því í júlí 1991, skráð skjálfta á Hengilssvæðinu með sjálfvirku skjálftamælineti á Suðurlandi (SIL). Skráning Veðurstofunnar með SIL-kerfinu gefur svipaða dreifingu skjálfta og rannsóknin 1981 sem sýnir að dreifingin er stöðug yfir langan tíma. Dreifing smáskjálfta er hér borin saman við viðnámsdreifinguna undir mælisvæðinu.



Mynd 1: Yfirlitsmynd. Sýnd eru mörk grunnkorts og mælisvæðis.

2. TEM-MÆLIADFERÐIN

Eins og nefnt var í inngangi hér að framan var TEM-mæliadferðin (Transient Electro-Magnetic) með straumlykkju sem uppsprettu fyrst reynd hér á landi á Nesjavöllum sumarið 1986 (Knútur Árnason o.fl. 1987a). Fram til þess tíma hafði nær eingöngu verið beitt svokölluðum jafnstraumsaðferðum til að kanna viðnám í efsta kílómetra jarðskorpunnar. Í jafnstraumsaðferðum er sendur rafstraumur ofan í jörðina og mælt hversu mikið af honum hleypur í yfirborði (mældur spennumunur í yfirborði). Til þess að kanna viðnám sem fall af dýpi er fjarlægðin milli straumskautanna aukin jafnt og þétt. Af því leiðir að það eru ekki einungis viðnámsbreytingar með dýpi sem hafa áhrif á mæliniðurstöður heldur einnig viðnámsbreytingar í lárétta stefnu. Af þessum sökum þarf oft að beita tímaflekum líkanreikningum við túlkun mælinganna í svokallaðri tvívíðri túlkun.

Sú jafnstraumsaðferð sem mest hefur verið beitt hér á landi er svokölluð Schlumbergeraðferð. Með henni er ætlað að fá upplýsingar um eðlisviðnám jarðar sem fall af dýpi undir mælistað. Til þess að hægt sé að beita tvívíðri túlkun á Schlumbergermælingar þarf að gera nokkrar mælingar á beinni línu og túlka allar mælingarnar samtímis með líkanreikningum. Annarri jafnstraumsaðferð, svokölluðum viðnámssniðsmælingum, hefur mikið verið beitt hérlendis til að kanna breytingar viðnáms í lárétta stefnu og hefur hún gefið góða raun við leit að vatnsleiðandi sprungum á lágheitsvæðum.

Með því að beita saman Schlumberger- og viðnámssniðsmælingum og túlka öll mæligögnin með tvívíðum líkanreikningum má fá mjög nákvæma mynd af viðnámsskipan í efsta kílómetranum undir mæliálfunum. Þessari aðferð var beitt við yfirborðsrannsóknirnar á Nesjavallasvæðinu árin 1985 og 1986 með góðum árangri. Helsti gallinn við þessa aðferð er að hún er mjög tímafrek og dýr, bæði við gagnasöfnun og túlkun. Þetta var ein meginástæða þess að farið var að kanna möguleika á beita fljótverkari og ódýrari aðferðum og var prófun á TEM-mælingum liður í því. Nesjavallasvæðið varð fyrir valinu sem prófunarstaður því að þar fékkst samburður við bestu fánlegar niðurstöður með eldri aðferðum.

Samaburðurinn leiddi í ljós að TEM-mælingar væru mjög fýsilegur kostur (Knútur Árnason o.fl. 1987a). 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 einvíð túlkun (þar sem einungis er gert ráð fyrir því að viðnám breytist með dýpi) TEM-mælinga gaf svipaða upplausn og tvívíð túlkun (þar sem viðnám breytist með dýpi og einni láréttri stefnu) jafnstraumsmælinga. Ástæða þessa er sú að TEM-mælingar skyggjast í mun meira mæli beint ofan í jörðina en Schlumbergermælingar. Vonast hafði verið til þess að TEM-mælingarnar hefðu meiri dýptarskynjun en Schlumbergermælingar, en í ljós kom að hún var mjög áþekk.

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 straum til jarðar í jafnstraumsmælingum á svæðum þar sem jarðvegur og gróður er líttill. Þetta gerir enn fremur kleift að gera TEM-mælingar þegar jörð er þakin snjó. Með því að nota vélsleða eða bíla búna til aksturs á snjó má oft, seinni hluta vetrar, komast auðveldlega um mælisvæði sem eru lítt- eða ófær farartækjum að sumarlagi. Helsti gallinn við mælivinnu seinni part vetrar er sá að meiri hætta er á að veður hamli vinnu en að sumri til.

Í TEM-mælingum með straumlykkju sem uppsprettu er lögð vírlykkja á jörðina, yfirleitt ferningslaga og um 300 m á kant. Rafstraumur er sendur í lykkjuna og hann síðan rofinn skyndilega. Straumurinn býr til segulsvið og þegar hann er rofinn fer segulsviðið að hnigna. Við það spanast straumar í jörðinni sem leitast við að viðhalda segulsviðinu. Eftir því sem lengra lður frá því að straumurinn var rofinn ná spanstraumarnir dýpra í jörðu og segulsviðið á yfirborði dofna. Hnignun segulsviðsins er mæld með því að mæla span í spólu í miðju sendilykkjunnar. Út frá styrk spansins í móttökuspólunni, sem fall af tíma, má síðan ákvarða eðlisviðnám undir mælistað, sem fall af dýpi (Knútur Árnason 1989).

3. FRAMKVÆMD MÆLINGA

TEM-mælingar austan Hengils hófust í marsmánuði 1991. Ætlunin var að nota vélsleða til að ferðast um mælisvæðið, en þegar til kom var snjór það lítil að því var ekki við komið. Var þá brugðið á það ráð að nota bíl á stórum dekkum og reyndist það vel. Þó varð ekki komist á nyrðrihluta mælisvæðisins, norðan við Ölkelduháls, vegna ógreiðfærs lands og snjóleysis. Gert var út frá Reykjavík og var því hægt að sæta lagi með veður þannig að lítið var um að veður hamlaði mælingum ef farið var af stað á annað borð. Mestar tafir urðu vegna erfiðleika við að komast yfir Hengladalsá, en hún bólgnaði upp og fylltist af krapí í frostum og renningi. Við mælingarnar unnu tveir menn og mældu alls 17 mælingar, ÖH-01 - ÖH-17, á 9 dögum eða tæplega tvær mælingar á dag að jafnaði.

Mælingum var síðan fram haldið seinnipart vetrar 1992. Þá var snjór nokkuð meiri en árið áður og var til þess að gera greiðfært um mælisvæðið á vélsleðum og voru mælingamenn af þeim sökum fljótari í ferðum en árið áður. Að þessu sinni voru gerðar 18 mælingar, ÖH-18 - ÖH-35, á 8 dögum eða 2,25 mælingar á dag að jafnaði og var verkið unnið af tveimur mönnum eins og áður. Að þessu sinni voru mælingar einkum gerðar á nyrðri hluta mælisvæðisins, sem ekki var aðgengilegur árið áður, en einnig var bætt við nokkrum mælingum syðst.

Í töflu 1 er yfirlit yfir mælingarnar þar sem fram kemur hvenær þær voru gerðar, staðsetning í lengd og breidd og hæð mælistaðar yfir sjó. Staðsetning mælinganna er sýnd á mynd 2. Notuð var ferningslaga sendilykkja, 300 m á kant, í öllum mælingunum að undanskildum tveimur (ÖH-08 og ÖH-14) þar sem lykkjan var höfð 200 m á kant vegna þrængsla í stórskornu landslagi, en sendilykkjan þarf að vera sem næst lárétt. TEM-mælingar eru nærmar fyrir rafsegultruflunum svo sem frá raflínum. Rafsegultruflanir voru litlar enda mælisvæðið langt frá byggð og mæligögnin því mjög góð nema allra syðst þar sem farið var að gæta áhrifa frá háspennulínum á Hellsheiði.

Eins og getið er í inngangi hér að framan eru dregin inn í þessa skýrslu gögn og niðurstöður frá rannsóknunum á Nesjavallasvæði árin 1985 og 1986. Þessi gögn eru tvennskonar. Annars vegar eru jafnstraumsmælingar, alls 59 Schlumbergermælingar og 54 km af viðnámsmælingum á 8 mæli línum. Áður hefur verið gerð grein fyrir framkvæmd og úrvinnslu þessara mælinga (Knútur Árnason o.fl. 1986 og 1987a). Staðsetning mæli línanna er sýnd á mynd 2. Hins vegar eru 13 TEM-mælingar sem gerðar voru með samskonar tækjum og mælingarnar 1991 og 1992 og eru gögn og niðurstöður þeirra því á allan hátt sambærilegar. Framkvæmd og úrvinnslu þessara mælinga hefur verið lýst áður (Knútur Árnason o.fl. 1987a) en staðsetning þeirra er gefin í töflu 2 og sýnd á mynd 2.

Einnig er leitað fanga í nokkrum eldri Schlumbergermælingum á jöðrum mælisvæðisins. Gylfi Páll Hersir o.fl. (1990a) hafa gert grein fyrir framkvæmd og túlkun þeirra, en dagsetning þeirra og staðsetning er gefin í töflu 3 og ennfremur sýnd á mynd 2. Hluti þessarra mælinga er frá þeim tíma þegar viðnámsmælitækni var mun frumstæðari en nú á dögum og eru gæði þeirra og dýptarskynjun því í slakara lagi.

Tafla 1. Staðsetning TEM-mælinga austan Hengils 1991 og 1992.

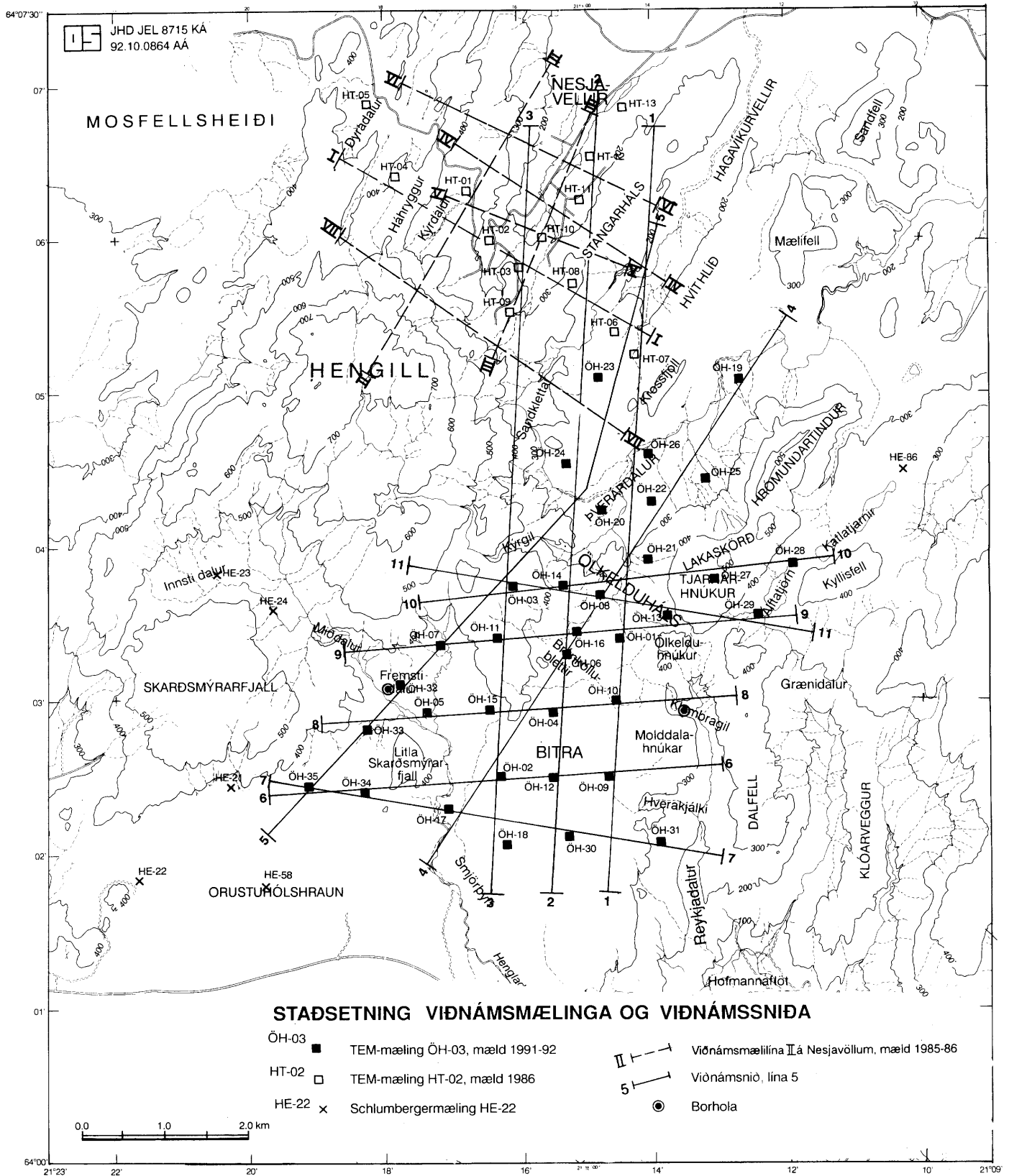
Heiti mæl.	Dagsetn.	Lengd	Breidd	Hæð (m y.s.)
ÖH-01	20.03.'91	21°14.50'	64°03.40'	340
ÖH-02	21.03.'91	21°16.28'	64°02.53'	375
ÖH-03	03.04.'91	21°16.10'	64°03.72'	470
ÖH-04	03.04.'91	21°15.00'	64°02.90'	390
ÖH-05	05.04.'91	21°17.37'	64°02.91'	347
ÖH-06	06.04.'91	21°15.30'	64°03.29'	375
ÖH-07	06.04.'91	21°17.16'	64°03.35'	355
ÖH-08	07.04.'91	21°14.80'	64°03.66'	332
ÖH-09	07.04.'91	21°14.68'	64°02.52'	377
ÖH-10	08.04.'91	21°14.58'	64°02.98'	363
ÖH-11	08.04.'91	21°16.32'	64°03.42'	444
ÖH-12	08.04.'91	21°15.50'	64°02.52'	378
ÖH-13	10.04.'91	21°13.80'	64°03.54'	388
ÖH-14	10.04.'91	21°15.33'	64°03.73'	372
ÖH-15	10.04.'91	21°16.45'	64°02.92'	380
ÖH-16	11.04.'91	21°15.14'	64°03.43'	369
ÖH-17	11.04.'91	21°17.08'	64°02.30'	338
ÖH-18	23.03.'92	21°16.23'	64°02.11'	365
ÖH-19	25.03.'92	21°12.69'	64°05.11'	223
ÖH-20	26.03.'92	21°14.76'	64°04.23'	244
ÖH-21	26.03.'92	21°14.08'	64°03.89'	316
ÖH-22	26.03.'92	21°14.03'	64°04.29'	252
ÖH-23	30.03.'92	21°14.80'	64°05.10'	227
ÖH-24	30.03.'92	21°15.30'	64°04.53'	268
ÖH-25	31.03.'92	21°13.21'	64°04.43'	268
ÖH-26	31.03.'92	21°14.06'	64°04.58'	233
ÖH-27	31.03.'92	21°13.08'	64°03.77'	480
ÖH-28	01.04.'92	21°11.93'	64°03.87'	369
ÖH-29	01.04.'92	21°12.43'	64°03.54'	370
ÖH-30	01.04.'92	21°15.30'	64°02.12'	365
ÖH-31	02.04.'92	21°13.92'	64°02.08'	297
ÖH-32	02.04.'92	21°17.78'	64°03.11'	351
ÖH-33	02.04.'92	21°18.24'	64°02.79'	358
ÖH-34	06.04.'92	21°18.30'	64°02.42'	367
ÖH-35	06.04.'92	21°19.13'	64°02.44'	377

Tafla 2. Staðsetning TEM-mælinga á Nesjavallasvæði 1986.

Heiti mæl.	Dagsetn.	Lengd	Breidd	Hæð (m y.s.)
HT-01	12.08.86	21°16.75'	64°06.33'	340
HT-02	13.08.86	21°16.40'	64°05.96'	282
HT-03	13.08.86	21°15.97'	64°05.82'	292
HT-04	14.08.86	21°17.80'	64°06.46'	403
HT-05	14.08.86	21°18.22'	64°06.86'	336
HT-06	15.08.86	21°14.56'	64°05.41'	230
HT-07	15.08.86	21°14.25'	64°05.26'	235
HT-08	16.08.86	21°15.17'	64°05.70'	305
HT-09	16.08.86	21°16.20'	64°05.53'	318
HT-10	17.08.86	21°15.62'	64°06.00'	205
HT-11	17.08.86	21°15.07'	64°06.27'	196
HT-12	17.08.86	21°14.90'	64°06.53'	173
HT-13	18.08.86	21°14.41'	64°06.83'	170

Tafla 3. Staðsetning Schlumbergermælinga frá 1972-1983.

Heiti mæl.	Dagsetn.	Lengd	Breidd	Hæð (m y.s.)
HE-21	30.06.72	21°20.30'	64°02.45'	383
HE-22	01.07.72	21°21.67'	64°01.80'	383
HE-23	05.07.72	21°20.50'	64°03.80'	460
HE-24	05.07.72	21°19.67'	64°03.63'	433
HE-58	06.06.75	21°19.79'	64°01.77'	366
HE-86	06.09.83	21°10.25'	64°04.50'	264



Mynd 2: Staðsetning viðnámsmælinga og viðnámsniða.

4. ÚRVINNSLA OG TÚLKUN

Eins og áður segir byggjast TEM-mælingar á því að mæla hnignun segulsviðsins frá sendilykkjunni með því að mæla spanspennu í móttökuspólu í miðju lykkjunnar. Spanspennan er mældi í þremur hlutum fyrir alls 30 tímagildi sem eru jafndreifð á logarítmaskala á tímabilinu $89 \mu\text{s}$ til 71,2 ms eftir að straumurinn í sendilykkjunni er rofinn. Hver hluti spennuferilsins er mældur margsinnis til þess að kanna hvort flökt sé á mælingunum vegna ytri truflana og ef svo er til að reikna meðaltalsgildi og fá mat á dreifingu.

Fyrsta skrefið í úrvinnslu mælinganna er að skoða spennuferlana og sleppa gildum sem augljóslega innihalda truflanir. Að því loknu eru reiknuð meðaltalsspennugildi og búinn til spennuferill. Út frá spennugildunum er síðan reiknað sýndarviðnám (síðtíma-sýndarviðnám, sjá Knútur Árnason 1989) og þannig búinn til sýndarviðnámsferill sem fall af tíma. Sýndarviðnámsferlarnir eru síðan túlkaðir yfir í viðnámsskipan undir mælistað með einvíðri túlkun. Í einvíðri túlkun er gert ráð fyrir því að jörðinni undir mælistað megi skipta upp í endanlega mörg lárétt lög með mismunandi eðlisviðnámi. Túlkunarmaður velur fjölda viðnámslaga og gefur ágiskuð 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 (Knútur Árnason 1989). Hver sýndarviðnámsferill er túlkaður þannig með mismunandi fjölda viðnámslaga. Að öllum jafnaði er það viðnámslíkan valið sem lokallíkan, sem gefur reiknaðan sýndarviðnámsferil sem fellur að þeim mælda (með u.þ.b. 1% meðalfrávik) og hefur fæst viðnámslög.

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

Þess ber að geta að sú túlkunarðáferð sem hér er lýst er að formi til sú sama og beitt var á Schlumbergermælingar þar til tvívíð túlkun kom til sögu fyrir u.þ.b. 10 árum og hefur ekki verið talin nægjanleg fyrir þær. Eins og áður hefur verið nefnt eru TEM-mælingar 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. Af þessum sökum gefa viðnámssnið byggð á einvíðri túlkun TEM-mælinga mun áreiðanlegri mynd en samsvarandi snið byggð á Schlumbergermælingum. Tilraunamælingarnar á Nesjavöllum sumarið 1986 sýndu að einvíð túlkun TEM-mælinga gefur líftíð lakari upplausn en tvívíð túlkun á jafnstraumsmælingum (Knútur Árnason 1987a og 1990).

5. 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 Flóvenz o.fl. (1985) gerðu tilraun til að kanna samband ofantalinna frumþátta og eðlisviðnáms bergs í efsta kílómetra jarðskorpu Íslands utan gosbeltanna. Meginniðurstaða þeirrar vinnu var sú, að fyrir berg mettað vatni með litla seltu (eðlisviðnám við stofuhita herra 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 zeólítar ráðandi ummyndunarsteindir í efsta kílómetranum. Líta má á rafleiðni í poruvökva og leirsteindum sem rafrás með samsíðatengdum viðnámmum og fer straumurinn þá einkum um það viðnámið sem lægra er.

Skilningur á sambandi eðlisviðnáms og innri eðlisþátta háhitakerfa jókst verulega við rannsóknirnar á Nesjavallasvæðinu. Þar fékkst allýtarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins sem hægt var að bera saman við umfangsmikil gögn úr borholum. Sá samanburður leiddi í ljós góða fylgni milli hitastigs og ummyndunar annars vegar og eðlisviðnáms hins vegar (Knútur Árnason o.fl. 1986, 1987a og 1987c).

Í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum er víðast jafnvægi milli ummyndunar og hitastigs nema á vesturjaðri kerfisins þar sem kólnun hefur átt sér stað (Hjalti Franzson 1988). Þar sem jafnvægi er milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir 1979). Við hitastig frá 50-100°C og upp að u.þ.b. 200°C er smektít og zeólítar ráðandi ummyndunarsteindir. Á bilinu 200°C til 230°C hverfa zeólítar og smektít þróast yfir í blandlagssteindir. Við hitastig um 240°C hafa blandlagssteindir þróast yfir í klórít og um og ofanvið 250°C verða klórít og epídót ráðandi ummyndunarsteindir.

Samanburður á eðlisviðnámi og berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu sýndi að eðlisviðnámið er hátt í köldu og fersku bergi en lækkar mjög og er 1–5 Ωm þegar kemur í smektít-zeólítabeltið við hitastig á bilinu 50 til 200°C. Þegar kemur niður í klórít- og klórít-epídótbeltið og hitastig er orðið um og yfir 240°C hækkar viðnámið aftur og verður allt að því stærðargráðu herra en í smektít-zeólítabeltinu. Ekki sást afgerandi fylgni milli berggerðar (basalthrauna/móbergs) og eðlisviðnáms. Ekki verður þó af því dregin sú ályktun að viðnámið sé óháð poruhluta, heldur frekar hitt að áhrif ummyndunar yfirgnæfi áhrif poruhluta. Reyndar er hugsanlegt að viðnámsþækkunin í klórítbeltinu sé að hluta til vegna minnkandi poruhluta.

Af mælingum á eðlisviðnámi jarðhitavatnsins í Nesjavallakerfinu og áætlaðum poruhluta bergsins er ljóst að rafleiðni í smektít-zeólítabeltinu er einkum af völdum ummyndunarsteinda en ekki vegna leiðni í poruvökva. Viðnámið í klórítbeltinu getur hins vegar svarað til þess að þar sé leiðni í poruvökva ráðandi. Þennan mismun í leiðni í ummyndunarbeltonum má skilja í ljósi mismunandi uppbyggingar smektít- og klórít steindanna. Smektít steindirnar hafa lausbundnar

jónir og mikla jónaskiptaæiginleika 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-zeólítabeltinu 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 lágvinámskápa með eðlisviðnám 1–10 Ωm sem endurspeglar smektít-zeólítabelti. Neðan hennar hækkar viðnám aftur þar sem klórítumyndun 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 240°C.

Þessari túlkun á sambandi viðnáms og hitaástands háhitakerfa má þó ekki beita í blindni. Í fyrsta lagi er ekki 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 viðnámsdreifingu bergsins því að það tekur nokkurn tíma að "yfirprenta" ummyndunina þannig að viðnámið fari að endurspegla breytt hitaástand (klórít breytist t.d. ekki í blandlags- eða leirsteindir við kælingu). Sömuleiðis má gera ráð fyrir því, að það taki ummyndunarstig bergsins nokkurn tíma að bregðast við hækkandi hita. Trúlega má þó út frá viðnámsdreifingu sjá hvort orðið hefur kólnum frá því meginumyndun bergsins átti sér stað því að viðnám í hinum mismunandi ummyndunarbeltum 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 sé ummyndun í jafnvægi við hitastig má gera ráð fyrir að viðnámið sé lægra en 5 Ωm a.m.k. í hluta smektít-zeólítabeltisins. 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 jarðfræðiathugun á t.d. sögu eldvirkni viðkomandi svæðis.

Í öðru lagi þarf hækkandi viðnám neðan lágviðnáms 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. 1990a). Í jarðhitakerfinu í Hvíthólum á Kröflusvæði kemur fram herra viðnám neðan lágviðnáms sem fellur saman við lækkandi hita og minni ummyndun í basalhraunum neðan móbergslaga (Knútur Árnason o.fl. 1984). Þetta ber að hafa í huga þegar túlka á niðurstöður þeirra viðnámsmælinga sem hér er fjallað um því að næsta vísit má telja að jarðhitakerfin undir austanverðum Hengli og Ölkelduhálsi hafi afrennsli til suðurs.

6. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGANNA

Í þessum kafla verður fjallað um niðurstöður viðnámsmælinganna. Niðurstöðurnar eru settar hér fram á nokkra mismunandi vegu, sem viðnámsnið, jafnviðnámskort á mismunandi dýpi og kort sem sýna efri mörk lágviðnámskápunnar, efri mörk á háu viðnámi neðan lágviðnáms og breytingar viðnáms í lágviðnámskápunni. Hver þessara framsetningaraðferða hefur sína kosti og galla en til samans eiga þær að geta gefið glögga mynd af viðnámsskipan á mælisvæðinu. Auk mælinganna frá 1991 og 1992 byggja sniðin og einkum kortin á viðnámsmæligögnunum frá Nesjavallarannsóknunum árin 1985 og 1986 auk nokkurra eldri Schlumbergermælinga.

6.1 Viðnámsnið

Á myndum 3 til 13 eru sýnd 11 viðnámsnið í gegnum mælisvæðið, en lega sniðanna er sýnd á mynd 2. Þrjú sniðanna, línur 1 - 3 liggja frá suðri til norðurs, frá Smjörþýfi og norður til Nesjavalla. Línur 1 og 2 byggja eingöngu á TEM-mælingum en nyrsti hluti línu 3 er byggður á viðnámslíkaninu frá Nesjavallarannsóknunum 1985 og 1986. Tvö snið, línur 4 og 5, liggja frá suðvestri til norðausturs og 6 styttri snið, línur 6 til 11, liggja nokkurnveginn frá vestri til austurs. Sniðunum verður nú lýst stuttlega.

Lína 1 (mynd 3) liggur norður með austurbrún Bitru, yfir Ölkelduháls, um Þverárdal og norður á norðanverðan Stangarháls. Djúpt er á lágviðnám ($\leq 10 \Omega\text{m}$) undir og norðan við Krossfjöll. Dýpi á lágviðnám minnkar mjög ört til suðurs og er það komið upp undir yfirborði við Ölkelduháls. Undir lágviðnámskápunni fer að koma fram hærra viðnám undir Þverárdal og grynnskar mjög ört á það suður að Ölkelduhálsi. Viðnámið í lágviðnámskápunni er nokkuð hátt á nyrðri hluta línunnar eða á bilinu 6 til $10 \Omega\text{m}$. Við Ölkelduháls verður veruleg breyting því þar verður viðnámið í lágviðnámskápunni verulega lágt, sem bendir til hærri hita. Dýpið á lágviðnámið er nokkuð óbreytt, um 100 m eins langt suður og sniðið nær. Grynns er á hátt viðnám neðan lágviðnáms undir Ölkelduhálsi eða um 100 m en vex lítillega til suðurs en jafnframt hækkar viðnámið í lágviðnámskápunni nokkuð. Til þess að gera hátt viðnám í lágviðnámskápunni í norðurhluta sniðsins má hugsanlega skýra með því að þar hafi orðið kæling. Einnig er hugsanlegt að hækking viðnám í lágviðnámskápunni syðst sé vegna kælingar, en erfitt er að túlka viðnámsskipanina þar yfir í jarðhitafræðilegar stærðir því næsta víst má telja að jarðhitakerfið hafi afrennsli til suðurs og við slíkar aðstæður getur viðnámsskipanin orðið flókin.

Lína 2 (mynd 4) liggur norður miðja Bitruna, yfir Brúnkollubletti, Sandkletta og áfram norður að Nesjavallabæ. Norðurhluti línunnar er farinn að sneiða inn í jarðhitakerfið við Nesjavelli. Í línunni kemur fram vel skilgreint lágviðnám frá Nesjavöllum í norðri og suður undir Smjörþýfi. Nokkuð djúpt er á lágviðnámið og efri mörk þess óregluleg norður á Nesjavallasvæði og er það vegna þess að sniðið sneiðir utan í lágviðnámskápu Nesjavallakerfisins. Þegar kemur suður fyrir Sandkletta grynnskar ört á lágviðnámið og er það komið fast að yfirborði við Brúnkollubletti. Til suðausturs dýpkar nokkuð á lágviðnámið þar til kemur sunnarlega á Bitru að dýpið eykst verulega. Ekki kemur fram hátt viðnám neðan lágviðnáms nyrst í sniðinu, vegna þess að þar sneiðir það utan í lágviðnámskápu Nesjavallakerfisins. Þegar kemur suður fyrir Sandkletta fer að koma fram hátt viðnám undir lagu á um 700 m dýpi og grynnskar mjög ört á það til suðurs. Það rís hæst undir Brúnkollublettum en síðan dýpkar aftur á það til suðurs, fyrst hægt en síðan ört, þegar kemur undir sunnanverða Bitru. Undir og rétt sunnan við Brúnkollubletti kemur fram annað lágviðnámslag inni í háa viðnáminu. Þetta lágviðnámslag er u.þ.b. við sjávarmál (á um 350 m dýpi) og 150 til 200 m neðan lágviðnámskápunnar og hefur mjög takmarkaða útbreiðslu.

Það er mjög óvenjulegt að finna svona lágviðnámspolla inni í háu viðnámi neðan lágviðnáms og ekki augljóst hvaða jarðhitafræðilegar ályktanir má draga af tilvist þeirra. Hugsanlega er þarna lægri hiti en umhverfis t.d. vegna staðbundins niðurstreymis vatns eftir sprungum eða misgengjum, en nánar verður vikið að þessu síðar.

Lína 3 (mynd 5) liggur frá Smjörþýfi í suðri og norður til Nesjavalla. Norðurhluti sniðsins er byggður á niðurstöðum viðnámsmælinganna á Nesjavöllum en suðurhlutinn á TEM-mælingum frá 1991 og 1992. Línan fer um austanverðan Hengil og er þar eyða í gögnin og tenging því óviss. Sniðið sýnir flókna viðnámsskipan á Nesjavallasvæðinu og er það vegna þess að þar er lárétt rennsli eftir lekum jarðlögum sem verður til þess að fram kemur hangandi háviðnám nærri yfirborði. Á meira dýpi kemur fram lágviðnámskápa sem nær óslitð suður undir Smjörþýfi en þar hækkar viðnámið verulega. Undir lágviðnámskápunni kemur fram hærra viðnám og er grynnt á það (um 200 m) við Kýrgil austan í Hengli. Athyglisvert er að háa viðnámið neðan lágviðnámskápunnar hefur yfirleitt lægri viðnámsgildi í Nesjavallakerfinu og undir norðanverðum Hengli en austan Hengils. Hugsanlega er þessi munur vegna þess að jarðhitakerfið austan Hengils er eldra og ummyndun og holufylling meiri en á Nesjavallasvæðinu (á því dýptarbili sem mælingarnar skynja má að öllum jafnaði gera ráð fyrir að holufylling bergsins vaxi með ummyndun). Einnig er hugsanlegt að hærra viðnám neðan lágviðnámskápunnar austan Hengils sé vegna lægri hita. Að þessu verður vikið síðar. Undir suðurenda lágviðnámslagsins, undir Bitru, er viðnámsþékkunin lítil (úr 2,4 í um 6 Ω m) sem gæti þýtt að suðurjaðar lágviðnámslagsins endurspegli lárétt afrennsli til suðurs. Eins og í línu 2 kemur fram staðbundið lágviðnámslag innan háviðnámsins. Þetta staðbundna lágviðnám tengist án efa staðbundna lágviðnáminu í línu 2 þannig að um og vestan við Brúnkollubletti er afbrigðilegt svæði með staðbundnu lágviðnámi innan háviðnámsins.

Lína 4 (mynd 6) liggur frá Smjörþýfi í suðvestri og til norðausturs, norður fyrir Hrómundartind vestanverðan. Línan sker línur 1, 2 og 3 og sýnir svipaða mynd og og þær norður að Ölkelduhálsi. Norðan við Ölkelduháls dýpkar ört á hátt viðnám undir lágu, en fram kemur þykk lágviðnámskápa með til þess að gera háu viðnámi. Þetta lágviðnám nær nálægt yfirborði við mælingu ÖH-25, en þar er sniðið trúlega að sneiða utanf lágviðnám sem gæti verið afrennsli frá jarðhita í Lakaskörðum norðan við Tjarnarhnúk. Þegar kemur norður á móts við Hrómundartind dýpkar mjög á lágviðnám því að í nyrstu mælingunni sést það ekki fyrr en á um 700 m dýpi.

Lína 5 (mynd 7) liggur frá Orustuhólshrauni og norðvestur með Skarðsmýrarfjalli og Hengli. Við Sandkletta beygir hún til norðurs og endar norður á Hagavíkurvöllum. Norðan til sýnir hún svipaða mynd og lína 1 þ.e. nokkuð djúpt á lágviðnám og lágviðnámskápu með til þess að gera háu viðnámi. Þegar kemur suður á móts við Sandkletta grynntar mjög á lágviðnámslagið og viðnám þess lækkar verulega. Jafnframt kemur fram hátt viðnám neðan lágviðnámsins og grynntar ört á það til suðurs. Austan við Hengil og til suðvesturs, eins langt og sniðið nær, er nokkuð þykk lágviðnámskápa en á vaxandi dýpi. Neðan hennar er hærra viðnám en nokkuð breytilegt. Austan Hengils er það hærra en 50 Ω m en þegar kemur á móts við Litla-Skarðsmýrarfjall lækkar það verulega en hækkar síðan aftur syðst og vestast. Ekki er ljóst hvað þetta endurspeglar. Hugsanlega er línan að sneiða utan í jarðhitakerfi undir Skarðsmýrarfjalli.

Línur 6 og 7 (myndir 8 og 9) liggja frá suðaustanverðu Skarðsmýrarfjalli og austur, sín hvoru megin við Hverakjálka. Báðar sýna línurnar nokkuð flókna viðnámskipan, einkum lína 6 sem liggur nokkru norðar. Báðar sýna þær lágviðnám (< 5 Ω m) með hærra viðnámi undir á austan-

verðri Bitru annars vegar og milli Skarðsmýrarfjalls og Litla-Skarðsmýrarfjalls hins vegar, en þar á milli fer viðnám lækkandi með dýpi en er hærra en 5 Ω m eins djúpt og mælingarnar skynja. Þetta bendir til þess að þarna séu Henglis- og Ölkelduhálskerfin aðskilin.

Lína 8 (mynd 10) liggur frá Skarðsmýrarfjalli, norðan við Litla-Skarðsmýrarfjall, austur um Bitru og sunnan við Klambragil. Í línunni kemur fram samfeld lágviðnámskápa með viðnám minna en 5 Ω m. Neðan lágviðnámskápunnar kemur fram hærra viðnám eftir allri línunni. Vestur undir Skarðsmýrarfjalli eru viðnámsgildin undir lágviðnámskápunni mun lægri og þykkt hennar meiri en undir Bitru.

Lína 9 (mynd 11) liggur frá Miðdal og austur yfir Ölkelduháls, að suðurenda Álftatjarnar. Sniðið sýnir samfellda lágviðnámskápu með lægra viðnámi en 5 Ω m og um eða yfir 100 m þykka. Þar fyrir neðan kemur fram hátt viðnám eftir öllu sniðinu. Lágviðnámið nær til yfirborðs á Ölkelduhálsi enda liggur línan um hálsinn milli Tjarnarhnúks og Ölkelduhnúks þar sem jarðhitavirkni er hvað mest á yfirborði. Þar er einnig grynnt á hátt viðnám undir lágu. Sniðið sýnir að nokkuð dýpkar á hátt viðnám undir lágu vestur undir Hengli. Þetta er svolítið villandi því að þarna er mælingu ÖH-32 varpað um 400 m til norðurs og inn á sniðið en á þessum slóðum dýpkar á háviðnámið til suðurs frá Hengli. Um miðbik sniðsins kemur fram lágviðnámslag innan háviðnámsins, um 150 m neðan lágviðnámskápunnar. Þetta er sama lágviðnámslagið og kemur fram í línunum 2 og 3.

Línur 10 og 11 (myndir 12 og 13) liggja frá Hengli í vestri og austur fyrir Álftatjörn, sín hvorumegin við tjörnina. Þær skerast sunnan við Kýrgil og liggur lína 11 fyrir sunnan Álftatjörn en 10 fyrir norðan. Undir austanverðum Hengli sýna línurnar sömu viðnámsskipanina, nokkurn veginn lárétt lágviðnámslag um 100 m þykkt. Þar fyrir neðan, u.þ.b. 200 m yfir sjó tekur við hátt viðnám. Þegar kemur austur undir Ölkelduháls og Tjarnarhnúk skiljast línurnar að og sýna nokkuð mismunandi viðnámsskipan. Lína 11 sem liggur fyrir sunnan Tjarnarhnúk sýnir sömu viðnámsskipan og lína 9, lágviðnám til yfirborðs og grunnt á háviðnám undir. Lína 10 sem liggur yfir Tjarnarhnúk sýnir efrimörk lágviðnámskápunnar nokkuð lárétt um 250-300 m yfir sjó austur undir Tjarnarhnúk en þar grynncar nokkuð á hana við norðanverða Álftatjörn. Þykkt lágviðnámskápunnar og þar með dýpið á hátt viðnám undir lágu eykst snögglega þegar kemur austurundir Tjarnarhnúk. Undir og austan við Tjarnarhnúk kemur fram 150-200 m þykkt lag með nokkuð lágu viðnámi (5–10 Ω m) neðan lágviðnámsins og síðan verulega hærra þar fyrir neðan. Sams konar lag sést austast í línu 6 norðvestur af Hverakjálka. Ekki er ljóst hvernig túlka beri þetta meðallága viðnám neðan lágviðnámskápunnar en trúlega endurspeglar það heldur lægri hita og/eða minni ummyndun en þar sem viðnám hækkar verulega neðan lágviðnámsins.

6.2 Jafnviðnámskort

Á myndum 14 til 18 eru sýnd jafnviðnámskort á mismunandi dýpi á mælisvæðinu. Kortin sýna viðnám 250 og 100 m ofan sjávarmáls og 50, 200 og 250 m neðan sjávarmáls. Viðnámskortin eru auk TEM-mælinganna frá 1991 og 1992 byggð á niðurstöðum viðnámsmælinganna á Nesjavöllum, bæði jafnstraums- og TEM-mælinga. Auk þess eru eldri Schlumbergermælingar kringum Skarðsmýrarfjall og norðaustan við Katlatjarnir notaðar á kortum sem sýna viðnám ofan 100 m neðan sjávarmáls. Jafnviðnámskortin byggja að sjálfsögðu á viðnáms-sniðunum en þau eru þó dregin öðruvísi að því leyti að þar sem mikil breyting er milli viðnámslaga í sniðunum er á viðnámskortunum gert ráð fyrir því að viðnámsbreytingin sé samfelld og þéttum jafnvið-

námsslínum skotið inn á milli þar sem viðnámsbreytingin er mikil. Hér á eftir verður rætt stuttlega um jafnviðnámskortin.

Mynd 14 sýnir viðnám 250 m ofan sjávarmáls. Fram kemur samfellt lágt viðnám ($< 5 \Omega$) frá Hengli og austsuðaustur um Ölkelduháls og austur fyrir Tjarnarhnúk og Klambragil, eins langt og mælingar ná. Eflaust heldur þetta lága viðnám áfram til suðausturs í jarðhitakerfið í Grensdalseldstöðinni. Lágviðnámstunga teygir sig til norðurs frá Hengli í áttina að Nesjavalladal. Til norðausturs hækkar viðnámið mjög ört og í Þverárdal og vestur undir Sandkletta kemur fram áberandi háviðnámstunga sem gengur suður í lágviðnámið. Undir austanverðu Skarðsmýrarfjalli er nokkuð lágt viðnám, $5-10 \Omega$, og athyglisvert er að tunga með viðnám á þessu bili teygir sig norður eftir Bitru, norður að Brúnkollublettum. Á Ölkelduhálsi, milli Ölkelduhnúks og Tjarnarhnúks er farið að sjá í verulega hærra viðnám neðan lágviðnáms og vestan við Kyllisfellið er einnig farin að sjást nokkur viðnámsþækkun neðan lágviðnáms.

Mynd 15 sýnir viðnám 100 m ofan sjávarmáls. Lágviðnám, $< 5 \Omega$, er á þessu dýpi farið að teygja sig niður í Nesjavalladalinn norðaustur frá Hengli. Á sunnanverðri Bitru er viðnámið orðið á bilinu $5-10 \Omega$ og á norðaustur hluta mælisvæðisins nær meðallágt viðnám töluvert norðar en 250 m ofan sjávarmáls. Mesta breytingin er þó sú að 100 m ofan sjávarmáls kemur fram verulega hærra viðnám neðan lágviðnáms samfellt frá Hengli og til austsuðausturs, austur fyrir Ölkelduhnúk.

Mynd 16 sýnir viðnám 50 m neðan sjávarmáls. Hún sýnir í megindrátum svipaða mynd og 100 m ofan sjávarmáls. Helstu breytingarnar eru að lágviðnámstungan á Nesjallasvæði hefur teygt sig lengra til norðurs og farið er að koma fram hærra viðnám neðan lágviðnámsins norðan í Hengli. Sunnan við Skarðsmýrarfjall er viðnámið orðið lægra en 5Ω , en á þeim slóðum er ekki lengur stuðst við eldri Schlumbergermælingar vegna þess að hér er komið að neðri mörkum dýptarskynjunar þeirra (en þær sýna lækkanði viðnám með dýpi). Syðst á Bitrunni, suðvestur af Hverakjálka, er viðnám orðið lægra en 5Ω . Á þessu dýpi nær hærra viðnám neðan lágviðnáms lengra til suðurs en 100 m ofan sjávarmáls, einkum á austanverðri Bitru. Við Tjarnarhnúk og Kyllisfell teygir hátt viðnám neðan lágviðnáms sig einnig lengra til norðurs.

Mynd 17 sýnir viðnám 200 m neðan sjávarmáls. Á þessu dýpi er farið að koma fram hátt viðnám neðan lágviðnáms suðaustan við Skarðsmýrarfjall. Eins kemur nú fram afgerandi hátt viðnám suður eftir Bitrunni eins langt og mælingarnar ná. Athyglisvert er að þar kemur fram tunga með áberandi hærra viðnámi en bæði austan og vestan við. Það er ennfremur athyglisvert að um og suðaustan við Litla-Skarðsmýrarfjall kemur ekki fram hátt viðnám neðan lágviðnáms og á því svæði finnst ekki lægra viðnám en 5Ω . Til norðurs hefur lágviðnámssvæðið á Nesjallasvæði breytt nokkuð úr sér og og hækkandi viðnám neðan lágviðnáms er orðið nokkuð útbreytt norðan Hengils.

Mynd 18 sýnir viðnám 350 m neðan sjávarmáls. Á suðurhluta mælisvæðisins er viðnámsdreifingin á þessu dýpi mjög svipuð og á 200 m neðan sjávarmáls. Á norðurhlutanum er hátt viðnám neðan lágviðnáms farið að teygja sig vel norður undir Nesjavalladal. Ennfremur er viðnámið á norðausturhluta svæðisins, norðan við Hrómundartind og Krossfjöll farið að lækka og orðið á bilinu $10-25 \Omega$. Norður við Nesjavelli er á þessu dýpi tunga með nokkuð eindregna norðursuður stefnu þar sem fram kemur lágt viðnám eða hátt viðnám undir lágu. Athyglisvert er að þessi tunga stenst nokkurn veginn á við verulega hátt viðnám neðan lágviðnáms sem teygir sig suður eftir Bitrunni. Rannsóknir á höggun á Nesjallasvæði, byggðar á nákvæmri skoðun svarfs úr borholum (Hjalti Franzson 1988) hafa sýnt að á þessu dýpi fellur austurhluti lágvið-

námssvæðisins á Nesjavöllum saman við misgengi sem hafa norður-suður stefnu. Viðnámsdreifingin 350 m neðan sjávarmáls vekur óneitanlega þá spurningu hvort á þessu dýpi megi sjá þess merki að þessi misgengi nái til suðurs undir austanverðum Hengli og suður undir Bitrunni og stjórn rennsli jarðhitavökva. Að þessum möguleika verður vikið síðar.

6.3 Efri mörk lágviðnámskápu

Mynd 19 sýnir efri mörk lágviðnámskápu í metrum yfir sjó. Samkvæmt þeirri fylgni sem fundist hefur milli viðnáms og ummyndunar og rakin er í kafla 5, þá sýnir þetta kort efri mörk leirsteindabeltisins. Á myndinni sést að leirumyndun nær hæst undir Hengli, upp fyrir 500 m yfir sjó. Jarðhitinn á Nesjavallasvæði kemur fram sem skýr hryggur norðaustur úr Hengli undir Nesjavalladal. Norðvestur mörk jarðhitans á Nesjavöllum eru mjög skörp niður á það dýpi sem mælingarnar skynja en austurmörkin eru meira aflíðandi. Austur frá Hengli mynda efri mörk lágviðnámskápu hrygg austur á Ölkelduháls, en þar kemur einnig fram staðbundið hámark þar sem jarðhitavirknin er mest á yfirborði. Norðaustan við þetta hámark kemur einnig fram staðbundið hámark undir Lakaskörðum og sunnan við Katlatjarnir. Til norðausturs undir Þverárdal dýpkar nokkuð ört á lágviðnámið, en til norðurs frá Lakaskörðum dýpkar mjög ört á það.

Til suðurs dýpkar mun hægar á lágviðnámið, einkum suður eftir Bitrunni, þar til kemur að suðurmörkum mælisvæðisins (ath. að auk jafnhæðarlína í heilum hundruðum metra hefur verið dregin 250 m jafnhæðarlína). Þar virðist dýpið fara að aukast nokkuð ört einkum sunnan undir Skarðsmýrarfjalli. Ástæða þess að hægar dýpkar á lágviðnámið til suðurs frá Hengli og Ölkelduhálsi en til norðurs er vafalítið sú að grunnvatnsstreymi og þar með afrennsli jarðhitavökva, er í meginráttum frá norðaustri til suðvesturs eftir ríkjandi sprungustefnu.

6.4 Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms

Mynd 20 sýnir efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms í metrum yfir sjávarmáli. Þessi mynd sýnir mjög svipaða drætti og mynd 19 því þykkt lágviðnámskápu er víðast á milli 100 og 200 m. Jarðhitakerfið á Nesjavöllum kemur fram sem áberandi hryggur og austur frá Hengli er hryggur yfir í staðbundið hámark undir Ölkelduhálsi. Þessi hryggur fellur saman við hrygg í efri mörkum lágviðnámskápu og gæti bent til þess að þarna séu uppstreymi jarðhitavökva eftir brotum með VNV-ASA-læga stefnu. Lágviðnámskápan þykkar nokkuð bæði til norðurs og suðurs frá þessum hrygg þannig að dýpið á háviðnámið vex nokkuð örar en dýpið á lágviðnámskápu. Þó er eins og áður að dýpið vex hægar til suðurs en norðurs.

Eins og um er rætt í kafla 5 er hækkandi viðnám undir lágviðnámi að jafnaði talið endurspeglar breytingu í ríkjandi ummyndunarsteindum, það er að segja að leirsteindir séu að þróast yfir í blandlagsleir og klórít. Ef um er að ræða lárétt afrennsli jarðhitavatns frá jarðhitakerfinu má hins vegar ekki túlka hátt viðnám neðan lágviðnáms í blindni á þennan hátt. Eins og nefnt var hér að framan má búast við því að jarðhitakerfin undir Hengli og Ölkelduhálsi hafi afrennsli til suðurs með megingrunnvatnsstreymi á svæðinu. Ef um er að ræða afrennsli jarðhitavatns til suðurs eftir láréttum lögum má búast við viðsnúnum hitaferlum með dýpi svipað og í Hveragerði þannig að neðan afrennislaga fari hitastig og ummyndunarstig lækkandi með dýpi. Við slíkar aðstæður mundi viðnám einnig fara hækkandi er kemur niður úr afrennislögum. Af þessum sökum er ekki hægt að slá því föstu að hátt viðnám neðan lágviðnáms endurspeglar klórít ummyndun á syðri hluta mælisvæðisins.

Á norðurhluta mælisvæðisins, sem er ástreymis við grunnvatnsstreymið, má hins vegar gera ráð fyrir að hækkandi viðnám neðan lágviðnámskápunnar þýði að klórít sé að verða ráðandi ummyndunarsteind. Af því má þó ekki endilega draga þá ályktun að hitastig sé komið um eða yfir 240 °C. Undir Ölkelduhálsi og norðanverðri Bitru er grunnt á háaviðnámið, víða á bilinu 100-200 m. Ef hitastig er um eða yfir 240 °C á minnna dýpi en 350-400 m er jarðhitakerfið annaðhvort sjóðandi eða með yfirþrýstingi. Hvorugan möguleikann er hægt að útiloka en slíkt verður þó að teljast ólíklegt. Öllu líklegra er að efri mörk háviðnámsins sýni klórít ummyndun sem varð við aðstæður þar sem hiti og þrýstingur var hærri en nú er til dæmis á eða í lok Ísaldar.

6.5 Viðnám í lágviðnámskápu

Mynd 21 sýnir lægsta viðnámsgildi sem fram kom í lágviðnámskápunni í hverri mælingu. Þar sést að í lágviðnámskápunni er viðnámið lægra en 3 Ωm á nokkuð stóru svæði norðaustan við Hengil og í mjórri rennu norðaustur undir Nesjavalladal, en hækkar til beggja handa. Á þessu svæði byggir myndin á viðnámslíkönum mæli lína á Nesjavöllum. Gögn að baki jafnvíðnámslína eru því meiri en fram kemur á myndinni, en þar eru einungis sýnd gildi sem fengin eru með TEM-mælingum. Viðnámið í kápunni er einnig lægra en 3 Ωm til austurs frá Hengli og austur yfir Ölkelduháls milli Klambragils og Katlatjarna. Ennfremur til suðausturs frá Hengli, um Fremstadal og suðaustur eftir Bitrunni.

Viðnámið í lágviðnámskápunni er frekar hátt (> 5 Ωm) undir Þverárdal og Krossfjöllum. Það er ennfremur nokkuð hátt (> 3 Ωm) undir suðvesturhluta mælisvæðisins, sunnan við Fremstadal og undir suðvesturhorni Bitrunnar þar sem það fer yfir 5 Ωm. Frá Brúnkollublettum og til suðausturs að Hverakjálka gengur tunga þar sem viðnámið í kápunni er herra en 3 Ωm og er orðið herra en 5 Ωm sunnan við Hverakjálka. Eftir miðri Bitrunni er viðnám kápunnar mjög lágt eins langt til suður og mælingar ná en undir þessu lága viðnámi kemur fram afgerandi háviðnám suður eftir Bitrunni (sjá myndir 17 og 18).

Í lágviðnámskápunni eru leirsteindir og zeolítar ríkjandi ummyndunarsteindir og góð leiðni er talin stafa af leiðni leirsteindanna. Viðnámið í leirsteindabeltinu lækkar með vaxandi poruhluta, hitastigi og magni ummyndunar. Ef ummyndun og holufylling fer að verða það mikil að poruhluti minnki verulega getur viðnámið að vísu farið hækkandi. Út frá viðnáminu einu saman er ekki hægt að ákvarða þá þrjá eðlisþætti sem taldir eru hér að ofan og hafa áhrif á viðnámið. Þeir eru heldur ekki óháðir hver öðrum því að magn ummyndunar vex t.d. með hækkandi hitastigi og poruhluta.

Til þess að reyna að meta þessa eðlisþætti verður að gefa sér einhverjar forsendur til að einfalda málið. Ein slík gæti t.d. verið að gera ráð fyrir því að poruhlutinn sé nokkurnveginn sá sami allstaðar. Ef það er gert má gera ráð fyrir því að þar sem viðnám lágviðnámskápunnar er lægra 3 Ωm sé ummyndun mikil og hitastig hátt (á bilinu 100-230 °C). Þar sem viðnám lágviðnámskápunnar er herra er annað hvort lægra hitastig eða minni ummyndun, nema hvort tveggja sé. Ef gert er ráð fyrir að hitastigið sé ekki lægra hlýtur ummyndunin að vera minni. Ef hitastig, poruhluti og efnafræðilegir eiginleikar jarðhitavatnsins eru þeir sömu hlýtur minni ummyndun að stafa af því að bergið hefur hitnað nýlega og ekki haft tíma til að ummyndast nema að litlu leyti. Slíkt verður að teljast frekar ólíklegt á Hengilssvæðinu þar sem jarðhitavirknin hefur varað í þúsundir ára. Samkvæmt þessari röksemdafærslu er eðlilegast, miðað við nokkuð fastan poruhluta, að gera ráð fyrir því að hlutfallslega há viðnámsgildi í lágviðnámskápunni endurspegli lægra hitastig og ef til vill minni ummyndun. Ummyndunin þarf þó ekki að vera minni

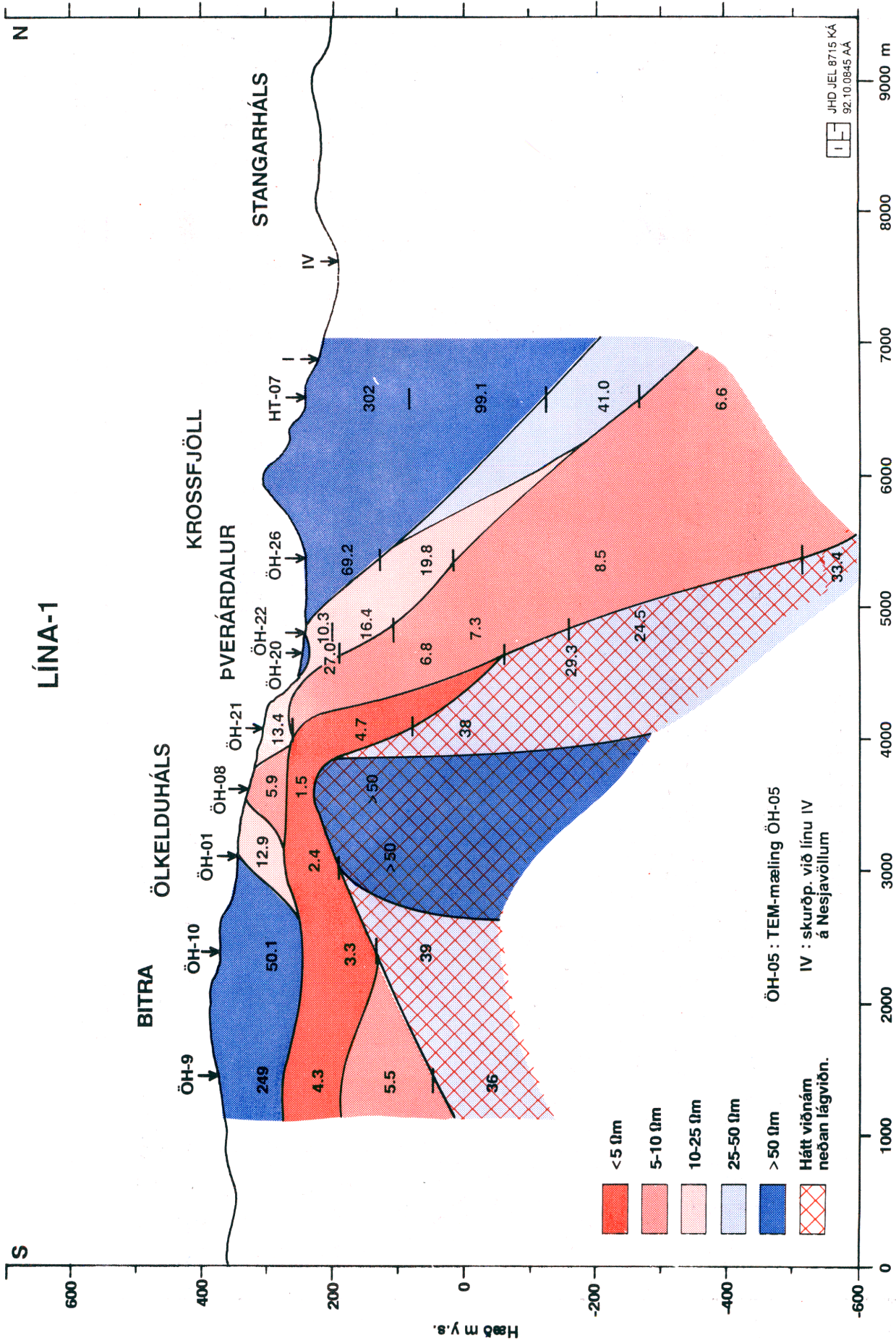
Því kæling eftir að ummyndun hefur átt sér stað gæti nægt til að skýra hækkandi viðnám.

Ef á hinn bóginn er gert ráð fyrir því að hækkandi viðnám í lágviðnámskápunni sé að verulegu leyti vegna minni poruhluta og þar með lektar er líklegt að hitastigið sé jafnframt lægra. Ef poruhluti og lekt eru lítil er tilfærsla varma með jarðhitavatni lítil og kæling vegna leiðni fer að hafa meiri áhrif. Samkvæmt þessum vangaveltum virðist nokkuð ljóst að hækkandi viðnám í lágviðnámskápunni þýði lægri hita, en jafnframt því gæti verið um minni ummyndun og poruhluta að ræða.

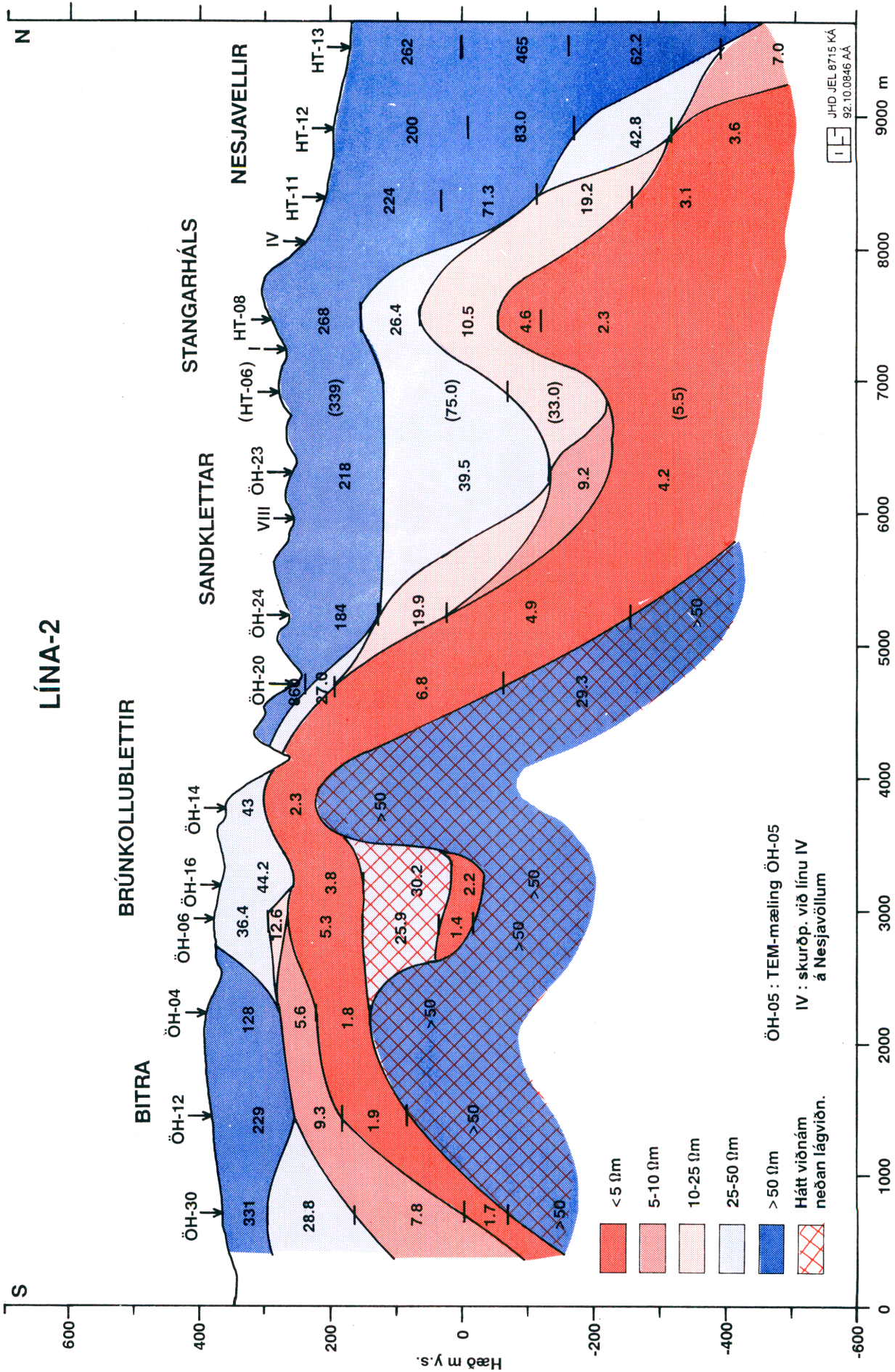
6.6 Staðbundið lágviðnám innan háviðnáms

Eins og fram kom í kafla 6.1 sýna viðnámsmælingarnar að innan háviðnámsins neðan lágviðnámskápunnar er staðbundið lágviðnámslag undir og vestur af Brúnkollublettum (sjá myndir 4, 5 og 10). Þetta lágviðnámslag er u.þ.b. við sjávarmál og með viðnám um eða innan við 2.5 Ω m og þykkt um 50 m. Lagið kemur fram í þremur mælingum, ÖH-6, 11 og 16, og er útbreiðsla þess sýnd á mynd 22. Þess ber þó að geta að þegar um er að ræða lágviðnámssvæði með svona takmarkaða útbreiðslu getur verið varhugavert að taka einvíða túlkun TEM-mælinganna of bókstaflega. Vera má að lögun lágviðnámsins sé nokkuð önnur en túlkunin gefur til kynna. Það er t.d. hugsanlegt að ekki sé um að ræða lágviðnámslag aðskilið frá lágviðnámskápunni heldur lóðrétt lágviðnámsrás niður úr lágviðnámskápunni. Til þess að fá hugmynd um mögulega lögun lágviðnámssvæðisins þyrfti að gera þrívíða líkanreikninga. Hver svo sem lögun lágviðnámssvæðisins er fer ekki milli mála að á þessu svæði nær lágt viðnám verulega dýpra en umhverfis.

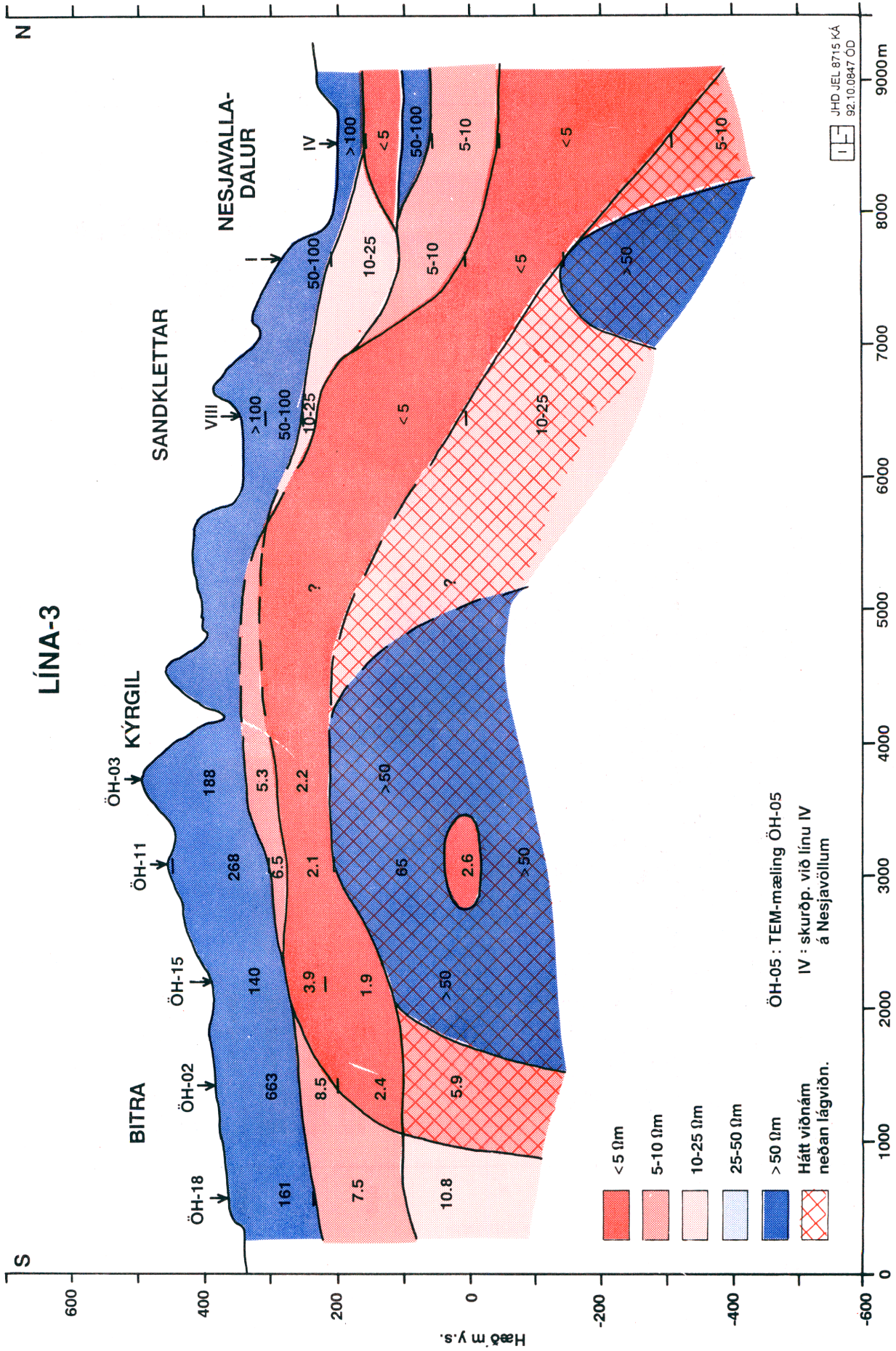
Samkvæmt þeirri túlkun á sambandi eðlisviðnáms og ummyndunar sem sett er fram í kafla 5 þýðir lágt viðnám (lægra en 5–10 Ω m) að leirsteindir séu ráðandi þáttur í ummyndun en hátt viðnám neðan lágviðnáms að leirsteindir hafi þróast yfir í klórít og hitastig sé um eða yfir 240 °C ef ummyndun er í jafnvægi við hitastig. Svona staðbundið lágviðnám innan háviðnámsins hlýtur því að þýða að leirsteindir séu til staðar í miklum mæli og ef ummyndun er í jafnvægi við hita staðbundið lægra hitastig. Nærtækasta skýringin á lægra hitastigi á þessum slóðum er að þarna sé staðbundið niðurstreymi eða blöndun jarðhitavatns við kalt grunnvatn.



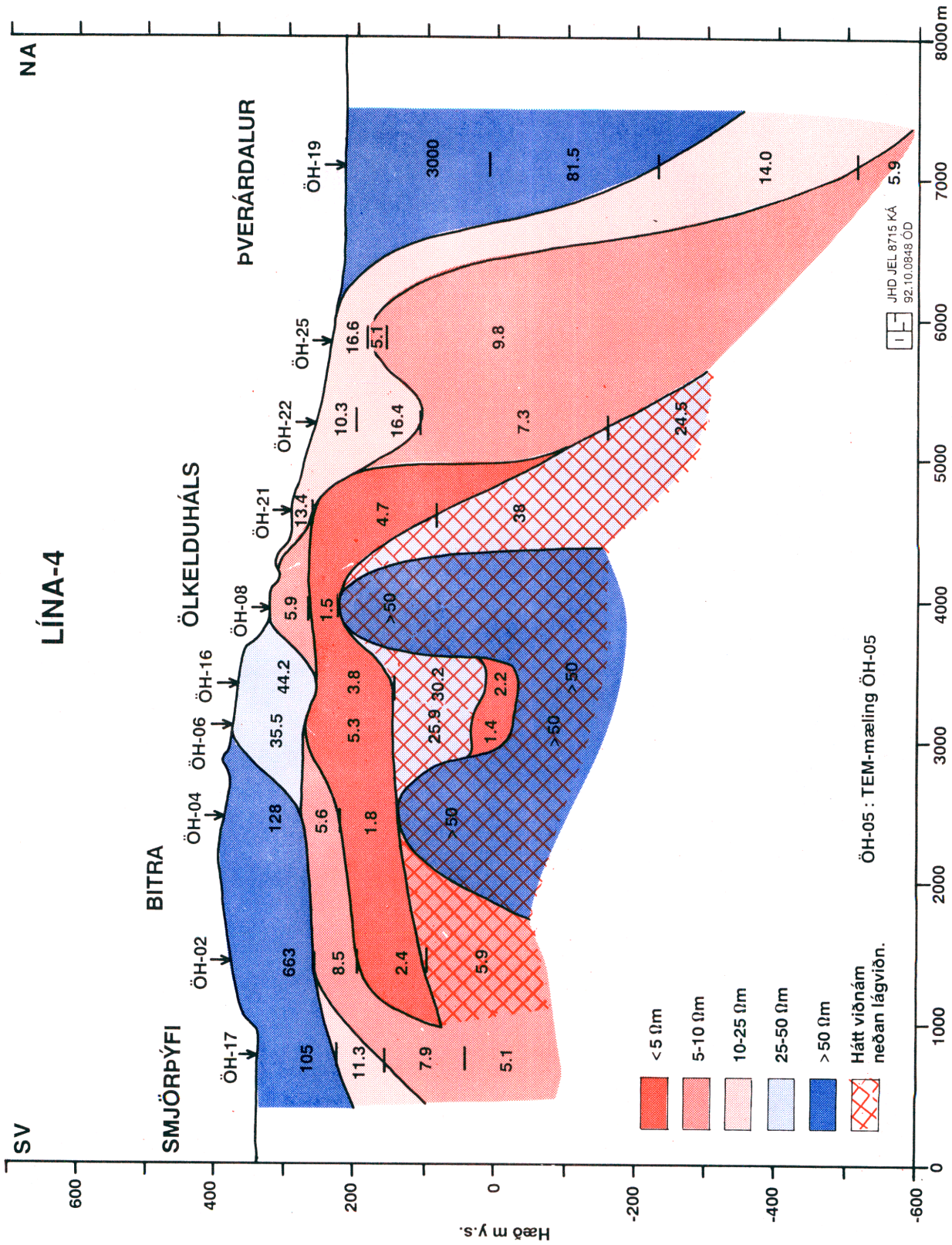
Mynd 3: Viðnámsnið eftir línu 1.



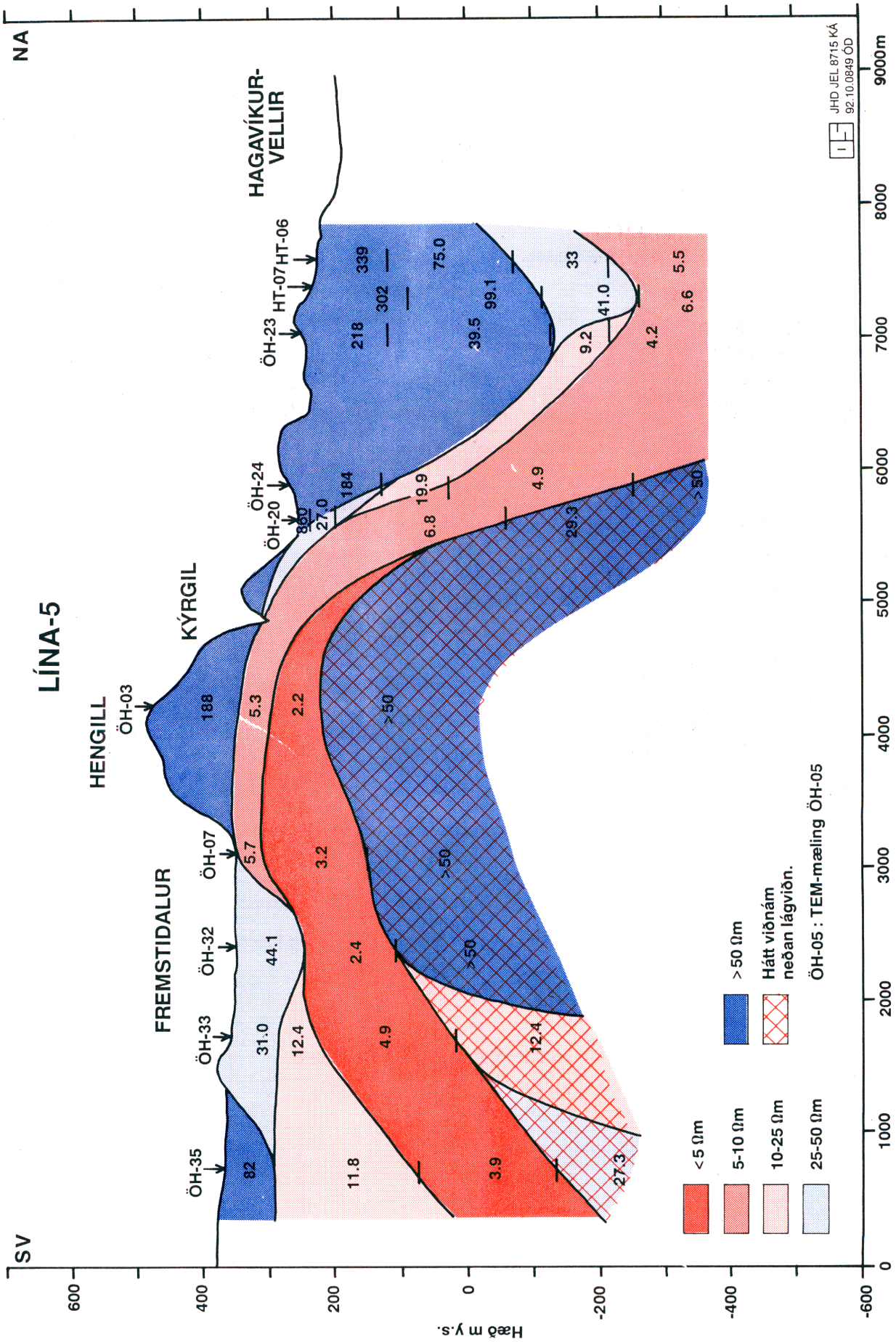
Mynd 4: Viðnámssnið eftir línu 2.



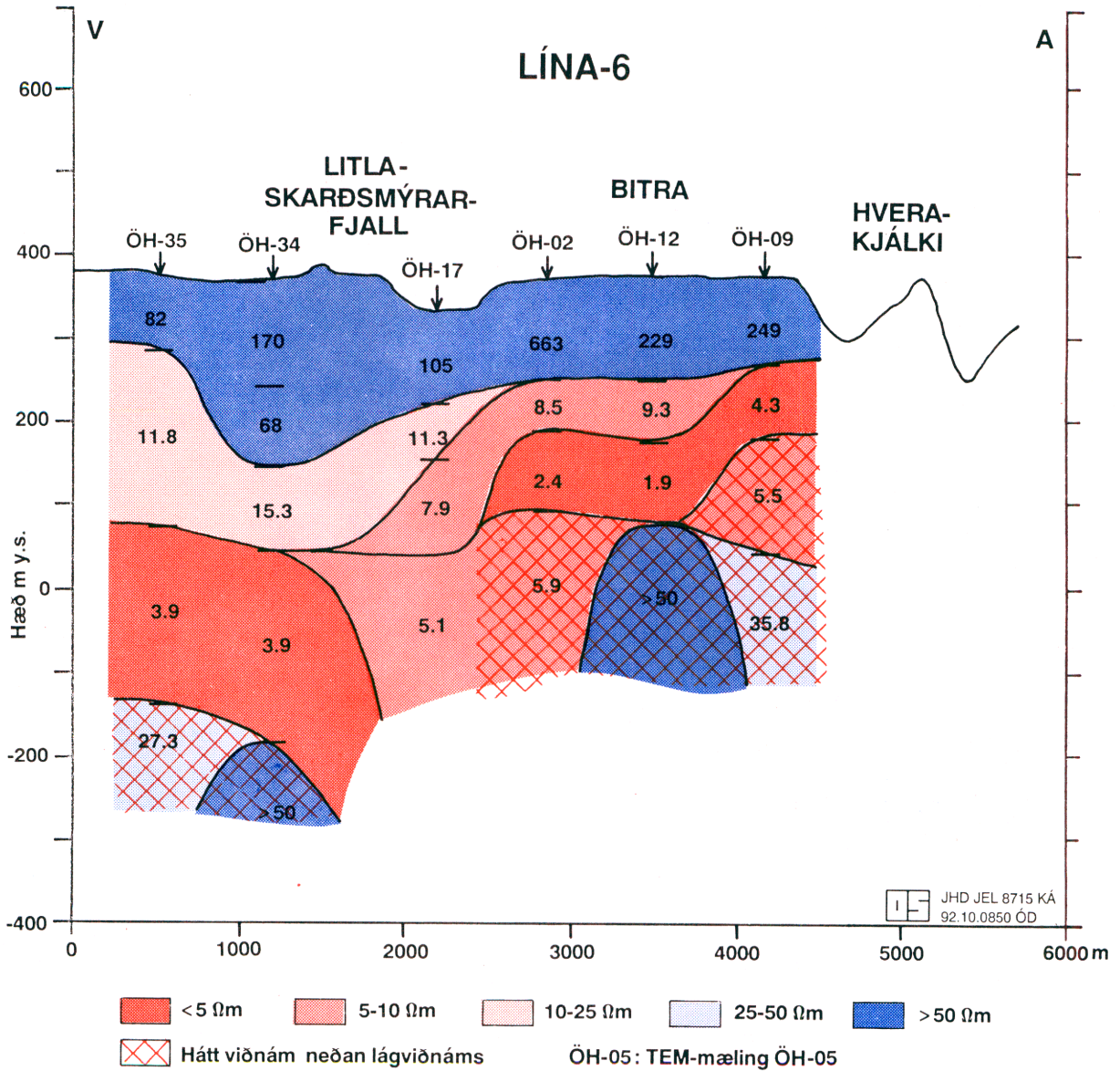
Mynd 5: Viðnámssnið eftir línu 3.



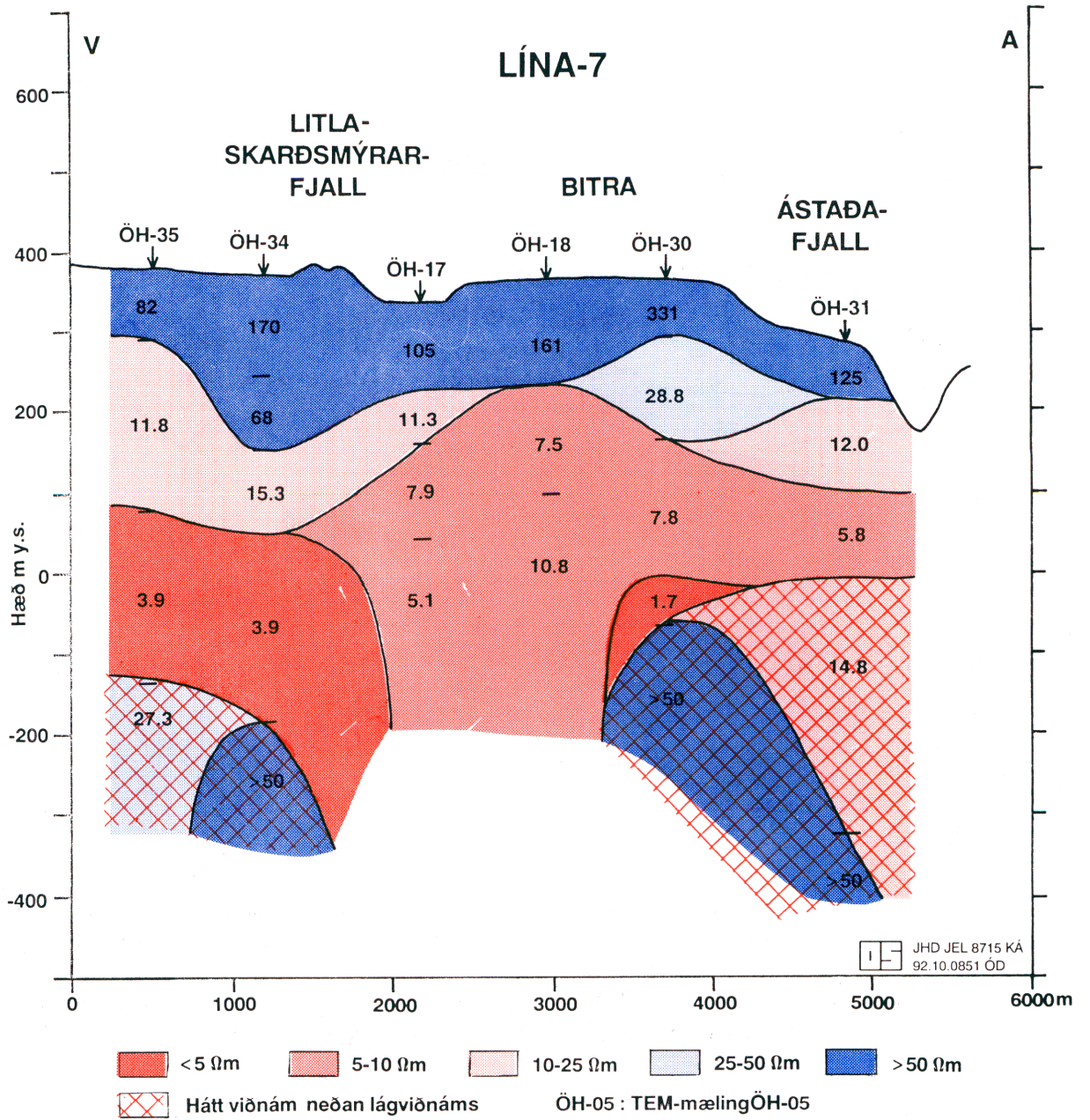
Mynd 6: Viðnámssnið eftir línu 4.



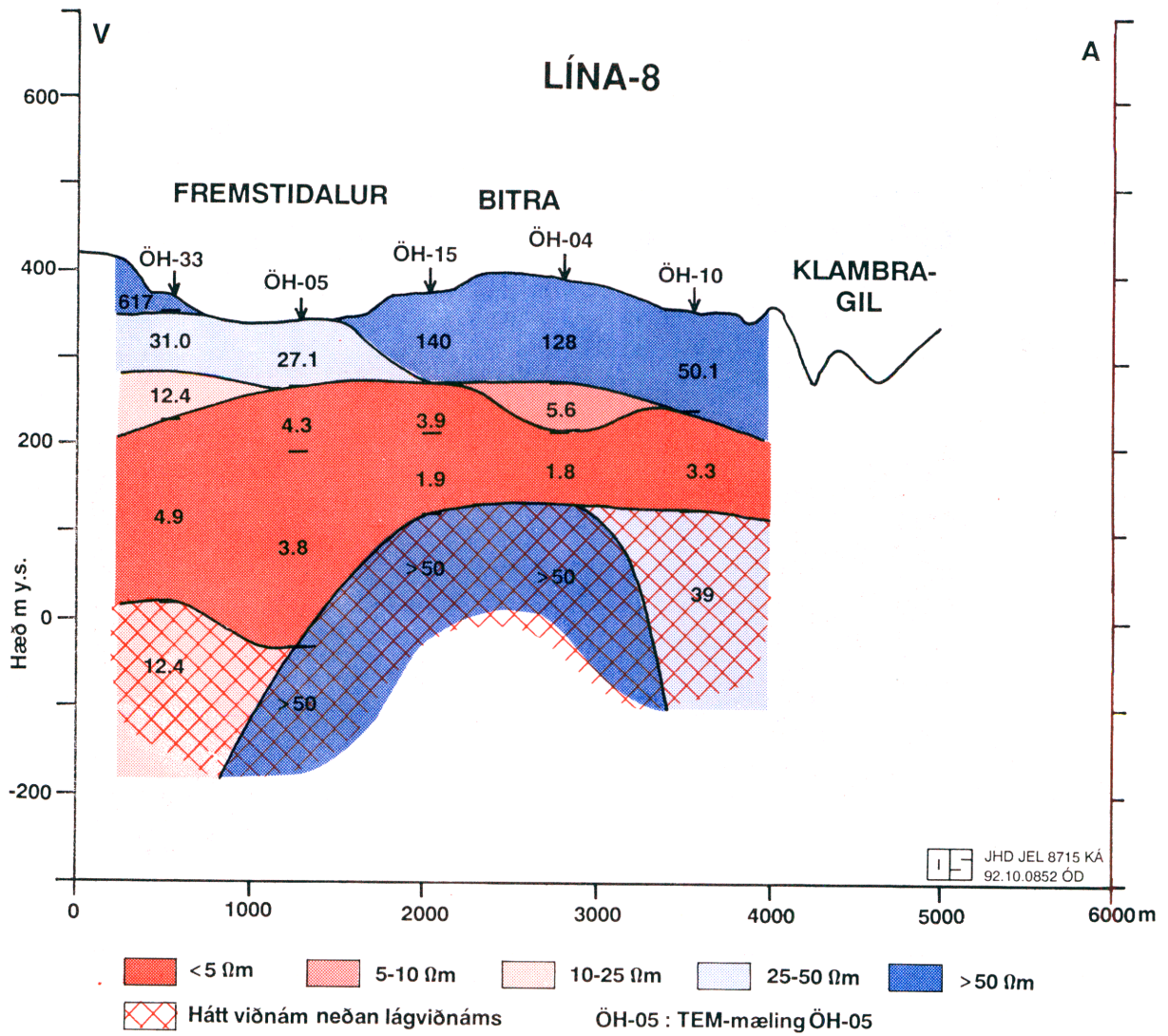
Mynd 7: Viðnámssnið eftir línu 5.



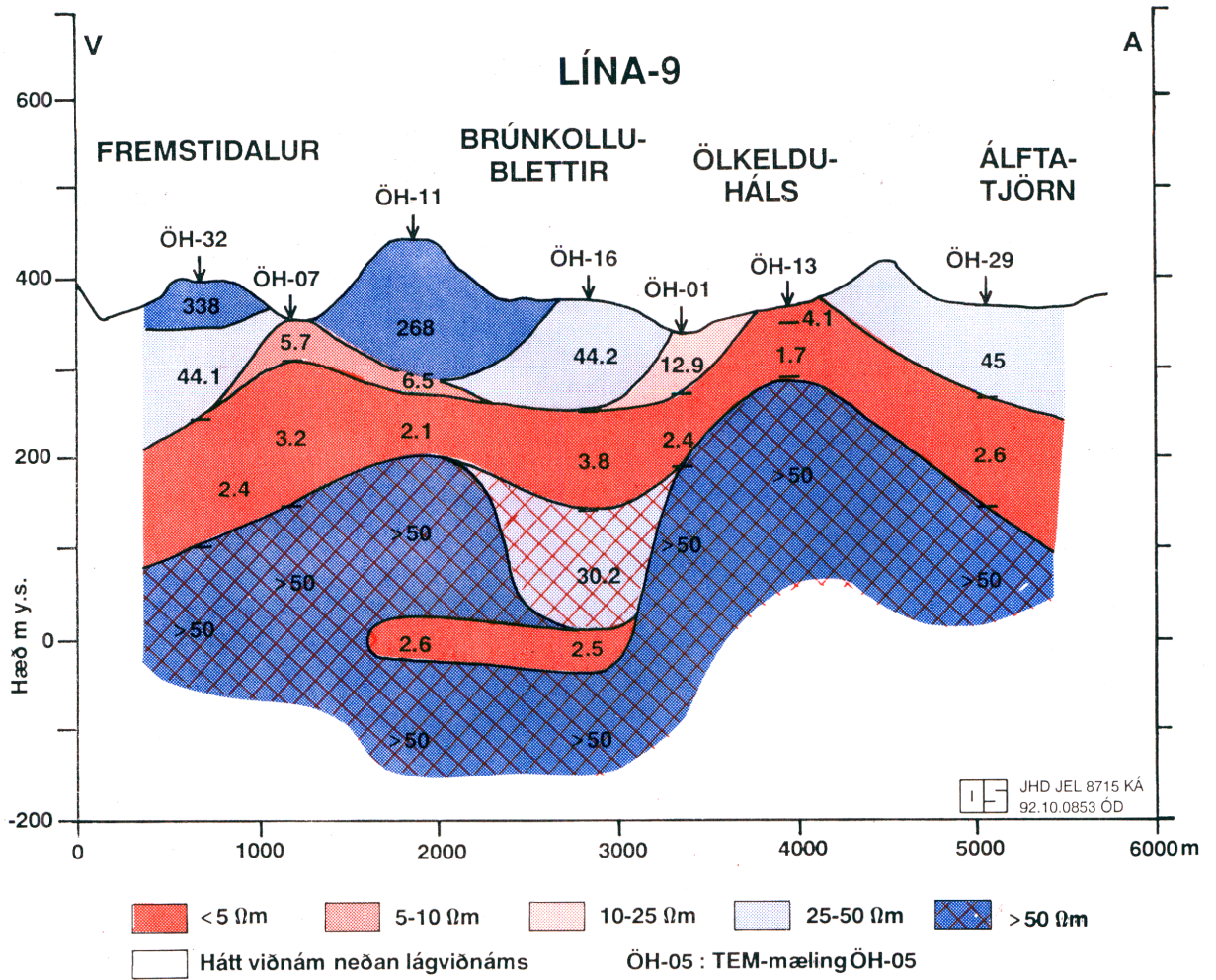
Mynd 8: Viðnámssnið eftir línu 6.



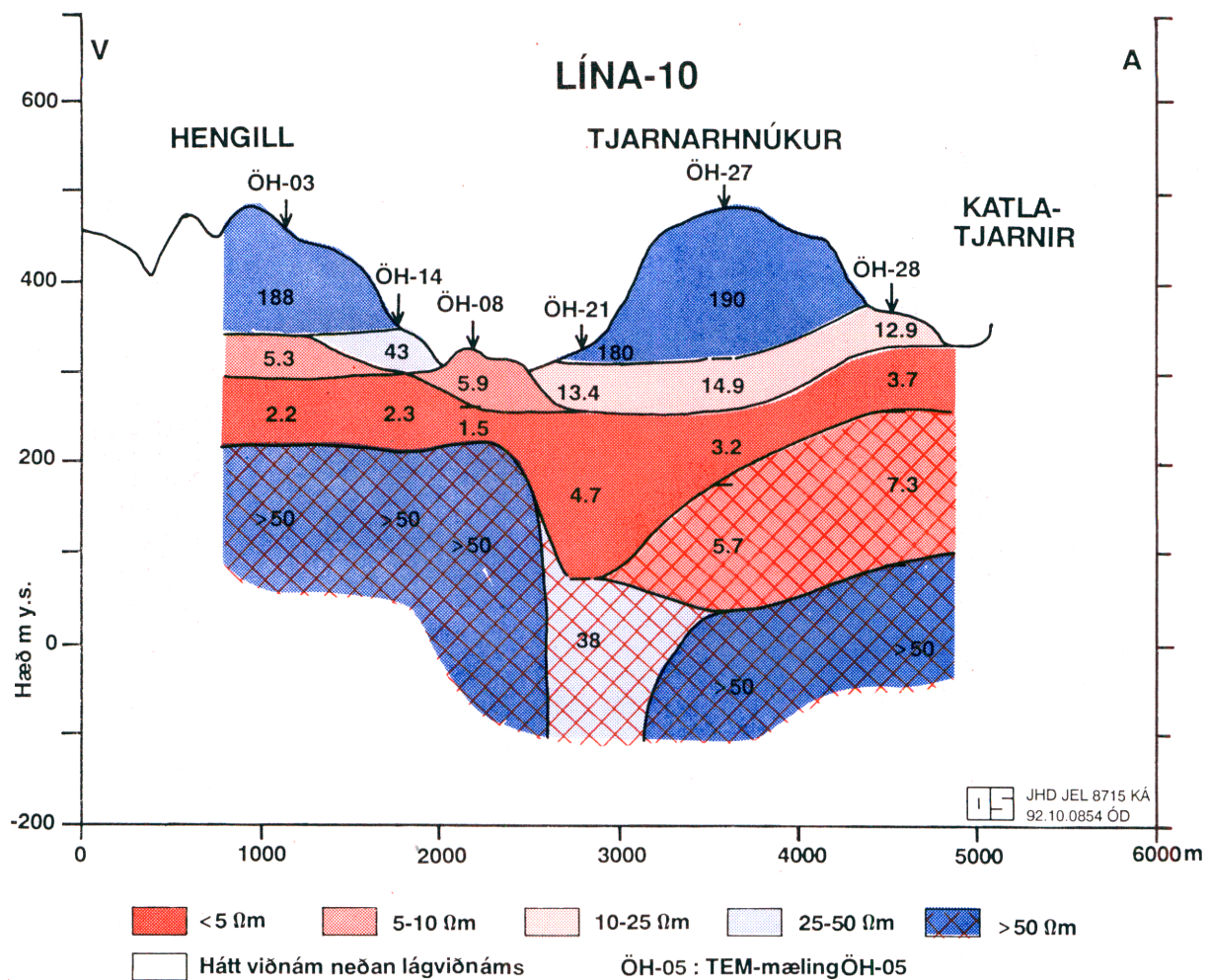
Mynd 9: Viðnámssnið eftir línu 7.



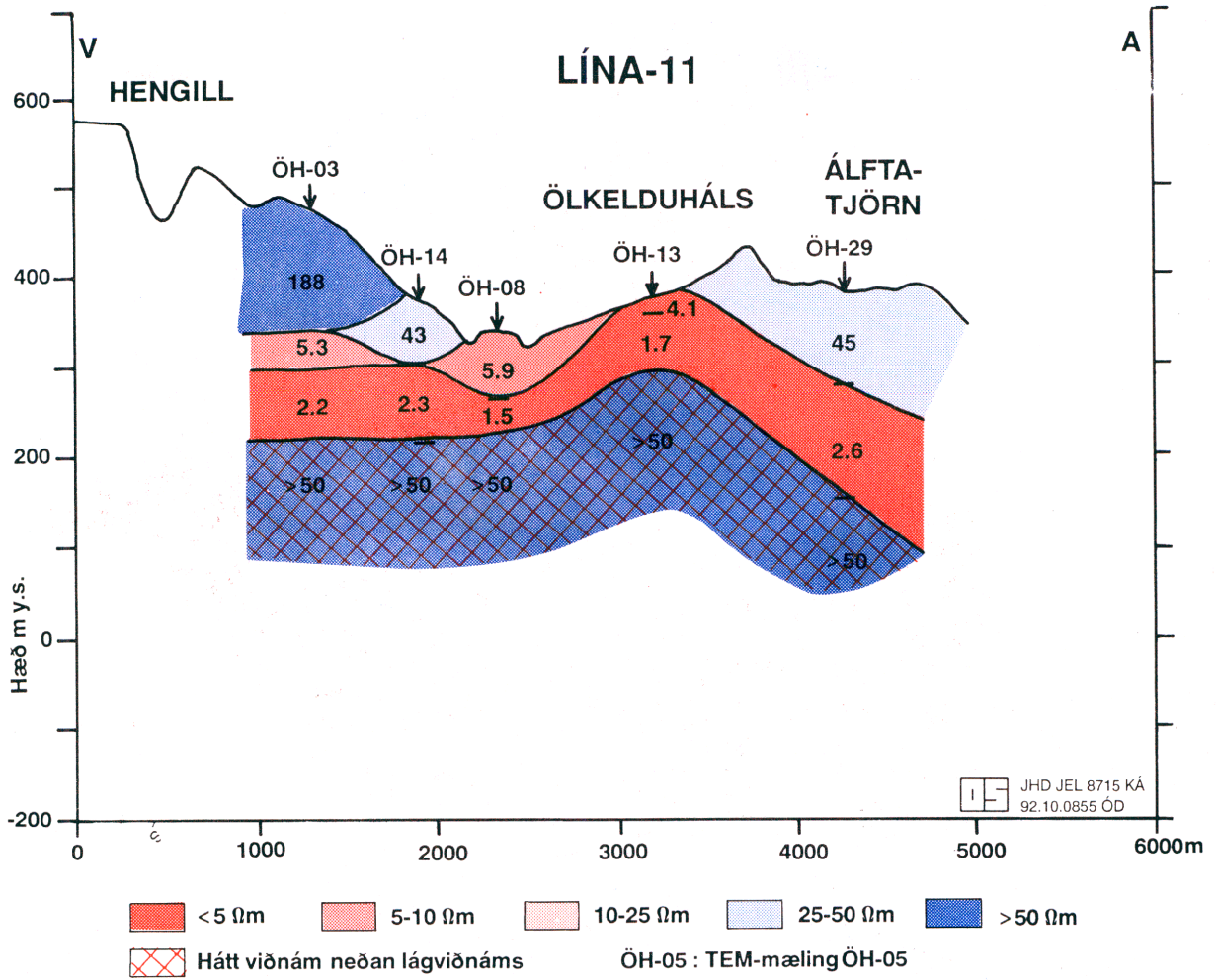
Mynd 10: Viðnámssnið eftir línu 8.



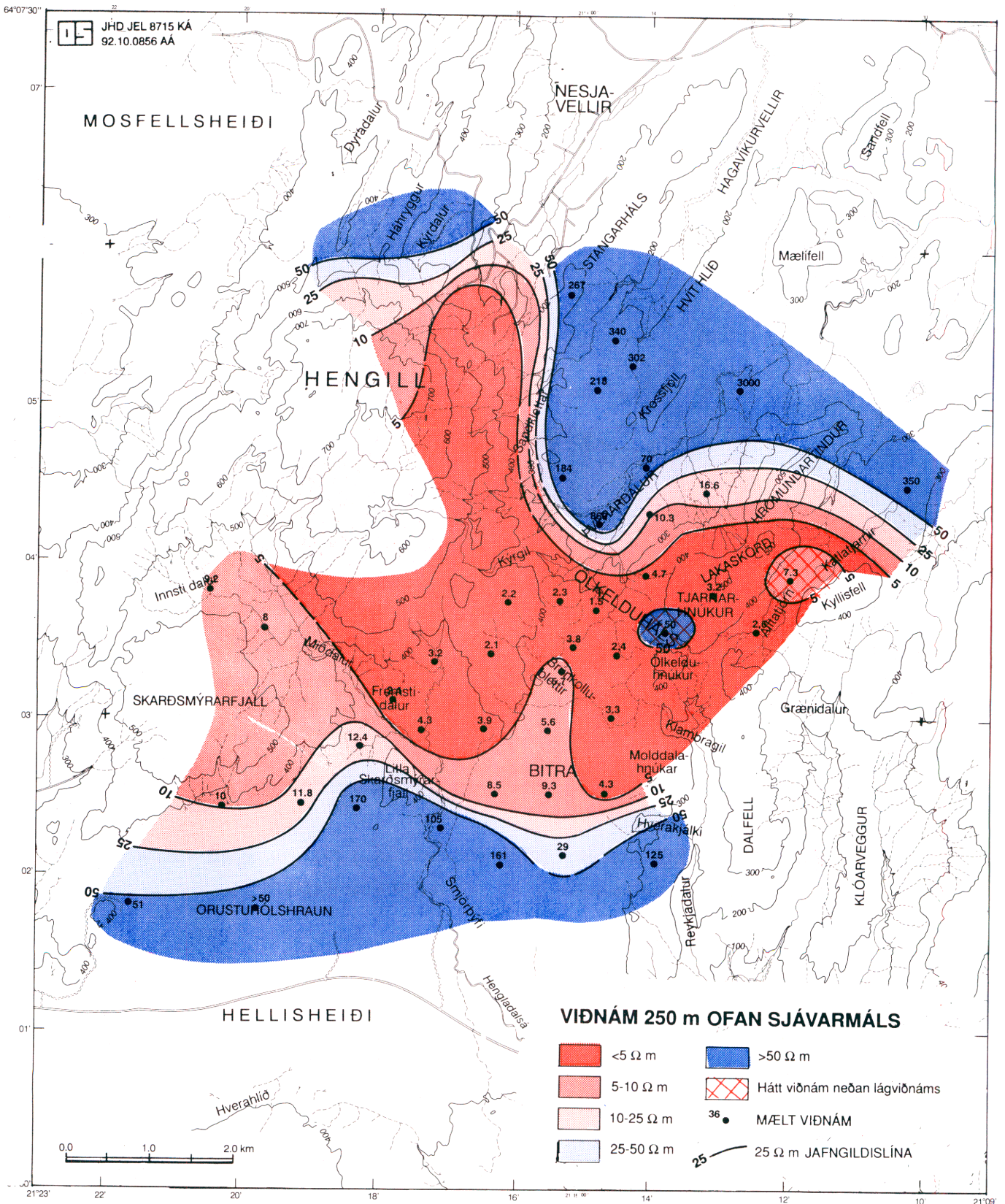
Mynd 11: Viðnámssnið eftir línu 9.



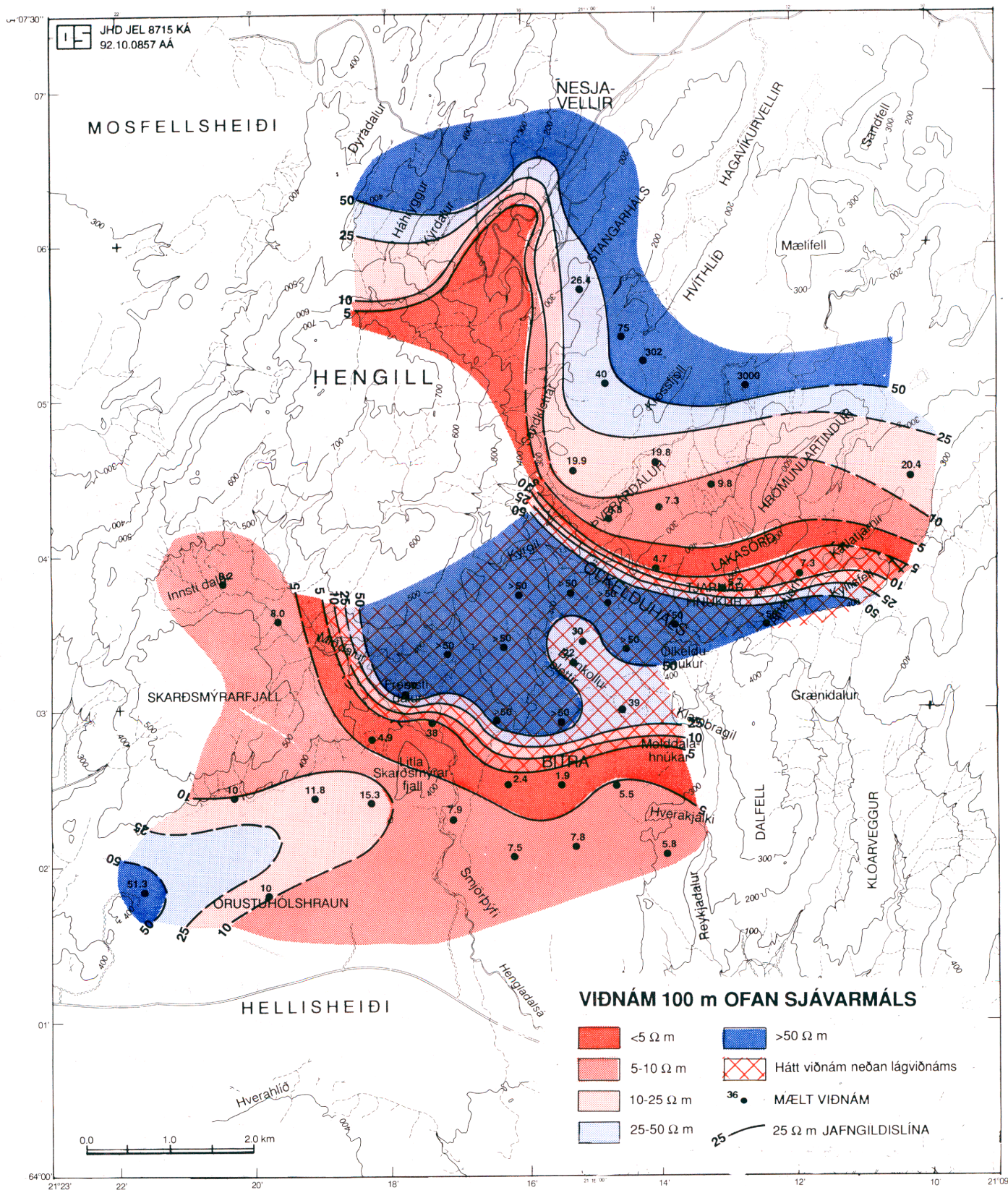
Mynd 12: Viðnámssnið eftir línu 10.



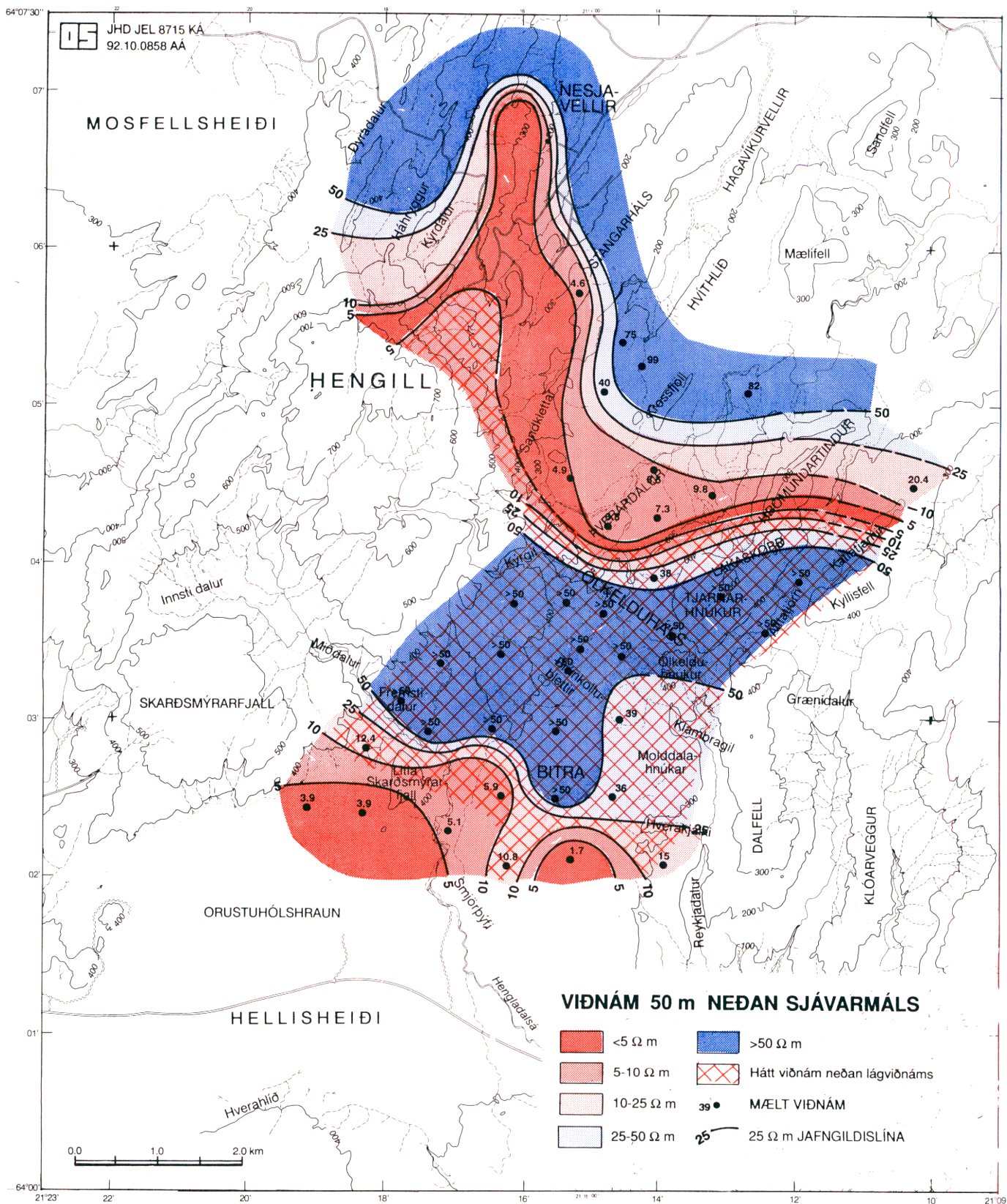
Mynd 13: Viðnámsnið eftir línu 11.



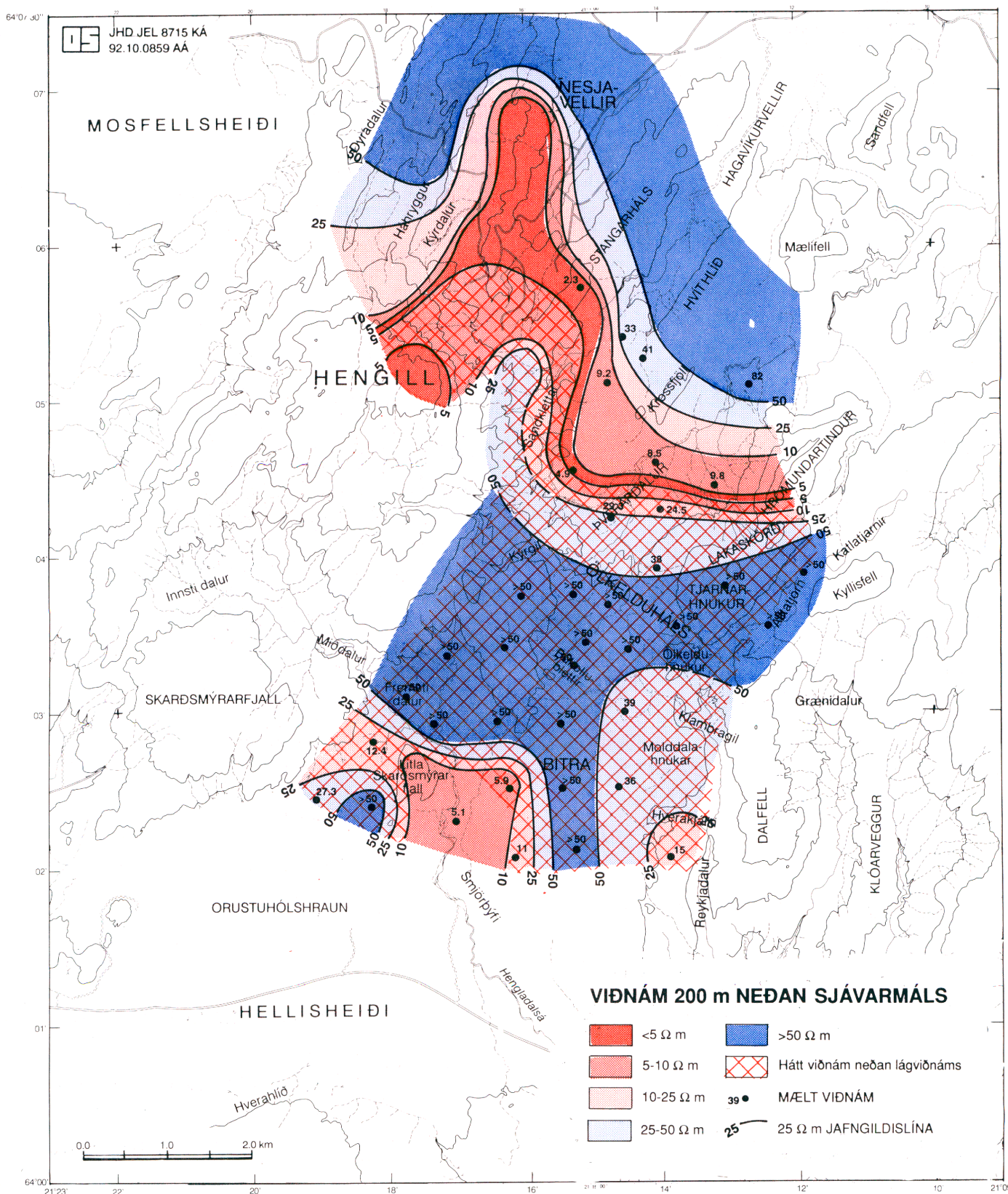
Mynd 14: Viðnám 250 m ofan sjávarmáls.



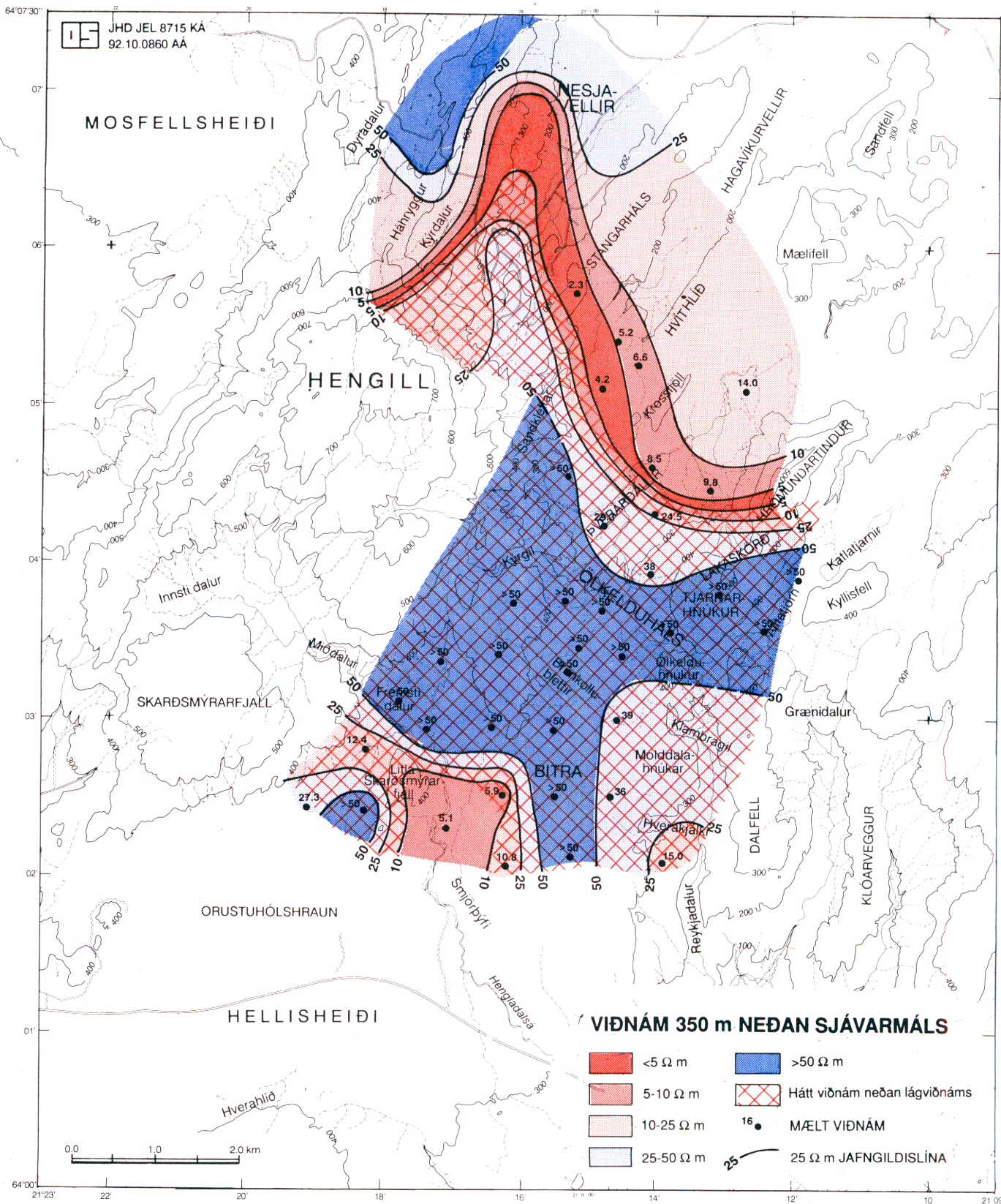
Mynd 15: Viðnám 100 m ofan sjávarmáls.



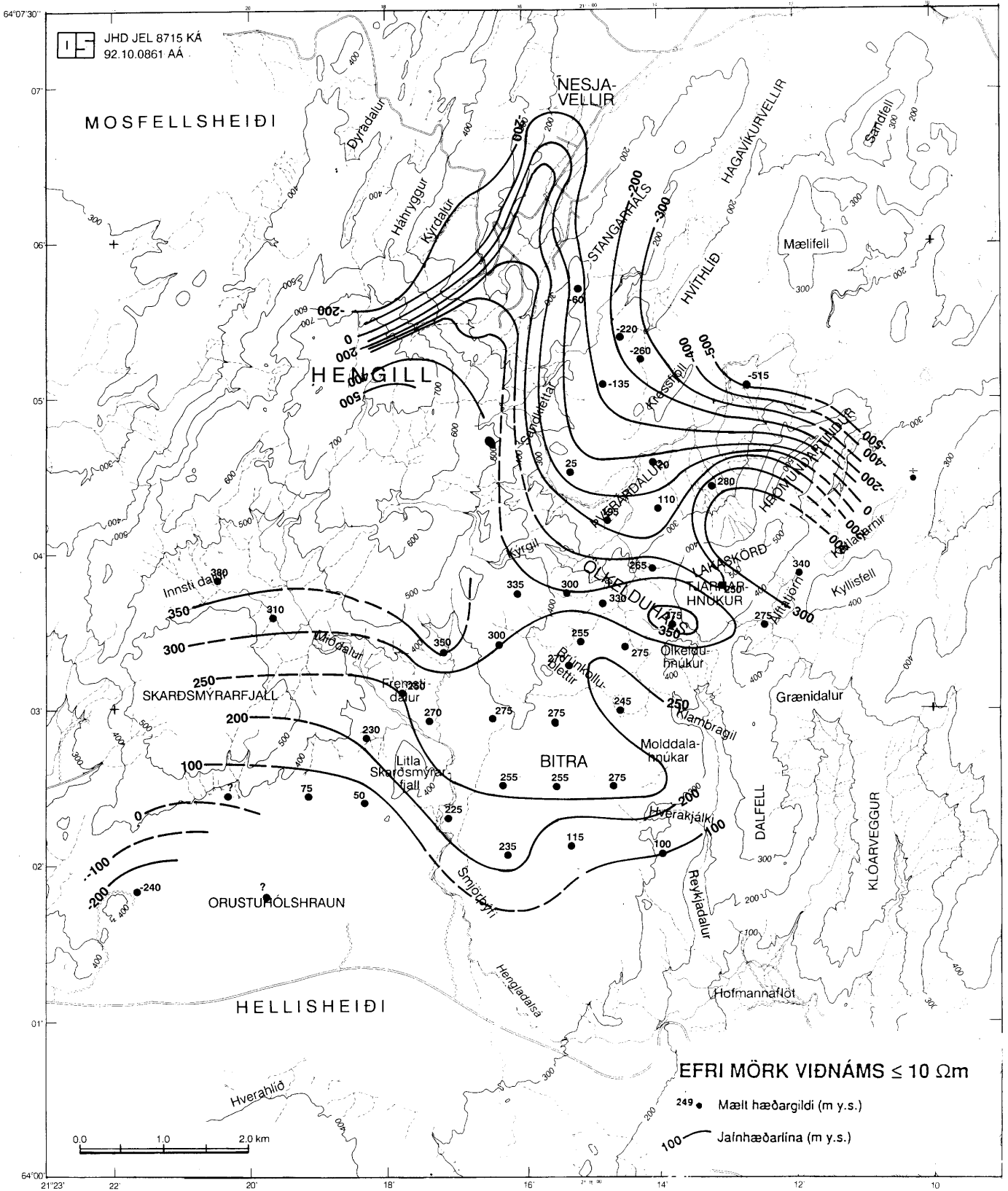
Mynd 16: Viðnám 50 m neðan sjávarmáis.



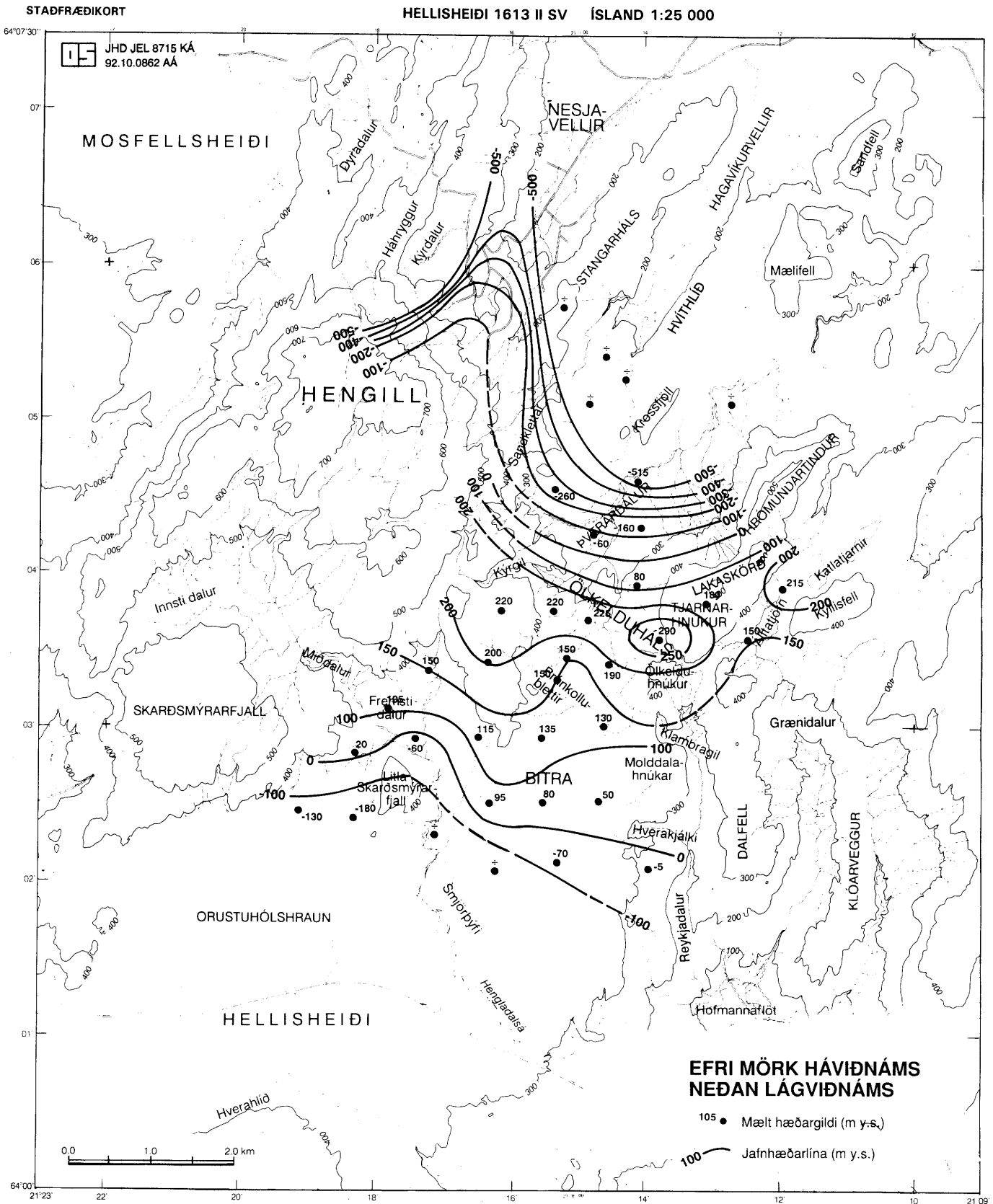
Mynd 17: Viðnám 200 m neðan sjávarmáls.



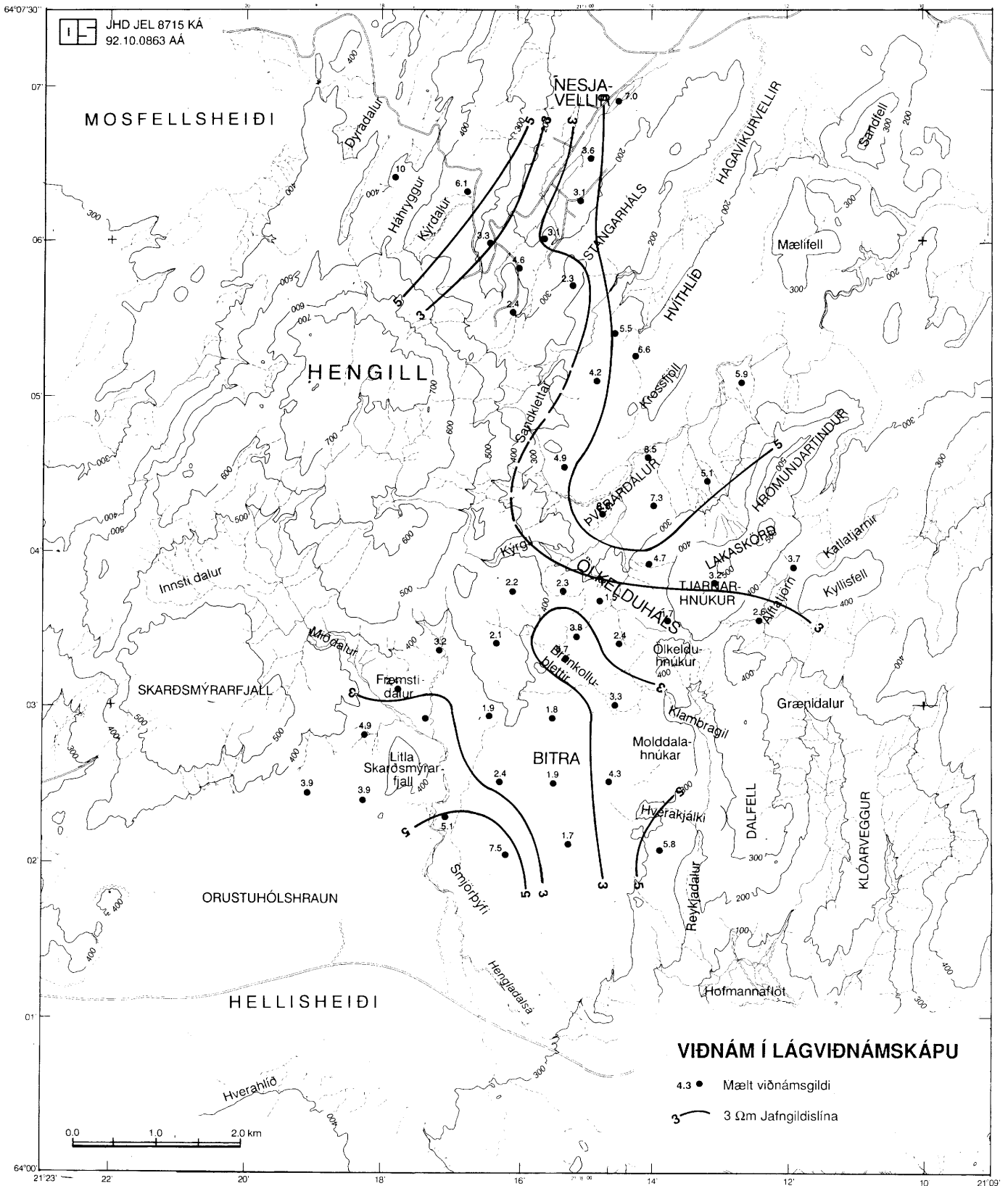
Mynd 18: Viðnám 350 m neðan sjávarmáls.



Mynd 19: Efri mörk lágviðnáms.



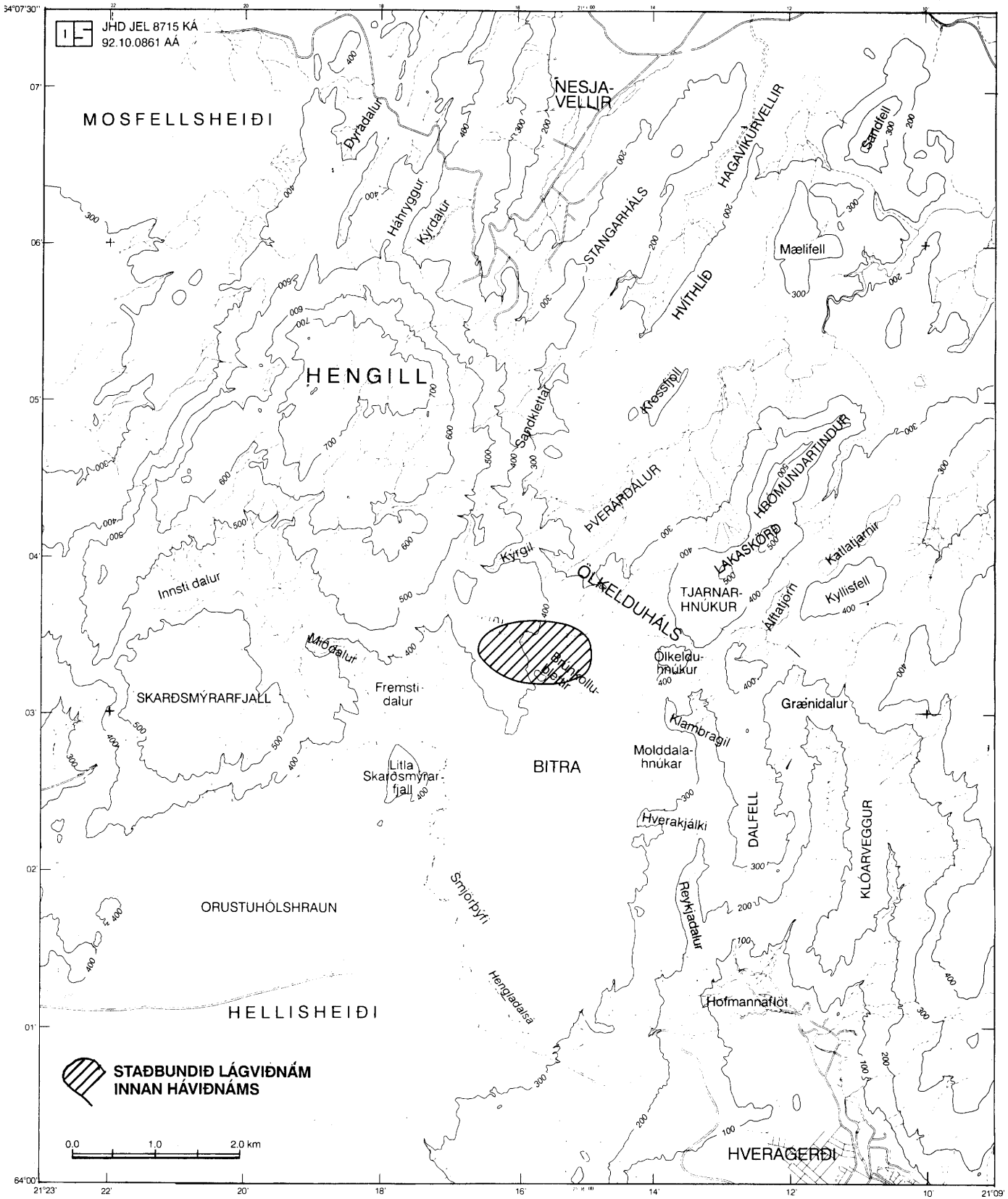
Mynd 20: Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms.



Mynd 21: Viðnám í lágviðnámslagi.

STAÐFRÆÐIKORT

HELLISHEIÐI 1613 II SV ÍSLAND 1:25 000



Mynd 22: Staðbundið lágviðnám innan háviðnáms.

7. AÐRAR RANNSÓKNIR

Eins og getið er í inngangi hafa auk viðnámsmælinga verið gerðar ýmsar jarð-, jarðeðlis- og jarðefnafræðilegar athuganir á Hengilssvæðinu. Í þessum kafla verður fjallað lítillega um þær niðurstöður þessarar rannsókna sem nota má til samanburðar við niðurstöður viðnámsmælinga til að gera sér gleggri mynd af jarðhitavirkninni.

7.1 Jarðfræðiathuganir

Árin 1985 og 1986 var gerð ýtarleg jarðfræðiathugun á svæðinu frá Hengli og Nesjavöllum í vestri og austur fyrir Hrómundartind og að Reykjadal (Knútur Árnason o.fl. 1986 og 1987a) og hafði Kristján Sæmundsson umsjón með þeirri rannsókn. Kristján hafði rannsakað þetta svæði 20 árum áður (Kristján Sæmundsson 1967) og reyndust niðurstöður hans standast nokkuð vel þó að frekari rannsóknir bættu við finni dráttum.

Út frá þessum jarðfræðiathugunum eru færð fyrir því nokkur rök að á því svæði sem rannsakað var séu tvö eldstöðvakerfi, annars vegar Hengilskerfið með miðju undir Hengli og hins vegar Hrómundartindskerfið með miðju undir Hrómundartindi. Eldvirknin í þessum kerfum virðist hafa verið í meginráttum samhliða í tíma, þ.e.a.s. að frá því fyrir rúmlega 100.000 árum og til loka Ísaldar hafi gosið í þeim á víxl. Meginrökin fyrir því að um sé að ræða aðskilin kerfi eru þau að Hengilskerfið er í sprungusveimi með mikilli brotavirkni þar sem sprungur og misgengi eru áberandi. Í sprungusveimnum er sigdalur og upphleðsla í Hengilskerfinu er mun meiri en landslag gefur til kynna. Í Hrómundartindskerfinu er lítið um sprungur eða misgengi og engin merki sjást um sigdal. Upphleðsla í Hrómundartindskerfinu er því mun minni en í Hengilskerfinu. Þó ekki sjáist merki um sprungusveim þá er upphleðslan í Hrómundartindskerfinu með ríkjandi norðaustlæga og suðvestlæga stefnu hliðlægt við sprungusveim Hengilskerfisins. Ísúrt berg og sprengigígar í Hrómundartindskerfinu eru einnig taldir renna stöðum undir þá tilgátu að það sé sjálfstætt eldstöðvakerfi með kvikuþró. Norðan til eru kerfin aðskilin af Þverárdal þar sem upphleðsla milli kerfanna er minni, en suðaustur af sunnanverðum Hengli eru þau samvaxin af Bitru.

Mörkin milli Hengils- og Hrómundartindskerfanna eru ekki glögg en hafa verið dregin þar sem ætla má að austurmörk Hengilssigdalsins liggja. Norðan Hengils eru austustu misgengi Hengils-sigdalsins í Krossfjöllum og norður í Hvíthlíð. Sunnan Hengils eru misgengi í Litla-Skarðsmýrarfjalli sem talin eru marka austurmörk sigdalsins og hafa mörkin milli kerfanna því verið nærri línu milli Krossfjalla og Litla-Skarðsmýrarfjalls.

Yngsta gosvirkni í Hengilskerfinu er frá nútíma. Annars vegar á mjórri rein frá sunnanverðum Hengli, suðvestur yfir Skarðsmýrarfjall og að Þrengslavegi og hins vegar til norðausturs frá Hengli beggja vegna Nesjavalladals og norðaustur í Sandey í Þingvallavatni. Næst þar á undan gaus í lok Ísaldar úr Bitrugíg sunnan við Kýrgil og Sandklettum norðaustan í Hengli. Bitran er til orðin við gosið í Bitrugíg. Yngsta gosvirknin í Hrómundartindskerfinu er í Tjarnarhnúk snemma á nútíma, en þá rann hraun yfir Ölkelduháls, niður í Þverárdal og norðaustur með Hrómundartindi. Í lok Ísaldar var gosvirknin í Hrómundartindskerfinu einkum norðan Hrómundartinds.

Eins og áður segir er brotavirkni mjög mismikil í Hengils- og Hrómundartindskerfunum. Í Hengilskerfinu er mikil brotavirkni, bæði sprungur og misgengi í sprungusveimnum. Ríkjandi stefna brota er NA-SV-læg. Uppi á Hengli sjást einnig sprungur með NV-SA-læga stefnu og

vestan Hengils er goshryggur með þeirri stefnu. Í Hrómundartindskerfinu er lítið um brot og misgengi sýnileg á yfirborði. Í Ölkelduhnúk og Tjarnarhnúk sjást sprungur með NA-SV stefnu og á Bitrunni, miðja vegu milli Molddalahnúka og Fremstadals er misgengi með NA-SV stefnu og fall til austurs. Í Klambragili er talin vera sprunga með NV-SA stefnu svipaða og goshryggurinn vestan í Hengli.

Ummyndun er útbreidd á yfirborði í austanverðum Hengli og þar er víða virkur jarðhiti á yfirborði sunnan og austan í fjallinu, frá Innstadal og norður á Nesjavallasvæði. Frá suðaustanverðum Hengli, við Kýrgil er meira og minna samfelld ummyndun á yfirborði og jarðhiti útbreiddur allar götur suðaustur á Ölkelduháls. Í Hrómundartindskerfinu er útbreiðsla jarðhita og ummyndunar á yfirborði í megindráttum með NA-SV stefnu. Til norðausturs frá virkasta svæðinu kringum Ölkelduhnúk og Klambragil er umtalsverð virkni í Lakaskörðum, norðan við Tjarnarhnúk og nyrst er jarðhitavirkni austan í Hrómundartindi. Til suðurs er jarðhitavirkni vestan við Molddalahnúka og síðan suður í Hverakjálka, en þar er orðið álitamál hvort hann skuli teljast til Hrómundartinds- eða Grensdalskerfisins.

Eins og áður segir sýnir útbreiðsla jarðhita og ummyndunar á yfirborði ekki skýr mörk milli Hengils- og Hrómundartindskerfanna því virkni er nokkuð samfelld í norðurbrún Bitrunnar. Sunnar á Bitrunni er ekki jarðhitavirkni að undanskildu gufuauga sunnan við Brúnkollubletti, miðja vegu milli Ölkelduhnúks og Fremstadals. Ummyndun og jarðhiti á yfirborði ræðst að miklu leyti af grunnvatnsstöðu og kemur fram þar sem heitt grunnvatn nær til yfirborðs. Minnkandi ummerki á yfirborði suður eftir Bitrunni þurfa því ekki að þýða minni jarðhita því land hækkar til suðurs, suður á móts við Molddalahnúka, og grunnvatnsborð er neðan yfirborðs í hraunum Bitrunnar.

Skil milli jarðhitakerfa tengdum Hengilskerfi annars vegar og Hrómundartindskerfi hins vegar koma heldur ekki skýrt fram í niðurstöðum viðnámsmælinga. Efri mörk lágviðnámskápunnar eru hæst undir Hengli en austur frá Hengli sunnan Kýrgils eru þau nánast í yfirborði austur á Ölkelduháls þar sem fram kemur staðbundið hámark (sjá mynd 19). Ennfremur eru efri mörk lágviðnámskápunnar nokkuð há suður eftir Bitrunni sem bendir til þess að þar sé jarðhitavirkni þó þess sjái ekki merki á yfirborði. Norðan við Bitru dýpkar hins vegar á lágviðnámið undir Þverárdal þannig að norðan til virðast kerfin aðskilin.

Þegar kemur um og niður fyrir sjávarmál sýna viðnámsmælingar samfelld hátt viðnám neðan lágviðnáms frá Hengli og austur um Ölkelduháls (myndir 15 og 16) og enn dýpra kemur fram háviðnámsrás suður eftir miðri Bitru sem verður að teljast sterk vísbinding um jarðhitavirkni með háum hita (sjá myndir 17 og 18). Út frá viðnámsmælingunum er því ekki hægt að segja að mörk sjáist milli Hengils- og Hrómundartindskerfanna sunnan Þverárdals. Það eina sem gæti þó bent í þá átt er staðbundið lágviðnám innan háviðnáms sunnan við Brúnkollubletti, nærri syðsta yfirborðsjarðhitunum á Bitru (sjá mynd 22).

7.2 Skjálftamælingar

Sumarið 1981 var gerð rannsókn á skjálftavirkni á Hengilssvæðinu (Foulger 1984). Sett var upp allþétt net 23 næmra skjálftamæla á Hengilssvæðinu og nágrenni þess og virknin skráð í 3 mánuði. Smáskjálftavirkni reyndist nokkuð mikil og misdreifð um svæðið. Flestir skjálftanna sem mældust voru af stærð á bilinu -1 til 2 og með upptök á 2 til 6 km dýpi. Það kom nokkuð á óvart að ekki var einungis um að ræða skjálftahrinur heldur var nokkuð mikil stöðug virkni smáskjálfta.

Mynd 23 sýnir dreifingu skjálfta á tímabilinu 12. júlí til 9. október 1981, varpað til yfirborðs. Óvissumörk í staðsetningu skjálftanna eru nokkurnveginn hringlaga með radius um 1 km og því nokkuð meiri en stærð hringanna gefur til kynna. Á myndinni sést að skjálftavirknin er ekki jafndreifð um svæðið. Auk stakra skjálfta vítt og breytt sjást nokkrar afmarkaðar þyrpingar. Ein slík er vestan Hengils. Á norðanverðri Bitru og við Klambragil eru greinilegar þyrpingar og eins syðst á Bitrunni. Þá eru einnig þyrpingar í Grensdal við Kyllisfell og Laxárdal.

Nokkrar þyrpinganna komu fram sem skjálftahrinur takmarkaðar í tíma. Þetta á við um þyrpingarnar syðst á Bitrunni og við Laxárdal og ennfremur þyrpinguna undir Svínahlíð milli Bitru og Fremstadals. Í öðrum skjálftaþyrpingum var virknin nokkuð jafndreifð í tíma.

Það er athyglisvert við skjálftavirknina á Hengilssvæðinu að stór hluti þeirra skjálfta, sem hægt var að ákvarða brotlausnir á, reyndust vera rifnunarskjálftar en ekki hliðrunarhreyfing á brotflötum. Þetta á einkum við um skjálfta innan Hengilssprungukerfisins, þyrpingarnar undir Bitru og Klambragili og við Kyllisfell. Í austustu þyrpingunni upp af Laxárdal og þeirri vestustu, vestan við Hengilinn, eru hins vegar nær eingöngu um að ræða hliðrunarskjálfta.

Stöðug skjálftavirkni þar sem verulegur hluti skjálftanna er rifnunarskjálftar hefur verið talin endurspeglar varmanám ur heitu bergi (Foulger 1984; Foulger og Long 1984). Skjálftarnir eru taldir til komnir við það að vatn streymi um glufur í heitu bergi og kæli það. Við kólnunina dregst bergið saman og við það víkka þær sprungur sem fyrir hendi eru og nýjar myndast. Rifnunarskjálftarnir eru brestir sem verða við það að nýjar sprungur myndast.

Í lok maí 1991 hóf Veðurstofa Íslands sjálfvirka skráningu og staðsetningu skjálfta á Suðurlandi með svokölluðu SIL kerfi. Í SIL kerfinu eru þrjár skjálftamælar nærri Hengilssvæðinu þ.e. á Heiðarbæ í Þingvallasveit, á Bjarnastöðum í Ölfusi og skammt austan við Selfoss. Kerfið nemur því og staðsetur skjálfta á Hengilssvæðinu. Vegna þess að skjálftamælar eru færri í nágrenni svæðisins og lengra í burtu nemur SIL kerfið ekki jafn litla skjálfta og rannsókn Foulgers 1981 gerði og óvissumörk í staðsetningu eru jafnframt nokkuð meiri. SIL kerfið nemur skjálfta á Hengilssvæðinu af stærð 0 eða stærri og óvissumörk á upptökum þeirra, í láréttum fleti, eru u.þ.b. hringur með 2,5–5 km radius.

Mynd 24 sýnir dreifingu þeirra skjálfta sem SIL kerfið nam og staðsetti á Hengilssvæðinu á tímabilinu 1. júlí 1991 til 31. janúar 1993. Skjálftarnir eru af stærð 0 til 4 og eru verulega misdreifðir um svæðið. Fram koma tvær megin þyrpingar annars vegar vestan Hengils og hins vegar norður af Hveragerði. Þessar þyrpingar eru að megin hluta til jarðskjálftahrinur afmarkaðar í tíma. Þyrpingin vestan Hengils er að verulegum hluta hrina sem átti sér stað í ágúst 1992 og stór hluti þyrpingarinnar fyrir norðan Hveragerði er skjálftahrina í lok desember 1992. Þessar þyrpingar falla saman við skjálftaþyrpingar í gögnum Foulger frá 1981. Auk ofantalinna tveggja þyrpinga sést að skjálftavirknin er veruleg frá Klambragili og norðaustur fyrir Kyllisfell, á sömu slóðum og virkni var mikil sumarið 1981. Auk ofantalinna skjálftaþyrpinga er nokkuð jafndreifð skjálftavirkni um allt svæðið að öðru leyti en því að undir og norðaustur af Þverárdal er lítið um skjálfta. Það er einnig í samræmi við gögnin frá 1981.

Af þessu má draga þá ályktun að þó að skjálftamælingarnar sumarið 1981 hafi einungis staðið í 3 mánuði þá gefi þær góða mynd af dreifingu skjálftavirkninnar á Hengilssvæðinu og að sú dreifing sem þar kom fram sé stöðug frá ári til árs.

7.3 Styrkur gass í gufu

Árið 1982 stóð Hitaveita Reykjavíkur fyrir könnun á gasstyrk í gufu á Hengilssvæðinu (Helgi Torfason o.fl. 1983). Sýni voru tekin úr um 60 gufuaugum á svæðinu frá Hveragerði í suðaustri, norðvestur um Ölkelduháls og vestur í Hengil. Árin 1984 og 1985 stóð Orkustofnun enn fremur fyrir sýnatöku á Hengilssvæðinu (Hrefna Kristmannsdóttir og Kristján H. Sigurðsson 1993). Sýnatökustaðir voru að verulegu leyti þeir sömu og hjá Hitaveitu Reykjavíkur auk nokkurra nýrra staða, einkum í austanverðum Hengli og milli Hengils og Tjarnarhnúks. Mældur var styrkur allra helstu gastegunda í gufusýnunum svo sem koltvíoxíðs (CO_2), brennisteinsvetnis (H_2S), vetnis (H_2), súrefnis (O_2), metans (CH_4), argons (Ar) og ammoníaks (NH_3). Í sýnum Orkustofnunar var enn fremur mældur styrkur radons (Rn) og hlutfall súrefnisísótópa ($\delta^{18}\text{O}$). Vegna mismunandi aðferða við sýnatöku eru niðurstöður mælinga á styrk sumra gastegundanna ekki beint sambærilegar. Þetta á t.d. við um súrefni og vetni og hlutföll gastegunda annarra en koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis, en styrkur annarra t.d. koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis er sambærilegur.

Hér verða ekki tífundaðar niðurstöður allra mælinga á gufusýnunum heldur einungis þær niðurstöður sem taldar eru gefa bestar upplýsingar um jarðhitavirknina, þ.e. styrkur koltvíoxíðs, brennisteinsvetnis og vetnis í gufu og hlutfall súrefnisísótópa. Þar sem mælingar á styrk koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis eru sambærilegar milli mælinga Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar er stuðst við bæði gagnasöfnin þegar dreifing á styrk þessarra gastegunda er skoðuð. Dreifing á styrk vetnis byggir eingöngu á gögnum Hitaveitu Reykjavíkur, en breytingar í hlutfalli súrefnisísótópa eingöngu á gögnum Orkustofnunar.

Mynd 25 sýnir styrk koltvíoxíðs í gufu ($\text{mg CO}_2/\text{kg gufu}$). Myndin sýnir mikinn styrk koltvíoxíðs í Hengli og minnkandi til austurs, en tunga með nokkuð háum gildum teygir sig til suðausturs eftir Hengladölum að Fremstadal. Á Ölkelduhálsi, suður fyrir Klambragil og austur sunnan við Álftatjörn kemur einnig fram staðbundið hámark í styrk koltvíoxíðs.

Koltvíoxíð er talið eiga uppruna sinn í kvikuinnskötum. Það er ekki mjög hvarfgjarnt og skilar sér því vel til yfirborðs. Styrkur koltvíoxíðs ræðst einkum af magni innskota í jörðu og hversu góðan aðgang vatn hefur að innskötunum og síðan til yfirborðs. Sú dreifing á styrk koltvíoxíðs sem fram kemur á mynd 25 styður óneitanlega þá tilgátu að Hengilskerfið og Hrómundartindskerfið séu aðskilin eldstöðvakerfi. Ójöfn dreifing á gufuaugum hefur eflaust nokkur áhrif á hvernig jafngildislínur eru dregnar en eins og sést á myndinni er styrkur koltvíoxíðs mun minni í gufuaugunum í norður brún Bitrunnar, upp af Þverárdal, en í Hengli og Ölkelduhálsi.

Mynd 26 sýnir dreifingu á styrk brennisteinsvetnis í gufu ($\text{mg H}_2\text{S}/\text{kg gufu}$). Eins og fyrir koltvíoxíð er mest brennisteinsvetni í Hengli, en minnkar til suðausturs. Í norðaustanverðum Hengli gengur tunga með nokkuð miklu brennisteinsvetni til austurs, en í suðaustanverðum Hengli og Hengladölum er tiltölulega lítið brennisteinsvetni, þar sem mynd 25 sýnir tiltölulega mikið koltvíoxíð. Austur undir Ölkelduhnúk og Klambragili kemur fram staðbundið hámark í brennisteinsvetni þó að gildi séu þar miklu lægri en í Hengli.

Brennisteinsvetni á eins og koltvíoxíð uppruna sinn í innskötum í jörðu. Brennisteinsvetnið er hins vegar mun viljugra að taka þátt í efnahvörfum, einkum ef súrefni er til staðar. Lítið brennisteinsvetni í gufu á yfirborði þarf því ekki endilega að þýða að framboð þess í jarðhitavatni djúpt í jörðu sé lítið, heldur getur það hafa hvarfast á leið til yfirborðs.

Mynd 27 sýnir styrk vetnis í gufu ($\text{mg H}_2/\text{kg gufu}$). Vetni er mest í Hengli og minnkar til suðausturs, en áberandi hæð í vetnisstyrk liggur til suðausturs frá Kýrgili og eftir norðurhluta Bitru, yfir á Ölkelduháls þar sem fram kemur staðbundið hámark. Uppruni vetnisins er ekki eins ljós og koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis. Það getur verið komið að verulegu leyti úr innskotum í jörðu, en við hitastig hærra en 300-400 °C geta einnig verið í gangi efnahvörf sem skila vetni. Við hitastig lægra en 300 °C er vetni hins vegar mjög lítið hvarfgjarnt. Því má ætla að dreifing á styrk vetnis gefi áreiðanlegri mynd af hitastigi djúpt í jörðu en koltvíoxíð og brennisteinsvetni sem geta hvarfast við lágt hitastig grunnt í jörðu. Að þessu verður nánar vikið síðar.

Mynd 28 sýnir dreifingu á hlutfalli koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis ($\text{mg CO}_2/\text{mg H}_2\text{S}$). Hlutfallið er hátt á norðanverðri Bitru milli Hengils og Ölkelduháls og suður eftir Bitru eins langt og gögnin ná. Það er enn fremur nokkuð hátt til vesturs eftir Hengladölum og til suðausturs í Grensdalseldstöðina. Þar kemur reyndar fram staðbundið lágmark nærri áætlaðri miðju hinnar fornu Grensdalseldstöðvar. Hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis er hins vegar lágt í norðanverðum Hengli.

Mynd 29 sýnir frávik í hlutfalli súrefnisísótöppanna ^{18}O og ^{16}O frá SMOW (Standard Mean Oceanic Water) gildi. SMOW gildið er eins og nafnið gefur til kynna meðalgildi fyrir hlutfall ísótöppanna í sjó. Frávik frá SMOW eru yfirleitt neikvæð og reiknuð í prómill. Mynd 29 sýnir því hversu mörg prómill hlutfall súrefnisísótöppanna er lægra en SMOW.

Við uppgufun eða suðu vatns verður að nokkru leyti aðskilnaður sameinda með misþunga ísótöpa vegna mismunandi massa þeirra þannig að vatnsgufan inniheldur minna af ^{18}O ísótöpum en vatnið sem eftir situr. Af þessum sökum hefur regnvatn lægra hlutfall súrefnisísótöpa en sjór og hlutfallið í úrkomu lækkar eftir því sem hún fellur hærra í landi vegna aðskilnaðar í þyngdarsviði jarðar. Eftir því sem uppgufun eða suða á sér stað við lægra hitastig verður frávik ísótöphlutfallsins í gufunni meira. Halldór Ármannson (1989) hefur reiknað út frávik við suðu við mismunandi hitastig.

Af mynd 29 virðist mega ætla að bakgrunnsgildi fyrir $\delta^{18}\text{O}$ í gufuaugum á Hengilssvæðinu sé um -10 prómill. Þar sem ísótöphlutfallið lækkar við suðu er þetta í góðu samræmi við áætlað gildi í grunnvatni á Hengilssvæðinu sem er -8,5 prómill (Bragi Árnason 1976). Mynd 29 sýnir veruleg frávik í ísótöphlutfallinu á tveimur stöðum. Annars vegar í gufuauganu á Bitrunni sunnan Brúnkollubletta og hins vegar í gufuaugum syðst í Reykjadal. Eins og áður er rakið benda lág gildi ísótöphlutfallsins til þess að suða eigi sér stað í jörðu. Hið geysilága hlutfall ísótöpa í gufuauganu sunnan Brúnkollubletta, með $\delta^{18}\text{O}$ minna en -20 prómill, er ekki hægt að skýra með einfaldri suðu. Viðlíka lágt súrefnisísótöphlutfall mældist í gufuaugum á Tjarnarási á Peistareykjum (Gestur Gíslason o.fl. 1984). Þar var velt upp nokkrum mögulegum skýringum, þar á meðal að við myndun leirsteinda sé ^{18}O gjarnara að ganga í steindir en ^{16}O og myndun slíkra steinda geti þannig valdið lágu ísótöphlutfalli. Þar er einnig nefndur sá möguleiki að við suðu í jörðu geti hluti gufunnar þéttast aftur á leið til yfirborðs og við það verði sá hluti sem ekki þéttist með mjög lágt ísótöphlutfall. Darling og Halldór Ármannson (1989) hafa síðan fært fyrir því rök að þétting á hluta gufunnar valdi hinu lága ísótöphlutfalli á Peistareykjum.

Eins og fram kemur hér að framan fæst nokkuð breytileg mynd þegar dreifing mismunandi gastegunda í gufu er skoðuð. Þó sýna myndir 25, 26 og 27 að styrkur koltvíoxíðs, brennisteinsvetnis og vetnis er mestur í Hengli, en austan við Hengil er verulegur munur á styrk þessarra

gastegunda. Þær sýna þó allar staðbundið hámark á eða nálægt Ölkelduhálsi, en þar er samt meiri munur í styrk þeirra en í Hengli.

Yfirleitt eykst styrkur gastegunda í gufu með hækkandi hitastigi í jarðhitakerfum (Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1985). Styrkur gastegundanna eykst að vísu mismikið, þannig eykst vetni t.d. meira með hita en koltvíoxíð og brennisteinsvetni. Séu ekki utanaðkomandi truflanir vegna fblöndunar af grunnvatni eða suðu má nota breytileika í styrk og hlutföllum gastegunda til að áætla djúphitastig í jarðhitakerfum með svokölluðum gashitamælum. Ef hins vegar er um að ræða suðu eða fblöndun grunnvatns geta niðurstöður venjulegra gashitamæla verið mjög misvísandi.

Út frá þeirri dreifingu á styrk gastegunda sem sýnd er á myndum 25-27 má færa fyrir því nokkuð gild rök að á hluta rannsóknarsvæðisins sé um að ræða fblöndun og/eða suðu. Með því að bera saman dreifingu í styrk brennisteinsvetnis (mynd 26) og vetnis (mynd 27) sést að hlutfall þessarra gastegunda er lægst við norðurbrún Bitrunnar upp af Þverárdal og svipað er uppi á teningnum með hlutfall koltvíoxíðs og vetnis. Út frá gashitamælum sem byggja á hlutfalli þessara gastegunda (ef gert er ráð fyrir jafnvægi) yrði því að gera ráð fyrir hæstum hita á þessum slóðum. Það verður að teljast frekar ólíklegt að hiti sé þarna hærra en yfir miðjum eldstöðvanna í Hengli og Hrómundartindi. Til þess að gera hátt viðnám í lágviðnámskápunni undir Þverárdal er túlkað sem merki um kælingu vegna ágangs grunnvatns úr norðaustri og því er líklegt að þarna sé um að ræða fblöndun.

Eins og áður segir er vetni mjög lítið hvarfgjarnt við hitastig lægra en 300 °C. Brennisteinsvetni er hins vegar hvarfgjarnt, einkum ef súrefni er til staðar. Við slíkar aðstæður má því raða gastegundunum eftir hvarfgjarni þannig að brennisteinsvetni er hvarfgjarnast, síðan koltvíoxíð en vetni er lítið hvarfgjarnt. Ef um er að ræða fblöndun af fersku grunnvatni má því búast við því að styrkur brennisteinsvetnis minnki mest, síðan koltvíoxíðs, en að styrkur vetnis minnki óverulega. Samkvæmt þessari röksemdafærslu má því taka hátt hlutfall t.d. koltvíoxíðs á móti brennisteinsvetni sem merki um fblöndun. Á mynd 27 sést að þetta hlutfall er hátt á Bitru milli Hengils og Ölkelduháls og bendir það til þess að þar leki ferskt grunnvatn niður og blandist jarðhitavatni. Hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis er einnig nokkuð hátt í Miðdal og Fremstadal og ennfremur til suðausturs frá Ölkelduhálsi í átt að Hveragerði. Reyndar er staðbundið lágmark nálægt áætlaðri miðju gömlu Grensdalseldstöðvarinnar og gæti það bent til öflugs uppstreymis jarðhitavökva á þeim slóðum.

7.4 Boranir

Sumarið 1949 voru boraðar tvær holur á því rannsóknarsvæði sem hér er til umfjöllunar. Holurnar eru í skýrslu Tómasar Tryggvasonar (Trausti Einarsson o.fl. 1951) kallaðar 116-a og 116-b. Holu 116-a er sögð vera í Miðdal og 116-b í Hverakjálka. Þar mun vera um misskilning að ræða því að hola 116-a er vestast í Fremstadal þar sem Hengladalsá kemur niður úr Miðdal og hola 116-b er í Klambragili. Staðsetning þeirra er sýnd á mynd 1.

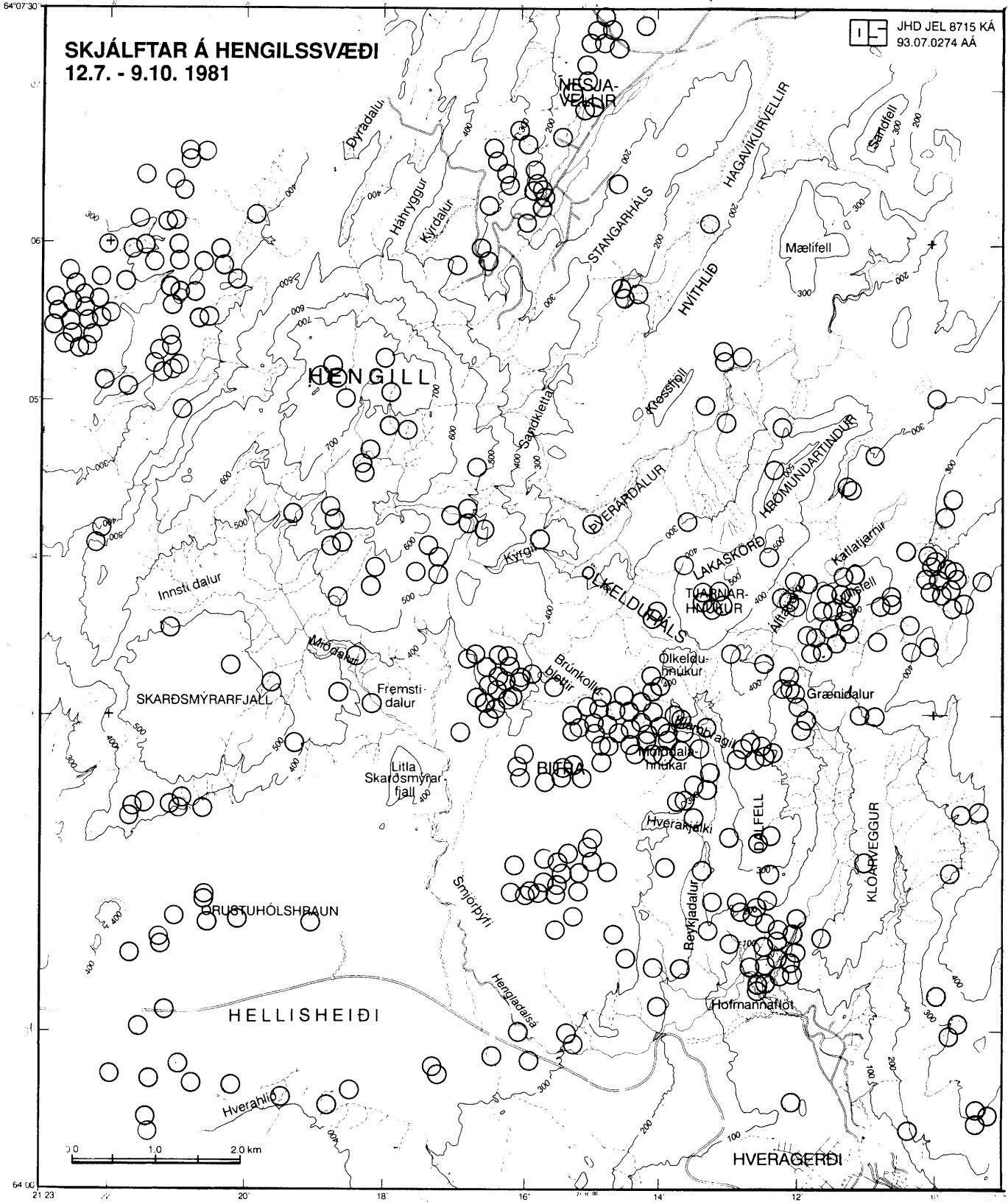
Hola 116-a í Fremstadal er í 350 m hæð yfir sjó og er 134 m djúp. Móberg er ráðandi niður á 60 m dýpi en þar tekur við dflabasalt. Á tæplega 120 m dýpi tekur móberg aftur við. Bergið er ferskt niður á um 120 m dýpi, en þar fyrir neðan segir Tómas að sé myndbreytt móberg og er þar trúlegast um að ræða leirummyndun. Hitamælingar í holunni voru frekar ófullkomnar því að þær fóru fram að morgni eftir borun. Tómas segir að hiti vaxi hægt í holunni og að á 55 m dýpi hafi mælst 25,5 °C og 66,5 °C á 123 m dýpi. Hann bætir síðan við að eftir viku upphitun

hafi hitastig á 66 m dýpi hækkað um 8 °C. Af þessu má ráða að botnhiti holunnar sé vel innan við 100 °C og sú ummyndun sem nefnd er hlýtur því að vera leir.

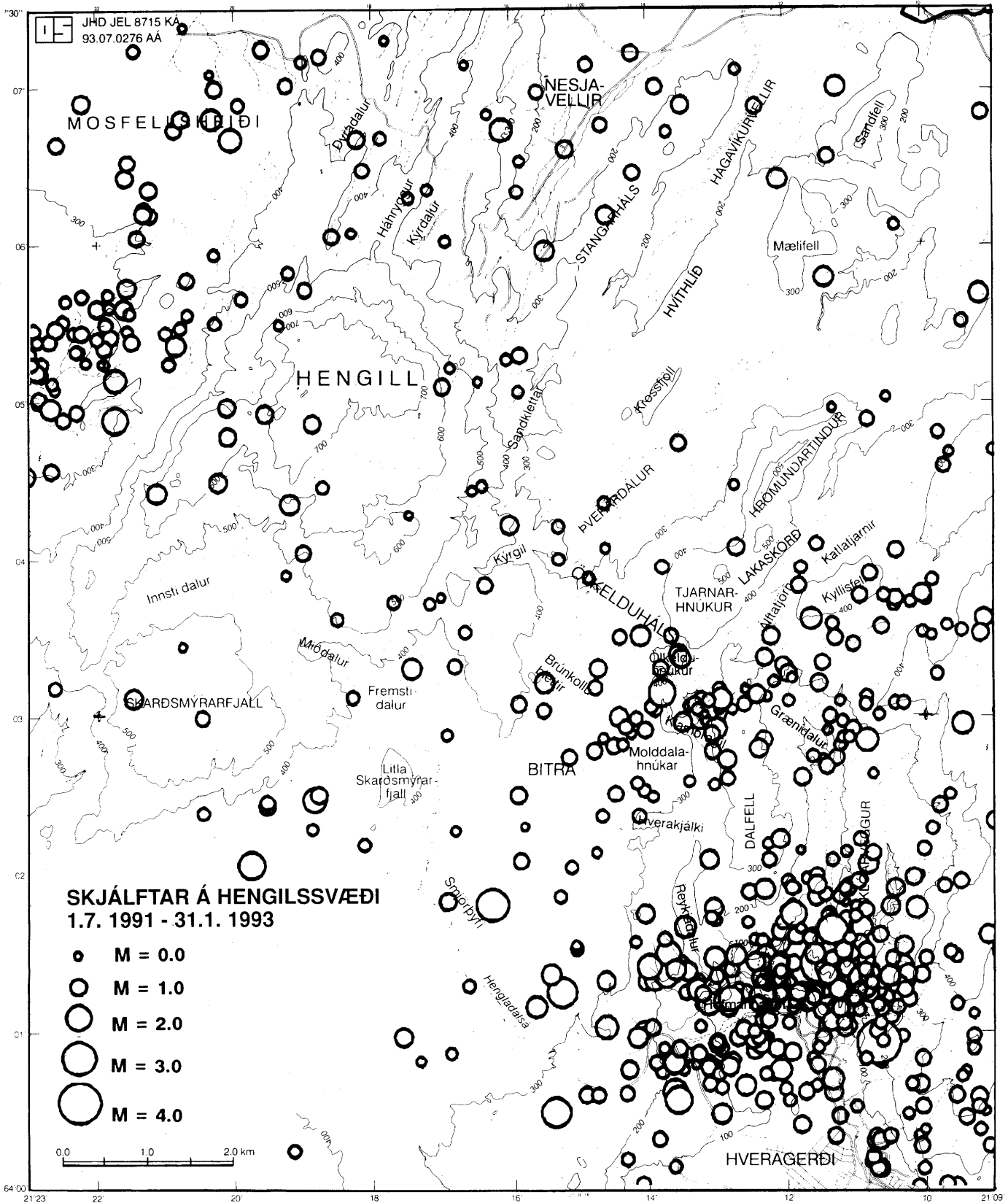
Ein TEM-mæling, ÖH-32, er rétt við holuna og sýnir hún efrimörk lágviðnáms í 250 m hæð yfir sjó (sjá myndir 11 og 19). Það er í góðu samræmi við jarðlagalýsingu Tómasar sem segir ummyndun koma fram á tæplega 120 m dýpi eða rúmlega 230 m yfir sjó.

Hola 116-b í Klambragili er 270 m hæð yfir sjó og 150 m djúp. Móberg er ráðandi niður á rúmlega 60 m dýpi en basalt þar fyrir neðan. Samkvæmt lýsingu Tómasar er berg lítið ummyndað í efstu 40 m en þar fyrir neðan fer ummyndun vaxandi og að á 90-100 m dýpi sé klórft ráðandi og ummyndun mikil. Hiti mældist um 71 °C frá 6 m og miður á 31 m dýpi. Á 70 m dýpi mældust 115 °C og 175 °C á 114 m dýpi og má ætla að í botni sé hitinn um 200 °C. Við æð á 141 m dýpi kom gufugos í holuna.

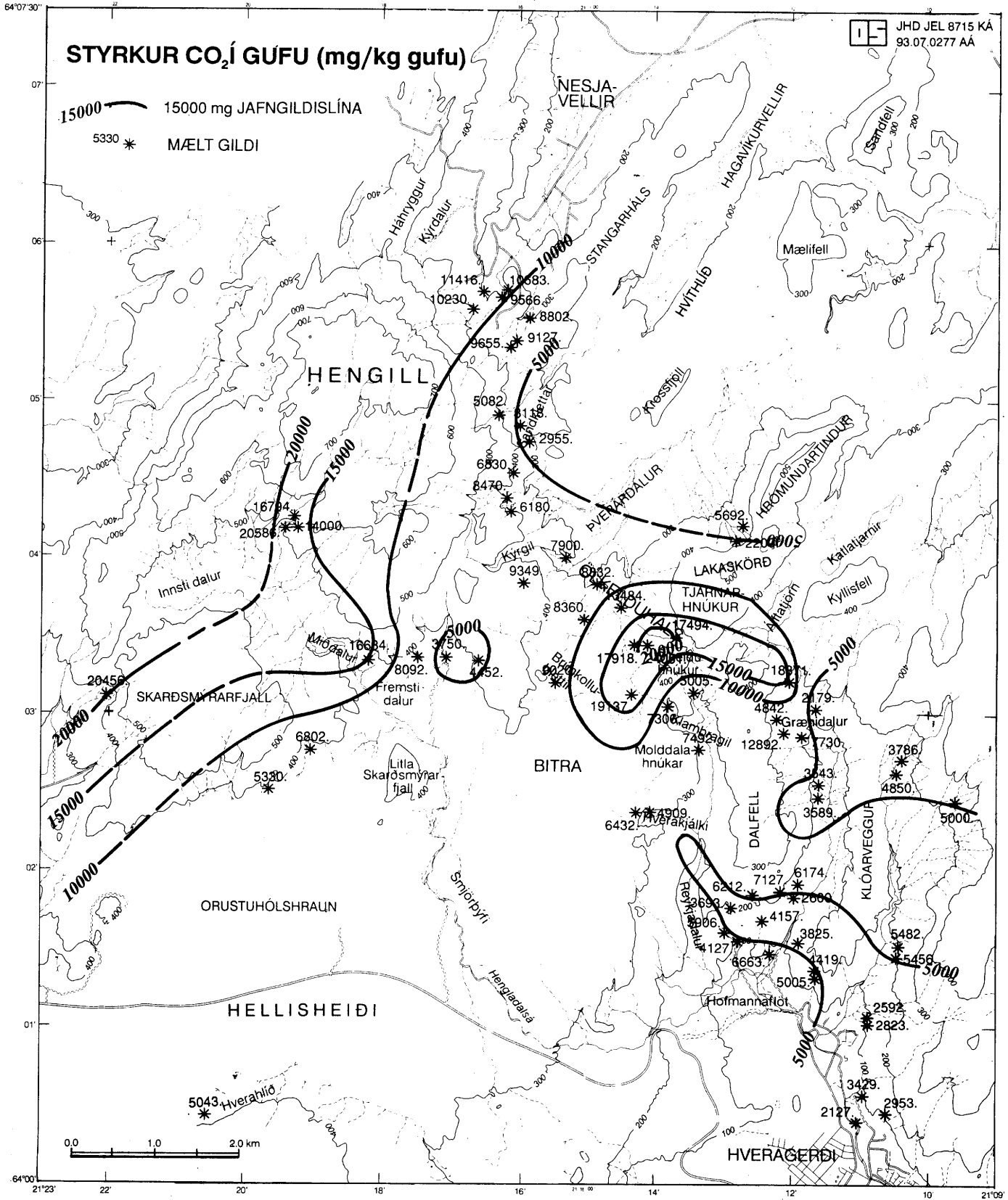
Engin viðnámsmæling er í næsta nágrenni holunnar. Út frá mælingum austast á Bitru og við Ölkelduhnúk hefa efrimörk hás viðnáms neðan lágviðnáms, sem talið er endurspegla klórítumyndun, verið áætluð um 150 m ofan sjávarmáls í Klambragili (sjá mynd 20). Það er í góðu samræmi við lýsingu á ummyndun í holunni því samkvæmt henni verður klórft ráðandi í kringum 170 m ofan sjávarmáls. Samkvæmt skýrslu Tómasar Tryggvasonar er hitastig á rúmlega 100 m dýpi vel innan við 200 °C, en klórítumyndun er orðin veruleg. Þetta bendir til þess að ekki sé lengur jafnvægi milli ummyndunar og hitastigs á þessum slóðum og að þarna hafi hiti verið mun hærri áður.



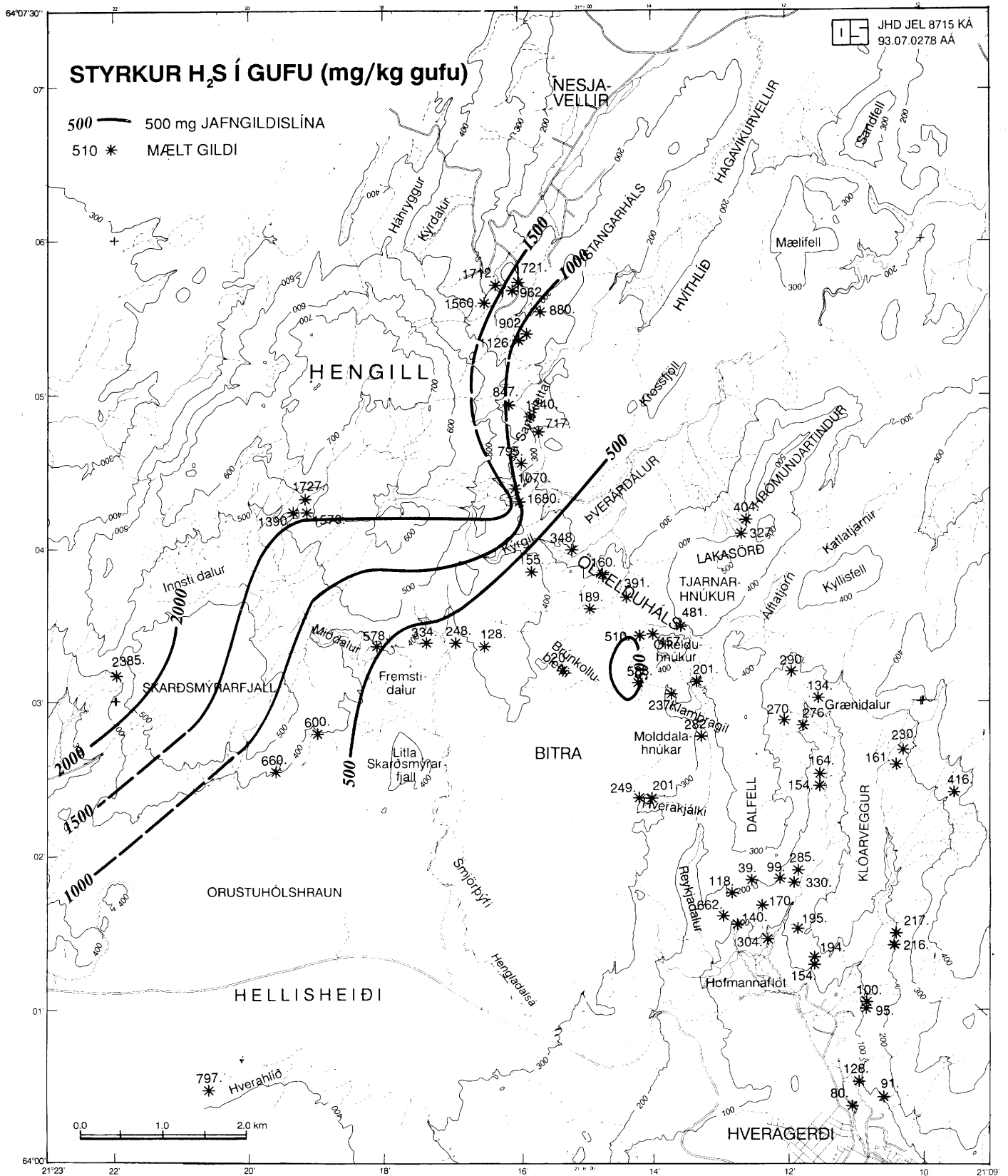
Mynd 23: Skjálftar á Hengilssvæði 12.7. - 9.10. 1981.



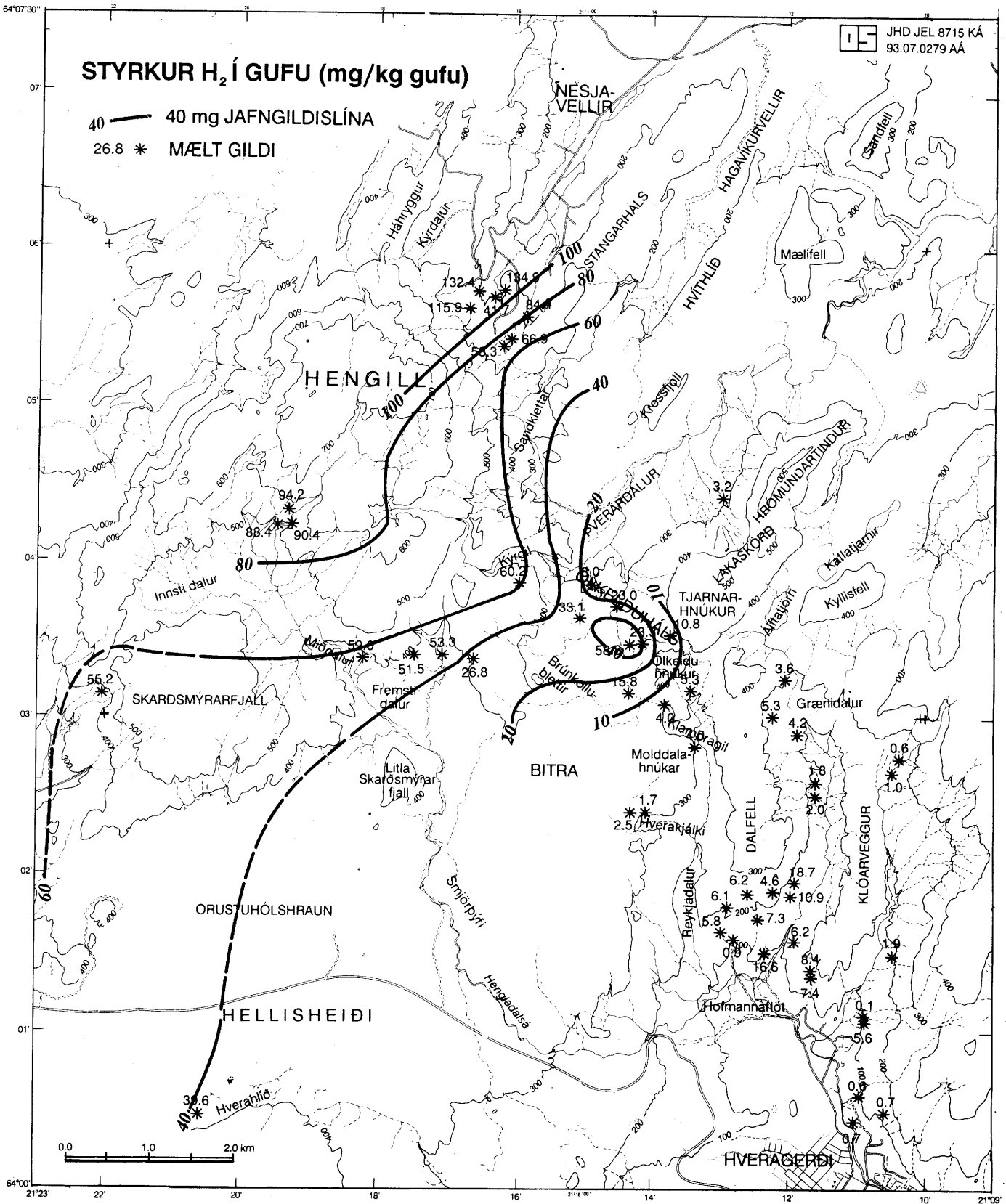
Mynd 24: Skjálftar á Hengilssvæði 1.7. 1991 - 31.1. 1993.



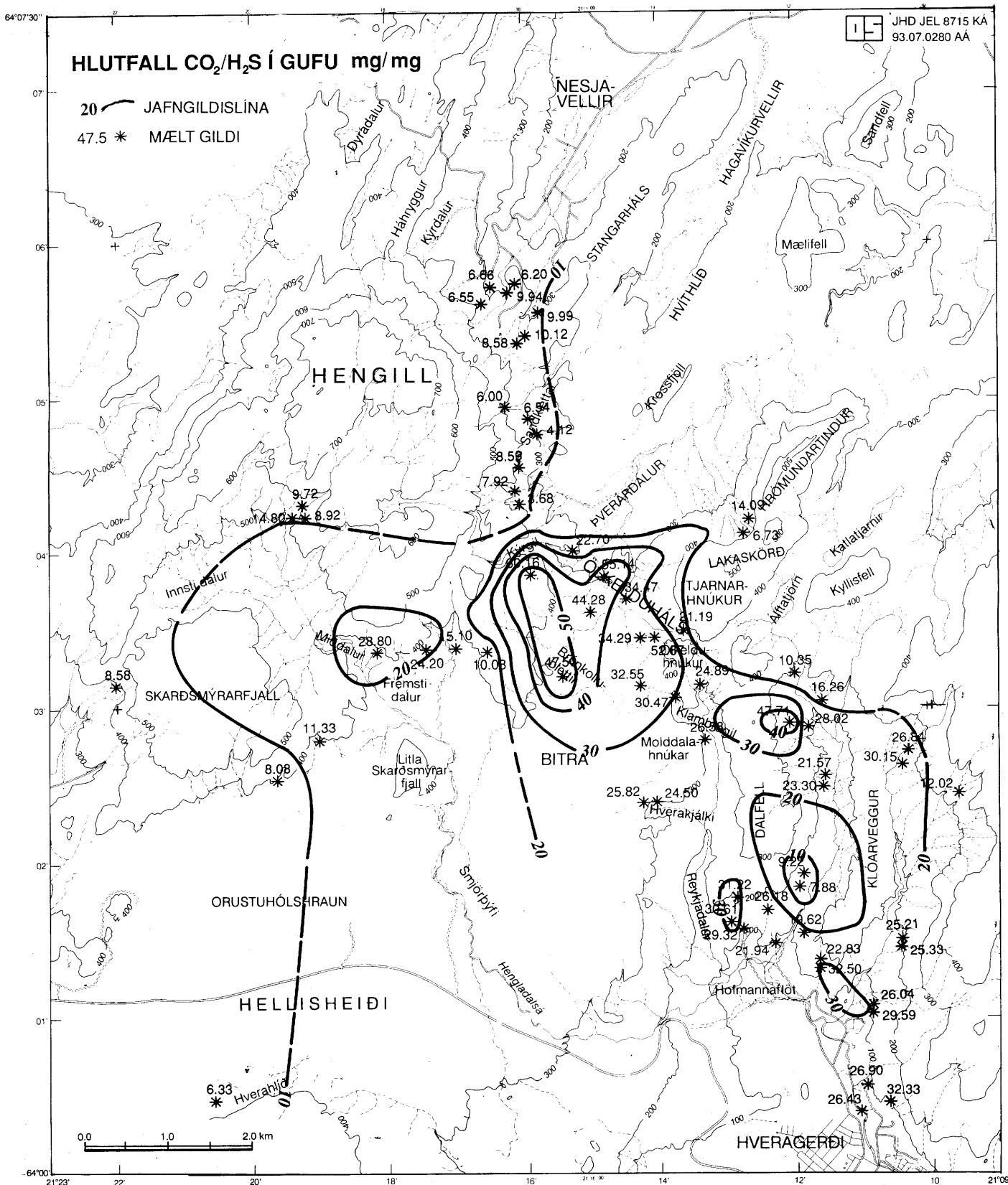
Mynd 25: Styrkur koltvíoxíðs í gufu.



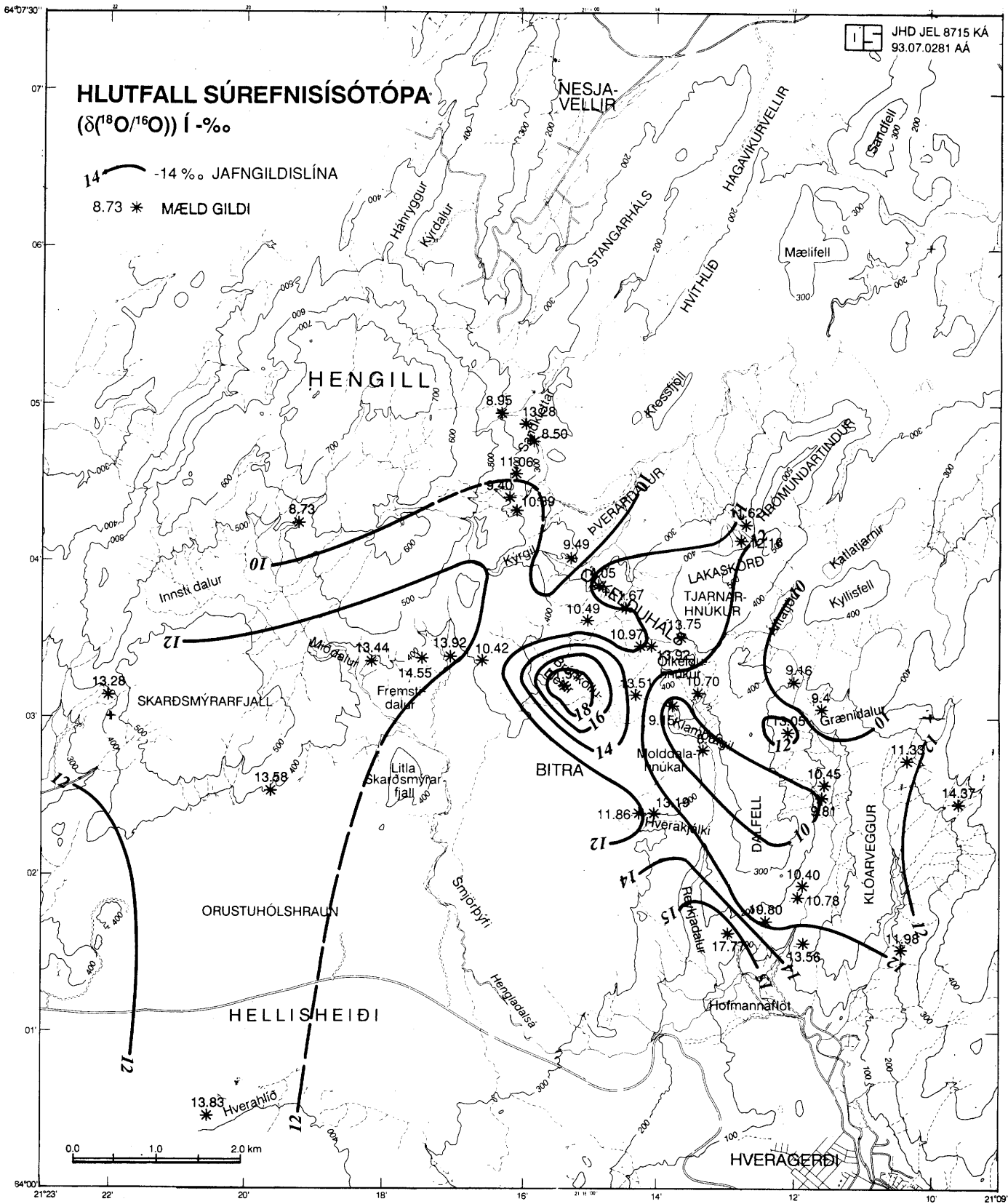
Mynd 26: Styrkur brennisteinsvetnis í gufu.



Mynd 27: Styrkur vetnis í gufu.



Mynd 28: Hlutfall koltvöxlds og brennisteinsvetnis í gufu.



Mynd 29: Hlutfall súrefnisísótópa í gufu.

8. SAMANBURÐUR Á NIÐURSTÖÐUM VIÐNÁMSMÆLINGA OG ANNARRA RANNSÓKNA

Eins og fram kom í kafla 6 hér að framan sýna viðnámsmælingarnar ekki glögga skiptingu í jarðhitavirkni milli Hengils- og Hrómundartindseldstöðvakerfa. Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms (mynd 20), sem talin eru endurspeglar efri mörk klórít ummyndunar, sýna samfelldan hrygg undir norðurbrún Bitru milli Hengils og Ölkelduháls.

Mynd 30 sýnir samnburð á efri mörkum háviðnáms neðan lágviðnáms og styrk vetnis í gufu-augum. Á myndinni sést að þessum þáttum ber vel saman því styrkur vetnis er mestur þar sem háviðnámið rís hæst. Af þessari mynd er freistandi að draga þá ályktun að milli Hengils og Ölkelduháls sé grunnt á háan hita, hærri en 240 °C.

Eins og fram kom í kafla 6.6 kemur aftur fram lágviðnám innan háviðnámsins í þremur mælingum á norðurhluta Bitru. Tilvist þessa lága viðnáms er hér talin endurspeglar staðbundið lægra hitastig. Þarna virðist því hafa orðið kæling eftir að klórít ummyndunin varð og að hún sé nú "yfirprentuð" með leirsteindum. Þessi túlkun fær stuðning af dreifingu á styrk gastegunda í gufu því að í kafla 7.3 eru út frá hlutfalli koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis í gufu færð fyrir því rök að á þessum slóðum sé íblöndun fersks grunnvatns í jarðhitakerfinu.

Í kafla 7.2 um skjálftamælingar á Hengilssvæðinu kom ennfremur fram að á þessum slóðum er til staðar stöðug virkni smáskjálfta og brotlausnir benda til þess að þar sé varmanám úr bergi á 2-6 km dýpi. Á mynd 31 er sýnt hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis í gufu, dreifing smáskjálfta og hvar fram kemur staðbundið lágviðnám innan háviðnámsins. Eins og sjá má á myndinni fellur staðbundna lágviðnámið innan þess svæðis þar sem hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetni er hvað hæst og á suðurmörkum þess eru skjálftaþyrpingar.

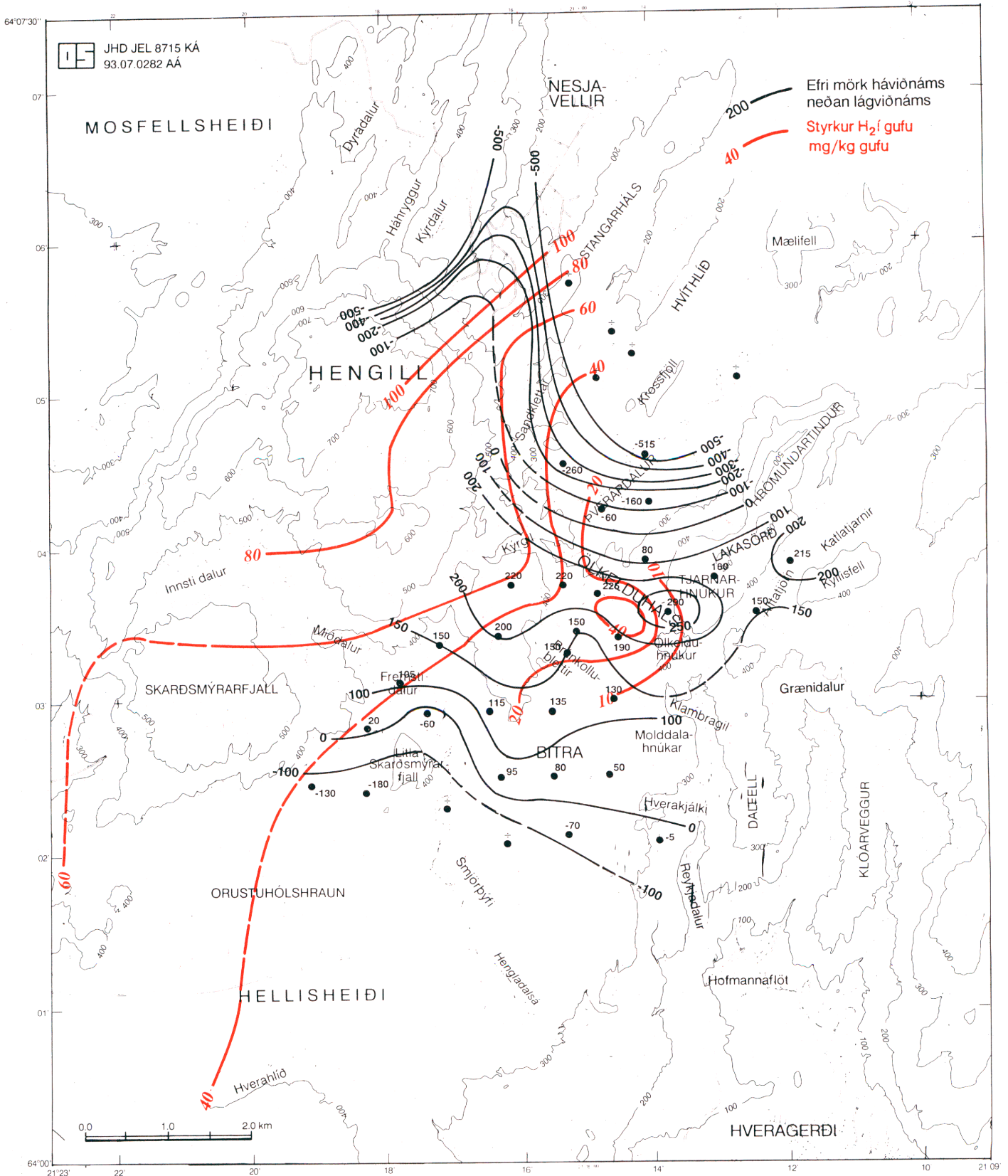
Samsvörun þessara þriggja óháðu gagnasafna sem fram kemur á mynd 31 má hugsa sér að skýra á eftirfarandi hátt. Á þessum slóðum eru trúlega brot þó að þeirra sjái ekki merki á yfirborði. Stefna brotanna er trúlega annað hvort NA-SV eða NV-SA nema hvort tveggja sé. Lína sem dregin er eftir NV-SA sprungu sem sést í Klambragili og framlengd norðvestur yfir há Hengil, þar sem er að finna brot með svipaða stefnu, gengur í gegnum þetta afbrigðilega svæði. Vegna hreyfinga um þessi brot og/eða vegna dvínandi jarðhitavirkni getur grunnvatn hafa farið að leka niður í jarðhitakerfið og blandast jarðhitavatni. Vegna mikils súrefnis í grunnvatninu hvarfast brennisteinsvetni og hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis verður hátt. Grunnvatnið kælir bergið og þar sem áður var ráðandi klórítumyndun hafa aftur komið leirsteindir og þar með lágt viðnám. Dýpra í jörðu kælir vatnið heitt berg sem brestur með smáskjálftum þegar það dregst saman.

Lægri hita í jörðu á þessum slóðum sér einnig merki í viðnámsgildum í lágviðnámskápunni (mynd 21) því að við Brúnkollubletti norðan við syðsta gufuaugað á Bitrunni er viðnám í lágviðnámskápunni óvenju hátt sem talið er stafa af lægri hita. Mynd 32 sýnir að þetta háa viðnám í lágviðnámskápunni fellur nokkurn veginn saman við þann stað þar sem hlutfall súrefnisísótópa er lægst. Eins og fram kom í kafla 7.3 er þetta lága ísótópahlutfall talið geta stafað af myndun leirsteinda. Telja verður þó öllu líklegra, að þarna eigi sér stað suða í jörðu og hluti gufunnar þéttist á leið til yfirborðs. Það kann að virðast mótsagnarkennt að um sé að ræða suðu neðanjarðar þar sem talið er vera niðurstreymi grunnvatns. Það þarf þó ekki að vera. Til þess að niðurstreymi eigi sér stað þarf lekt til yfirborðs að vera góð og þrýstingur efst í kerfinu að vera lágur miðað við umhverfið. Við slíkar aðstæður er ekki ólíklegt að staðbundin suða og þétting

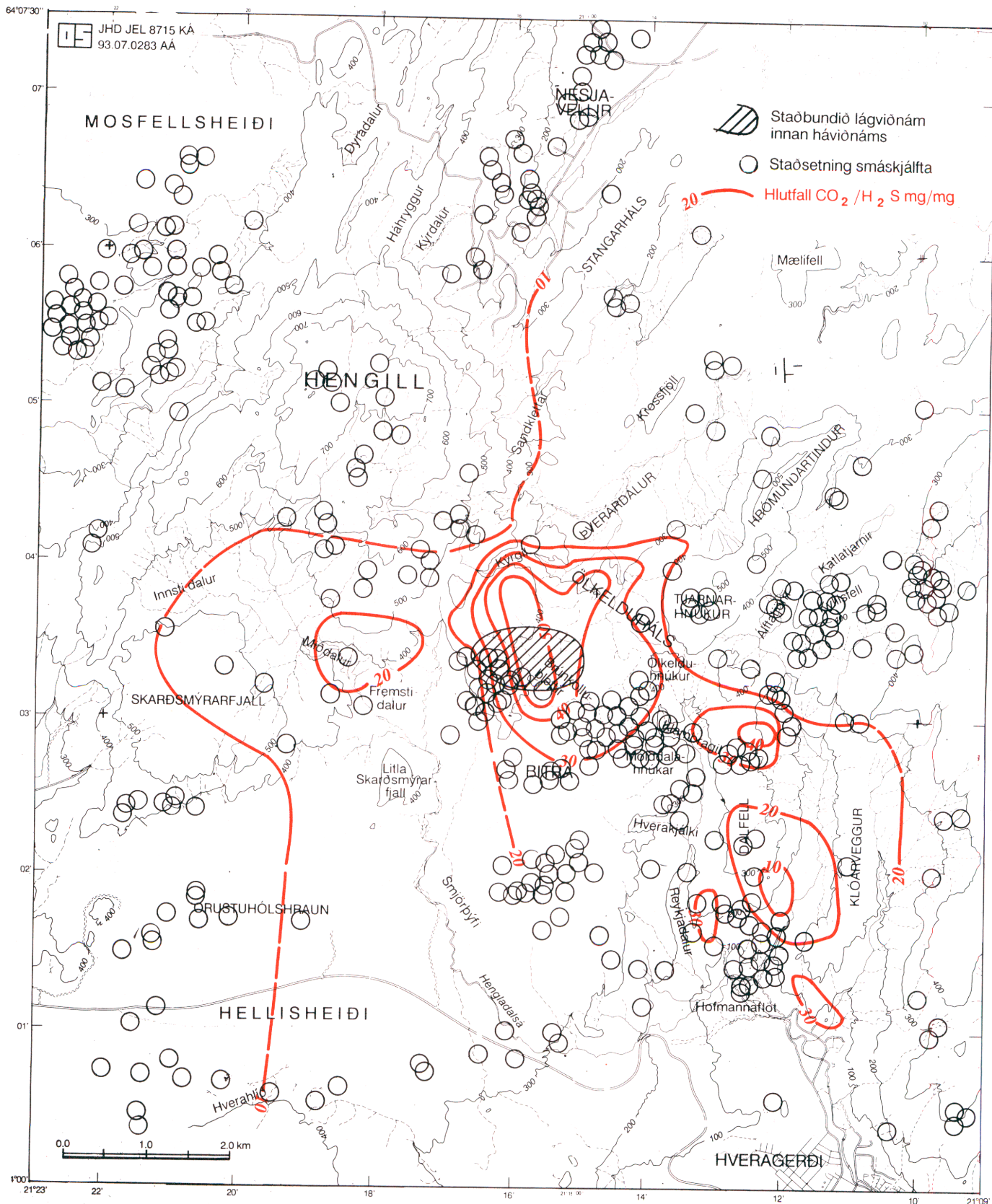
verði.

Tiltölulega mikill styrkur vetnis í gufuaugum á norðurbrún Bitru, milli Hengils og Ölkelduháls, þarf ekki að vera í andstöðu við þá hugmynd að þar sé sblöndun kaldara grunnvatns því vetni er lítið hvarfgjarnt við hitastig lægra en 300 °C. Það getur hinsvegar bent til þess að þar norður frá nái sblöndun ekki djúpt í jarðhitakerfið og að það sé lítið truflað þegar dýpra kemur. Skjálftavirknin virðist liggja nokkuð fyrir sunnan hámarkið í styrk vetnis sem gæti stutt þennan grun.

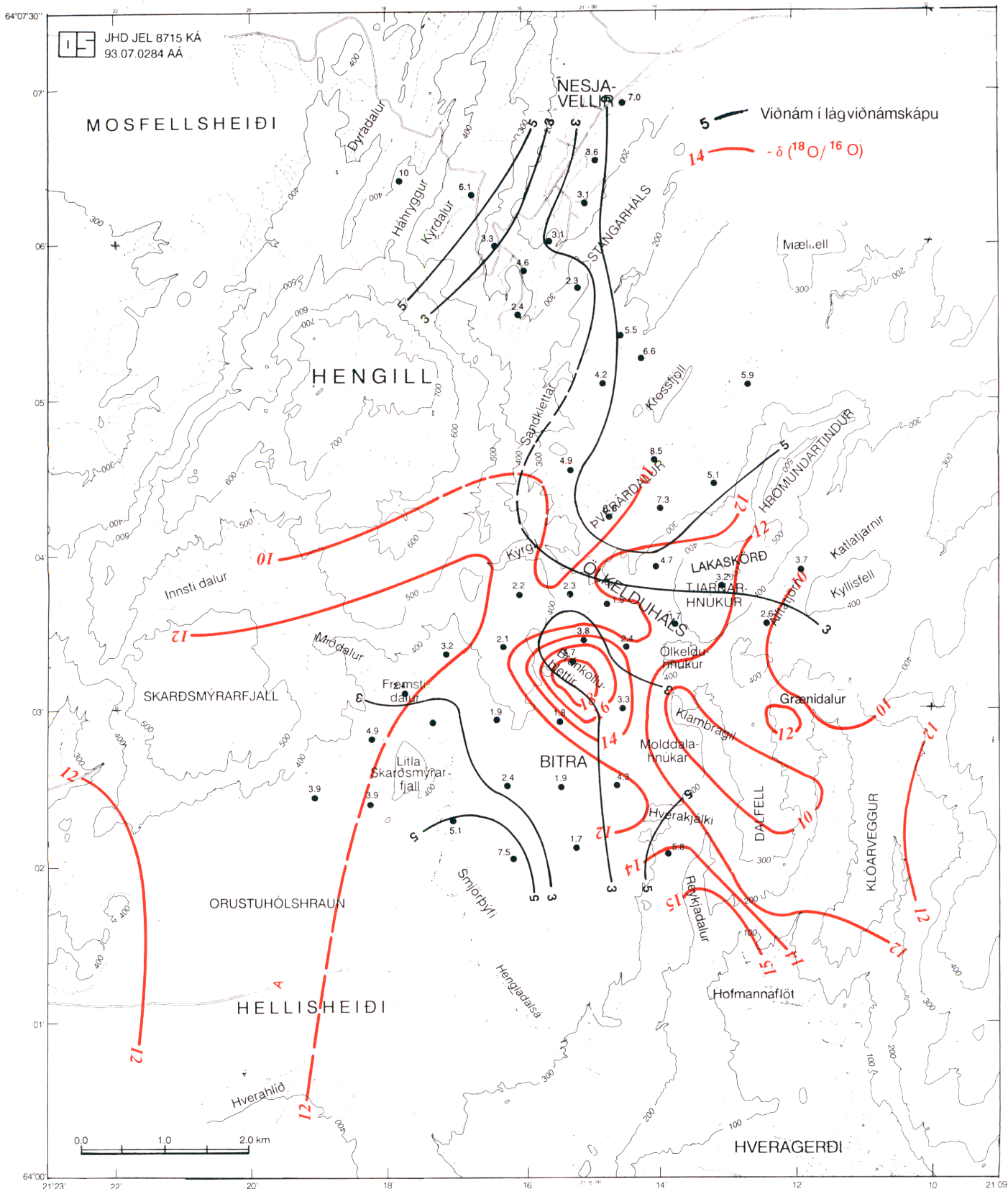
Lítið er um gögn úr borholum sem hægt er að bera saman við niðurstöður viðnámsmælinga. Einungis eru tvær grunnar holur til á mælisvæðinu. Efri mörk leirsteindabeltisins í holu 116-a í Fremstadal falla saman við efrimörk lágviðnámskápunnar á þeim stað. Efri mörk klórítummyndunar í holu 116-b í Klambragili falla einnig vel saman við áætluð efri mörk á háu viðnámi neðan lágviðnáms en hitamæling í þeirri holu bendir til þess að þar hafi orðið lítilsháttar kæling frá því ummyndunin varð.



Mynd 30: Efri mörk háviðnáms neðan lágviðnáms og styrkur vetnis í gufu.



Mynd 31: Hlutfall koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis, dreifing skjálfta og staðbundið lágviðnám.



Mynd 32: Viðnám í lágviðnámslagi og hlutfall súrefnisísótópa.

9. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

Lágviðnámslag kemur fram á nánast öllu mælisvæðinu sem hér er til umfjöllunar. Efri mörk lágviðnámsins rísa hæst undir norðanverðum Hengli og undir Ölkelduhálsi. Norðaustur frá Hengli gengur lágviðnámsvæði norður undir Nesjavalladal. Undir norðurbrún Bitru rís lágviðnámið hátt milli Hengils og Ölkelduháls. Til norðausturs frá Ölkelduhálsi nær lágviðnámið hátt yfir sjó norður undir Hrómundartind, en þar dýpkar mjög ört á það. Undir Þverárdal er mun dýpra á lágviðnámi en beggja vegna dalsins og viðnámsmælingar sýna því Hengils- og Hrómundartindskerfin aðskilin á þeim slóðum. Til suðurs frá Hengli og Ölkelduhálsi dýpkar á lágviðnámið, en þó mun hægar en til norðurs, einkum suður eftir Bitru þar sem ekki fer að dýpka verulega á það fyrr en komið er suður á móts við Litla-Skarðsmýrarfjall og Hverakjálka.

Viðnámið í lágviðnámslaginu er yfirleitt lægst þar sem það rís hæst. Það er aftur á móti frekar hátt ($> 5 \Omega\text{m}$) á norðausturhluta mælisvæðisins undir Þverárdal og Krossfjöllum. Það er líka nokkuð hátt ($> 3 \Omega\text{m}$) undir suðvesturhluta mælisvæðisins, sunnan við Fremstadal og suðaustur af Litla-Skarðsmýrarfjalli þar sem það er yfir $5 \Omega\text{m}$. Frá Brúnkollublettum og til suðausturs að Hverakjálka gengur tunga þar sem viðnámið í lágviðnámskápunni er hærra en $3 \Omega\text{m}$ og er orðið hærra en $5 \Omega\text{m}$ sunnan við Hverakjálka. Eftir miðri Bitrunni er viðnámið kápunnar mjög lágt eins langt til suðurs og mælingar ná.

Reynsla frá Nesjavöllum og öðrum ferskvatnsmettuðum háhitasvæðum hefur sýnt að lágviðnámskápa með viðnámi á bilinu $1-5 \Omega\text{m}$ endurspeglar leir- og zeólítaummyndun og hitastig á bilinu $100-240 \text{ }^\circ\text{C}$. Breytilegt viðnámi í lágviðnámskápunni er talið endurspeglar breytilegan hita. Þannig er talið að tiltölulega hátt viðnámi í lágviðnámskápunni undir Þverárdal endurspeglar kælingu vegna kalds grunnvatns. Tiltölulega hátt viðnámi í lágviðnámslaginu suðaustur af Litla-Skarðsmýrarfjalli er talið endurspeglar afrennsli jarðhitavatns til suðvesturs.

Fram kemur hátt viðnámi neðan lágviðnámslagsins á mest öllu rannsóknarsvæðinu. Það teygir sig frá Hengli norður undir Nesjavalladal og frá Hengli austur um Fremstadal og Bitru, eins langt til austurs og mælingar ná. Líft og lágviðnámslagið, rís háviðnámið hæst undir Hengli, norðanverðri Bitru og Ölkelduhálsi og dýpið á það vex til norðurs og suðurs. Á norðausturhluta mælisvæðisins er það komið niður fyrir dýptarskynjun mælinganna (á meira en 1 km dýpi) um Hrómundartind og Krossfjöll. Suður eftir miðri Bitru kemur fram svæði með afgerandi háu viðnámi, eins langt suður og mælingar ná, en ekki kemur fram hækkandi viðnámi undir lágviðnámslaginu suðaustur af Litla-Skarðsmýrarfjalli. Þetta gæti bent til þess að þarna sjáist skil milli Hengils- og Hrómundartindskerfanna.

Hækkandi viðnámi neðan lágviðnáms er almennt talið sýna hvar klórítummyndun tekur við af leirsteindum og zeólítum. Ef hitastig er í jafnvægi við ummyndun svarar þetta til hita hærri en $240 \text{ }^\circ\text{C}$. Slíkt hitastig svarar til þrýstings um eða yfir 35 börum . Dýpið á háviðnámið er víða það lítið, allt niður í 100 m , að gera yrði ráð fyrir suðu í jarðhitakerfinu á stórum svæðum. Því verður að teljast líklegt að hitastig sé nú víða lægra en var þegar meginummyndunin átti sér stað.

Þeirri túlkun að hátt viðnámi neðan lágviðnáms endurspeglar klórítummyndun verður að beita með varúð á suðurhluta rannsóknarsvæðisins. Nokkuð víst má telja að þar sé afrennsli jarðhitavatns til suðurs og hugsanlega lækkar hiti með dýpi á svæðum þar sem afrennsli er eftir láréttum lögum.

Háviðnámssvæðið suður eftir Bitrunni er hins vegar mjög afgerandi og ofan þess er mjög lágt við nám í lágviðnámskápunni. Þetta bendir til þess að að þarna sé hiti hár og ekki einungis um að ræða afrennsli úr norðri. Þetta háviðnámsvæði undir Bitru er með norður-suður stefnu og stenst á við háviðnámsstungu með norður-suður stefnu á Nesjavöllum. Sú tunga fellur saman við misgengi djúpt í jörðu. Hugsanlegt er að þau misgengi gangi áfram suður undir austanverðum Hengli og suður Bitru og séu uppstreymisrás jarðhitavökva.

Hryggur í efrimörkum háviðnáms neðan lágviðnáms, frá Hengli og austsuðaustur á Ölkelduháls, fellur saman við hrygg í efrimörkum lágviðnáms. Þetta er talið geta endurspeglad VNV-ASA brot á þessum slóðum sem eru uppstreymisrás jarðhitavökva. Sprungur með svipaða stefnu sjást í Klambragili og uppi á Hengli.

Viðnámsgildin í háviðnáminu neðan lágviðnámskápunnar eru yfirleitt hærri austan og suðaustan við Hengil en á Nesjavöllum. Hugsanlega er þetta vegna þess að jarðhitavirkni austan Hengils er eldri og ummyndun og holufylling bergs meiri en á Nesjavöllum, en minni poruhluti vegna holufyllingar veldur hækkandi viðnámi.

Við Brúnkollubletti, á norðanverðri Bitru, kemur fram staðbundið lágvið nám innan háviðnámsins neðan lágviðnámskápunnar. Þetta lágvið nám nær niður á rúmlega 400 m dýpi og verður varla skýrt á annan hátt en þann að þarna sé hitastig verulega lægra en umhverfis og það lágt að leirsteindir séu til staðar í miklu magni. Styrkur og hlutföll gastegunda í gufuaugum benda til þess að þarna geti verið íblöndun af köldu grunnvatni í jarðhitakerfið. Lfklegasta skýringin á því er sú að þarna sé niðurrennsli grunnvatns eftir sprungum niður í jarðhitakerfið. Stöðug smáskjálftavirkni er á þessum slóðum og er stór hluti skjálftanna rifnunarskjálftar og hefur það verið tekið sem merki um kælingu á heitu bergi. Það er eftirtektarvert að þessi staður er á þeim slóðum þar sem hugsanleg brot með N-S stefnu frá Nesjavöllum og suður eftir Bitru skera hugsanleg brot með VNV-ASA-stefnu frá Klambragili og yfir Hengil.

Styrkur vetnis í gufuaugum er tiltölulega mikill á norðurbrún Bitru, milli Hengils og Ölkelduháls. Það þarf ekki að vera í andstöðu við þá hugmynd að þar sé íblöndun kaldara grunnvatns því vetni er lítið hvarfgjarnt við hitastig lægra en 300 °C. Það getur hinsvegar bent til þess að þar norður frá nái íblöndun ekki djúpt í jarðhitakerfið og að það sé lítið truflað þegar dýpra kemur. Skjálftavirknin virðist liggja nokkuð fyrir sunnan hámarkið í styrk vetnis sem gæti stutt þennan grun.

Nokkur af þeim atriðum sem rakin hafa verið í þessari skýrslu má ef til vill taka sem merki um ellimörk á jarðhitasvæðinu austan Hengils. Í fyrsta lagi er nokkuð víða til þess að gera hátt við nám í lágviðnámskápunni sem getur verið merki um kælingu. Í öðru lagi er við nám neðan lágviðnámskápunnar að jafnaði hærra en á Nesjavöllum sem bendir til meiri holufyllingar og þar með trúlega minni lektar. Í þriðja lagi eru vísbendingar um að kalt grunnvatn sé farið að blandast við jarðhitavatn milli Hengils og Ölkelduháls. Í fjórða lagi er styrkur gass í gufu meiri í Hengli en austan hans og í fimmta lagi má nefna að hitamæling í borholu í Klambragili sýndi lægri hita en þar hefur ríkt þegar ummyndun bergsins átti sér stað þannig að þar hefur orðið kæling.

10. HEIMILDIR

- Bragi Árnason, 1976: *Groundwater Systems in Iceland*. Vísindafélag Íslands XLII, 236 s.
- Darling, W.G. og Halldór Ármannsson, 1989: *Stabile isotopic aspects of fluid flow in the Krafla, Námafjall and Theistareykir geothermal systems of northeast Iceland*. Chemical Geology, 76, 197-213.
- 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.
- Foulger, Gillian R., 1984: *Seismological Studies of the Hengill Geothermal Area, SW Iceland*. Doktorsritgerð við Háskólann í Durham, Englandi. 313 s.
- Foulger, Gillian R. og R. E. Long, 1984: *Anomalous focal mechanisms: Evidence for tensile crack formation on an accreting plate boundary*. Nature, 310: 43-45.
- Foulger, Gillian R. og D. R. Toomey, 1989: *Structure and Evolution of the Hengill-Grensdalur Volcanic Complex, Iceland: Geology, Geophysics and Seismic Tomography*. Journal of Geophysical Research. Vol. 94, N. b12: 17,511-17,523.
- Gestur Gíslason, Gunnar V. Johnsen, Halldór Ármannsson, Helgi Torfason og Knútur Árnason, 1984: *Theistareykir. Yfirborðsrannsóknir á háhitasvæðinu*. Orkustofnun, OS-84089/JHD-16, 134 s.
- Gunnar Böðvarsson, 1951: *Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði, og nágrenni, árin 1947-1949. Fyrri hluti. Tímarit Verkfræðingafél. Ísl., 1. hefti: 1-48*.
- Gylfi Páll Hersir, Grímur Björnsson og Axel Björnsson, 1990a: *Eldstöðvar og jarðhiti á Hengilssvæði, jarðeðlisfræðileg könnun*. Orkustofnun, OS-90031/JHD-06, 93 s.
- Gylfi Páll Hersir, Grímur Björnsson, Axel Björnsson og Hjálmar Eysteinnsson, 1990b: *Eldstöðvar og jarðhiti á hengilssvæði, jarðeðlisfræðileg könnun-Viðnámsmæligögn*. Orkustofnun, OS-90032/JHD-16 B, 89 s.
- Halldór Ármannsson, 1989: *Surface Geochemical Studies of Geothermal Areas Without Springs*. Water-Rock Interaction, WRI-6, Miles (ed.), Balkema, Rotterdam, 33-36.
- Helgi Torfason, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Gunnar V. Johnsen og Einar Gunnlaugsson, 1983: *Vestur-Hengill. Yfirborðsrannsókn jarðhitasvæðisins*. Orkustofnun, OS-83119/JHD-22, 113 s.
- Hjalti Franzson 1988: *Nesjavelir. Borholujarðfræði. Vatnsgengd í jarðhitageymi*. Orkustofnun, OS-88046/JHD-09, 58 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: *Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C*. International Clay conference 1978. Ritstj. Mortland og Farmer. Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam 1979, 277-288.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Kristján H. Sigurðsson, 1993: *Hengilssvæði. Efnarannsókn gass í gufuaugum*. Orkustofnun, OS-93009/JHD-04 B, í útgáfu.
- Knútur Árnason, Brynjólfur Eyjólfsson, Karl Gunnarsson, Kristján Sæmundsson og Axel Björnsson, 1984: *Krafla-Hvíthólar. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðikönnun 1983*. Orkustofnun,

OS-84033/JHD-04, 61 s.

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986: *Nesjavellir. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1985*. Orkustofnun, OS-86017/JHD-02, 125 s.

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

Knútur Árnason, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Lúðvík S. Georgsson og Sigurður Th. Rögnvaldsson, 1987b: *Nesjavellir. Jarðeðlisfræðirannsóknir 1986, Mæligögn*. Orkustofnun, OS-87019/JHD-12 B, 66 s.

Knútur Árnason, Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Gylfi Páll Hersir, 1987c: *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 Resources Council TRANSACTIONS, Vol. 14, Part II, 845-851.

Kristján Sæmundsson, 1967: *Vulkanismus und Tektonik des Hengill-Gebietes in Südwest-Island*. Acta Nat. Isl. 2(7), 109 s.

Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius, 1983: *Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjaneskaga 1981 og 1982*. Orkustofnun, OS-83049/JHD-09, 70 s.

Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Knútur Árnason, 1985: *Resistivity structure of the upper crust in Iceland*. J. Geophys. Res., 90, 10136-10150.

Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson, 1985: *New Gas Geothermometers for Geothermal Exploration - Calibration and Application*. Geothermica et Cosmochimica Acta. Vol. 49, 1307-1325.

Trausti Einarsson, Þorbjörn Sigurgeirsson, Tómas Tryggvason, Sigurjón Rist, Baldur Línadal og Helmuth Schwabe, 1951: *Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði, og nágrenni, árin 1947-1949. Síðari hluti*. Tímarit Verkfræðingafél. Ísl., 3.-4. hefti: 49-82.

ÞAKKIR

Höfundur vill þakka Hrefnu Kristmannsdóttur og Halldóri Ármannsyni á Orkustofnun fyrir aðstoð og holl ráð við túlkun efnafræðigagna. Höfundur vill ennfremur þakka Steinunni Jakobsdóttur og Gunnari Gunnarsyni á Veðurstofu Íslands fyrir að láta í té upplýsingar um skjálftavirkni á Hengilssvæðinu á síðustu árum. Síðast en ekki síst er Auði Ágústsdóttur þökkud einstök þolinmæði og þrautseigja við gerð mynda í þessa skýrslu.

ENGLISH SUMMARY

In 1991 and 1992 a total of 35 TEM-resistivity soundings were made in the Ölkelduháls geothermal area, east of Mount Hengill, SW Iceland. The Ölkelduháls geothermal area is the middle part of a much larger geothermal area reaching from the central volcano Hengill in the west to the much older Grensdalur central volcano in the south east.

The resistivity survey revealed an extensive low-resistivity layer delineating the geothermal system. A pronounced increase in resistivity was observed below the low-resistivity layer. The increased resistivity is believed to reflect transition in dominant alteration minerals from clays to chlorite. The elevation of the top of the low-resistivity layer and the higher resistivity below is highest under mount Hengill and Ölkelduháls indicating maxima in the geothermal activity in these places. This is further supported by higher concentration of non-condensable gases in steam vents.

The depth to the low-resistivity layer increases rapidly to the north under the valley Thverárdalur and the mountain Hrómundartindur showing rather sharp boundaries of the geothermal system towards north. The depth to the low-resistivity layer increases slowly towards south from Hengill and Ölkelduháls. In this area, the interpretation of the resistivity structure in terms of relevant geothermal parameters is not straightforward. This is because the geothermal system has most likely an off-flow of geothermal waters towards south, and temperature inversion below permeable layers cannot be ruled out.

The TEM-soundings indicate an anomalous area of limited extent between Hengill and Ölkelduháls. In this area a second low-resistivity layer is observed in the high-resistivity core below the low-resistivity cap. This anomaly is believed to be caused by relatively low temperatures and secondary clay mineral alteration, due to leakage of cool ground water into the geothermal system. This interpretation gets support from concentration and ratios of non-condensable gases in steam vents in this area, which indicate mixing of geothermal waters with fresh water. Monitoring of micro earthquakes has shown continuous seismic activity at 2 - 6 km depth in this area with focal mechanism indicating contractional cracking of cooling rocks.

In addition to this postulated down-seepage of cold groundwater, there are some indications of declining geothermal activity in the Ölkelduháls area east of Hengill. These indications include relatively high resistivity in parts of the low-resistivity cap and the resistive core as compared to the Nesjavellir geothermal system NE of Hengill, lower gas concentration in steam than in Hengill and a temperature log in a 150 m deep well in Klambragil, south of Ölkelduháls, showing lower temperatures than expected from alteration minerals in the drill core.

VIÐAUKI

Viðnámsmæligögn

Í þessum viðauka eru birt mæligögn TEM-viðnámsmælinga frá árunum 1991 og 1992 ásamt með einvíðri túlkun þeirra. Viðnámsmæligögnin eru sýnd sem sýndarviðnám sem fall af tíma (kvaðratrót af tíma, í μs , eftir að straumur er rofinn í sendilykkju). Viðnámslökönin eru bæði sýnd tölulega sem viðnámsgildi og þykktir laga og sem stöplarit. Fyrir stöplaritin sýnir lóðréttur ás logaritma af eðlisviðnámi og láréttur ás logaritma af dýpi frá yfirborði. Heildregnir sýndarviðnámsferlar eru reiknaðir út frá því líkani sem sýnt er.

Viðnámsmæligögn og einvíða túlkun þeirra eldri Schlumbergermælinga sem stuðst er við í þessari skýrslu er að finna í mæligagnaskýrslu Gylfa Páls Hersis o.fl. 1990b og mæligögn og túlkun TEM-mælinga á Nesjavallasvæði er að finna í mæligagnaskýrslu eftir Knút Árnason o.fl. 1987b.

