



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Falgsóttar

BRENNISTEINSFJÖLL

TEM-Viðnámsmælingar

Ragna Karlsdóttir

OS-95044/JHD-06

September 1995



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 720 101

BRENNISTEINSFJÖLL
TEM-Viðnámsmælingar

Ragna Karlsdóttir

OS-95044/JHD-06

September 1995

ISBN 9979-827-62-9

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	3
2. VIÐNÁMSMÆLIADFERÐIR	3
3. FRAMKVÆMD MÆLINGA	5
4. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGA	8
4.1 Samband eðlisviðnáms og jarðhita	8
4.2 Viðnámsskipan	8
4.3 Viðnámssnið	9
4.4 Jafnviðnámskort	11
5. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	11
6. HEIMILDIR	12
VIÐAUKI I: TEM-mælingar	25
VIÐAUKI II: Túlkun viðnámsmælinga	27

MYNDIR

Mynd 1: Jarðfræðikort af Brennisteinsfjöllum	4
Mynd 2: Staðsetning TEM-mælinga í Brennisteinsfjöllum	7
Mynd 3: Lína 1, Viðnámssnið	13
Mynd 4: Lína 2, Viðnámssnið	14
Mynd 5: Lína 3, Viðnámssnið	15
Mynd 6: Lína 4, Viðnámssnið	16
Mynd 7: Lína 5, Viðnámssnið	17
Mynd 8: Lína 6, Viðnámssnið	18
Mynd 9: Lína 7, Viðnámssnið	19
Mynd 10: Lína 8, Viðnámssnið	20
Mynd 11: Lína 9, Viðnámssnið	21
Mynd 12: Efri mörk lágviðnámskápunnar	22
Mynd 13: Viðnám í 200 m hæð undir sjávarmáli	23
Mynd 14: Viðnám á 700 m dýpi undir sjávarmáli	24

TÖFLUR

Tafla 1: TEM-mælingar mældar 1992	5
Tafla 2: TEM-mælingar mældar 1993	6
Tafla 3: Eldri TEM-mælingar í nágrenni Brennisteinsfjalla	6

1. INNGANGUR

Í þessari skýrslu er greint frá niðurstöðum viðnámsmælinga í Brennisteinsfjöllum og nágrenni þeirra. Mælingar þessar eru liður í rannsókn háhitasvæðisins í Brennisteinsfjöllum, og tilheyrir verkefninu: Rannsókn á háhita vegna raforkuvinnslu. Viðnámsmælingarnar voru gerðar í tveimur áföngum árin 1992 og 1993. Síðari hluta vetrar árið 1992 voru mældar 16 mælingar og síðan unnið úr þeim. Niðurstöður mælinganna birtust í skýrslu: Brennisteinsfjöll, TEM-mælingar 1992 (Ragna Karlsdóttir, 1992). Síðari hluta vetrar 1993 var bætt við 22 mælingu og þá var mælinetið þétt yfir sjálfu háhitasvæðinu og við jaðra þess. Einnig er stuðst við nokkrar eldri mælingar úr Selvogi (Lúðvík S Georgsson, 1989) og nokkrar sem gerðar voru meðfram Bláfjallaveginum neðan Löngu- hlíðar.

Í skýrslu Jóns Jónssonar, sem fylgir jarðfræðikorti hans af Reykjanesskaga, er lýsing á jarðhita í Brennisteinsfjöllum (Jón Jónsson, 1978).

- Austan í Brennisteinsfjöllum norðanverðum, röskum 2 km norðan við Kistufell, eru fjölmörg gufuaugu í hraunum á um eins hektara svæði. Þau koma upp í tveimur misgömlum hraunstraumum og er virknin meiri í eldra hrauninu.
- Ummyndun eftir jarðhita er rétt norðan við hitasvæðið og um 1 km norðan við hitasvæðið er forn hitaskella með hveraleir og vott af brennisteins- og gipsútfellingum. Er þetta sýnilega háhitaummyndun.
- Í brekkunum norðan við Grindaskörð er talsverð jarðhitaummyndun sem virðist tengd misgengi.

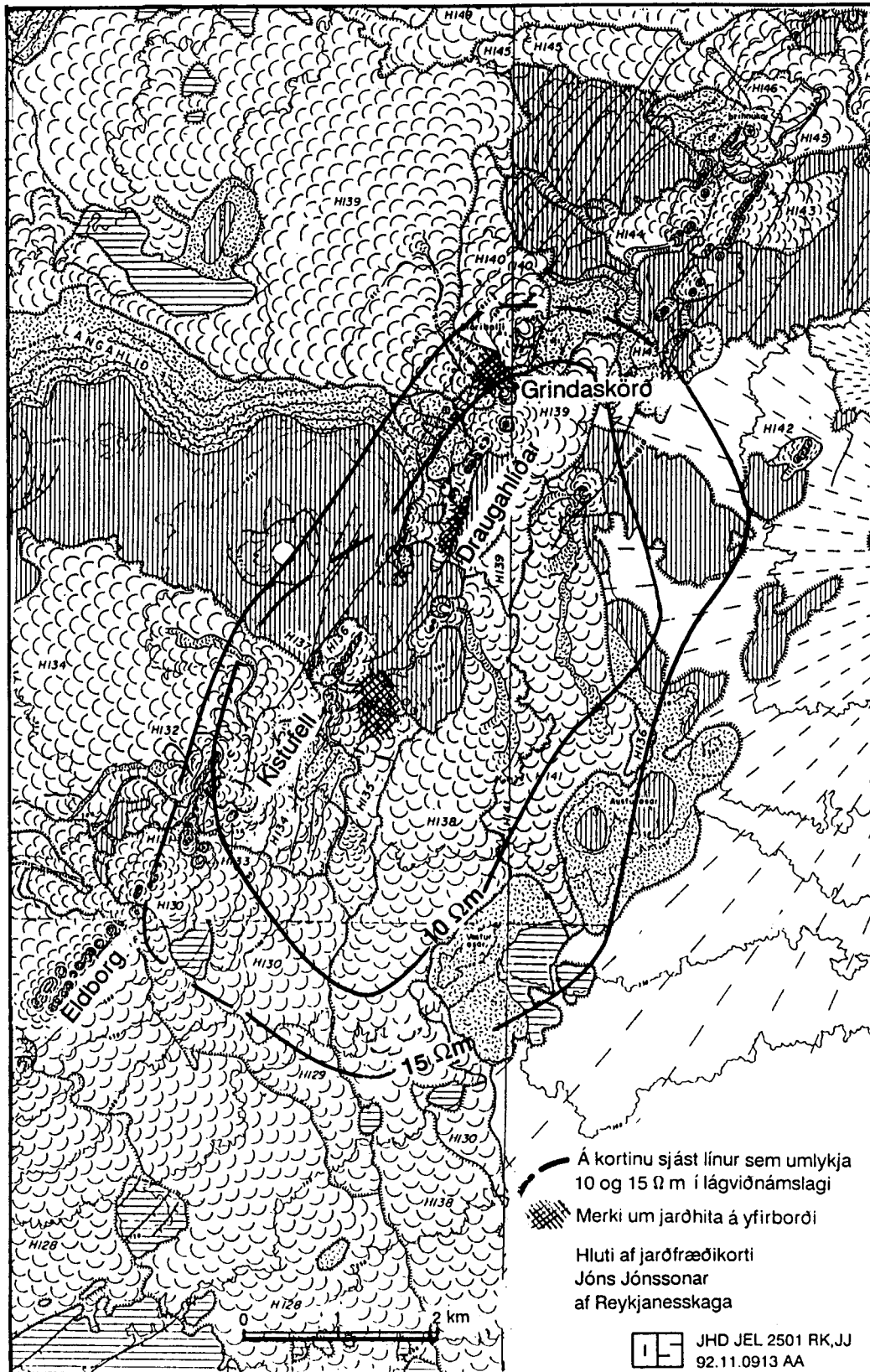
Sá hluti jarðfræðikorts Jóns Jónssonar, sem nær yfir Brennisteinsfjöll, er sýndur á mynd 1.

2. VIÐNÁMSMÆLIADFERÐIR

Viðnámsmæliaðferðum má skipta í tvo meginflokka þ.e. jafnstraumsaðferðir (direct current methods) og rafsegulaðferðir (electromagnetic methods). Í jafnstraumsaðferðum er sendur rafstraumur ofan í jörðina og mælt hversu mikið af honum hleypur í yfirborði (mældur spennunur í yfirborði). Í rafsegulaðferðum er notað tímaháð rafsegulsvið og mæld spenna (rafsvið) og/eða span (breyting í segulsviði) á yfirborði jarðar.

Fram til ársins 1988 var nær eingöngu beitt jafnstraumsaðferðum (Schlumberger-mælingum eða viðnámsniðs-mælingum) til að kanna viðnám í efsta kílómetra jarðskorpunnar hér á landi. Eftir 1988 hafa þær að miklu leyti verið leystar af hólmi með TEM-mælingum (rafsegulaðferð) með straumlykkju sem uppsprettu.

Þær mælingar sem beitt var við rannsókn í Brennisteinsfjöllum eru allar TEM-mælingar og verður þeirri mæliaðferð og túlkun þeirra lýst betur í viðauka hér á eftir.



Mynd 1: Jarðfræðikort af Brennisteinsfjöllum (Jón Jónsson 1978).

3. FRAMKVÆMD MÆLINGA

Mælt var í Brennisteinsfjöllum í tveimur áföngum eða 1992 og 1993. Fyrri hlutinn var mældur í apríl 1992. Ekið var með mælitækin í Bláfjöll og þaðan gert út á vélsleðum. Lagðar voru út 16 mælingar í neti með h.u.b.tveggja kílómetra millibili. Hnit mælinganna og hæð þeirra yfir sjó er sýnd í töflu 1. Verkið sóttist vel og voru mældar tvær mælingar á dag þá daga sem viðraði til mælinga. Mælt var með ferningslaga sendilykkju 300 m á kant í öllum mælingum. Svæðið er fjarri byggð og engar truflanir frá háspennulínum eða öðrum mannvirkjum sem geta truflað mælingarnar.

Í mars-apríl 1993 var bætt við 22 TEM-mælingum. Hnit mælinganna og hæð þeirra yfir sjó er sýnd í töflu 2. Sem fyrr var gert út frá Bláfjöllum og einungis farið á fjöll þegar veðurútlit var gott. Mælinetið var þétt yfir sjálfu háhitasvæðinu og við jaðra þess. Verkið sóttist mjög vel og voru mældar 2-3 mælingar að meðaltali á dag. Sendilykkja var í öllum tilvikum ferningslaga, 300 m á kant.

Auk mælinganna frá árunum 1992 og 1993 er hér stuðst við mælingar sem til eru frá aðliggjandi svæðum, annars vegar ÁÖ-mælingar úr Selvogi (Lúðvík S. Georgsson, 1989) og hins vegar SV-mælingar á norður- og vesturjaðri svæðisins, en þær hafa ekki verið birtar fyrr. Í töflu 3 kemur fram staðsetning þeirra í lengd og breidd og hæð yfir sjó. Staðsetning mælinganna er sýnd á mynd 2.

Tafla 1. TEM-mælingar mældar 1992.

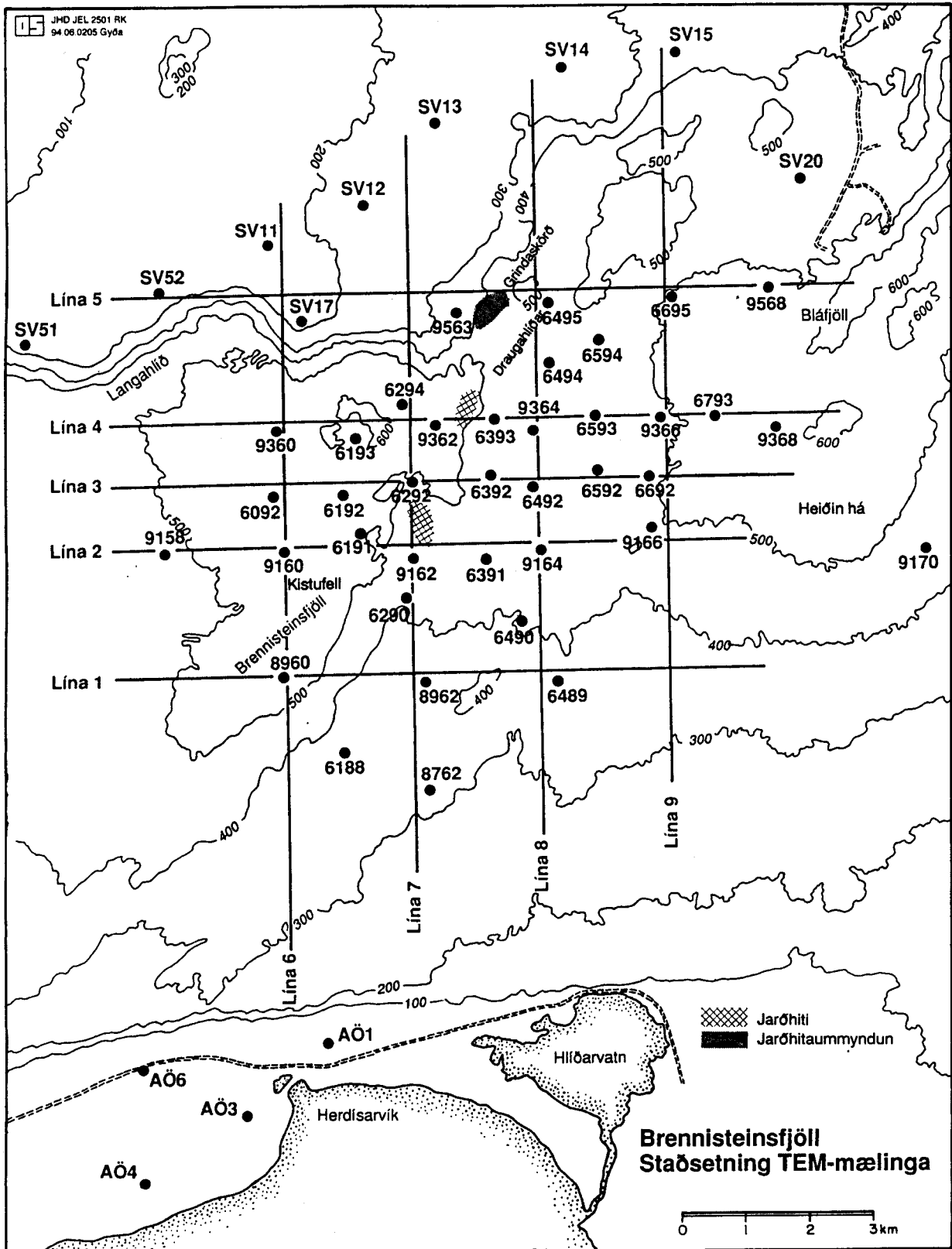
Mæling	Breidd			Lengd			Hæð yfir sjó
	Gráður	Mínútur		Gráður	Mínútur		m
B8762	63	54.535	N	21	46.253	V	320
B8960	63	55.584	N	21	48.994	V	540
B8962	63	55.530	N	21	46.341	V	370
B9158	63	56.579	N	21	51.078	V	480
B9160	63	56.631	N	21	48.995	V	550
B9162	63	56.517	N	21	46.475	V	430
B9164	63	56.636	N	21	44.110	V	400
B9166	63	56.729	N	21	42.020	V	470
B9170	63	56.628	N	21	36.706	V	450
B9360	63	57.632	N	21	49.168	V	550
B9362	63	57.709	N	21	46.062	V	570
B9364	63	57.638	N	21	44.234	V	430
B9366	63	57.720	N	21	41.598	V	500
B9368	63	57.682	N	21	39.585	V	580
B9563	63	58.531	N	21	45.432	V	350
B9568	63	58.733	N	21	39.691	V	520

Tafla 2. TEM-mælingar mældar 1993.

Mæling	Breidd			Lengd			Hæð yfir sjó
	Gráður	Mínútur		Gráður	Mínútur		m
B6092	63	56.973	N	21	49.202	V	540
B6188	63	54.711	N	21	47.822	V	360
B6191	63	56.648	N	21	47.515	V	505
B9261	63	56.986	N	21	47.833	V	540
B6193	63	57.459	N	21	47.638	V	590
B6290	63	56.108	N	21	46.626	V	410
B6292	63	56.946	N	21	46.534	V	490
B6294	63	57.743	N	21	46.687	V	570
B6391	63	56.446	N	21	45.122	V	410
B6392	63	57.148	N	21	45.030	V	430
B6393	63	57.621	N	21	44.938	V	430
B6489	63	55.392	N	21	43.711	V	355
B6490	63	55.905	N	21	44.417	V	400
B6492	63	57.027	N	21	44.233	V	420
B6494	63	58.094	N	21	43.896	V	460
B6495	63	58.608	N	21	43.896	V	450
B6592	63	57.189	N	21	42.975	V	470
B6593	63	57.635	N	21	42.975	V	480
B6594	63	58.270	N	21	42.945	V	475
B6692	63	57.121	N	21	41.994	V	480
B6695	63	58.675	N	21	41.564	V	500
B6793	63	57.635	N	21	40.675	V	530

Tafla 3. Eldri TEM-mælingar í nágrenni Brennisteinsfjalla.

Mæling	Breidd			Lengd			Hæð yfir sjó
	Gráður	Mínútur		Gráður	Mínútur		m
SV11	63	59.110	N	21	49.383	V	170
SV12	63	59.434	N	21	47.487	V	210
SV13	64	0.135	N	21	46.080	V	220
SV14	64	0.593	N	21	43.642	V	280
SV15	64	0.701	N	21	41.481	V	330
SV17	63	58.450	N	21	48.734	V	180
SV20	63	59.623	N	21	39.000	V	430
SV51	63	58.275	N	21	49.074	V	160
SV52	63	58.720	N	21	51.451	V	160
ÁÖ1	63	52.237	N	21	48.086	V	10
ÁÖ3	63	51.617	N	21	49.691	V	5
ÁÖ4	63	51.078	N	21	51.605	V	10
ÁÖ5	63	50.755	N	21	54.444	V	10
ÁÖ6	63	52.043	N	21	51.667	V	20



Mynd 2: Staðsetning TEM-mælinga í Brennisteinsfjöllum.

4. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGA

4.1 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 áruna 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. Sett- ar hafa verið fram reynslujöfnur sem lýsa áhrifum hinna einstöku þátta. Slíkar reynslu- jöfnur byggja yfirleitt á mælingum eðlisviðnáms mismunandi bergsýna við mismunandi aðstæður.

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

Samanburður á eðlisviðnámi og berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu sýndi að eðli- sviðnámið 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 hærra en í smektít-zeólítabeltinu. Ekki sást afgerandi fylgni milli berggerðar (basalthrauna/móbergs) og eðlisviðnáms. Ekki verður þó af því dregin sú ályktun að viðnámið sé óháð poruhluta, heldur frekar hitt að áhrif ummyndunar yfir- gnæfi áhrif poruhluta. Reyndar er hugsanlegt að viðnámsþækkunin í klórítbeltinu sé að hluta til vegna minnkandi poruhluta.

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).

Í háhitakerfum mettudum 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.).

4.2 Viðnámsskipan

Allar TEM-mælingarnar eru túlkaðar með einvíðri túlkun eins og lýst er í viðauka. Við- námsskipan utan jarðhitasvæðisins er þannig:

- Í yfirborðin er hátt viðnám 4000-6000 Ω m í efstu tugum eða hundruðum metra.
- Fyrir neðan er lag með 200-500 Ω m viðnámi og er 400-700 metra þykkt þar sem áhrifa háhitasvæðisins gætir ekki. Á norð-vestur hluta svæðisins er þykkt lag með 1000-1200 Ω m viðnámi á milli yfirborðslagsins og þessa lags.
- Neðst, eða á -400 til -700 metra dýpi undir sjó, er svo lag með 30-80 Ω m viðnámi sem virðist vera djúpviðnám á þessu svæði þ.e. viðnám ótruflað af hitaáhrifum frá háhitakerfinu.

Viðnámslækkunin sem verður neðan við háviðnámið í yfirborði endurspeglar grunnvatnsborð. Verkfræðistofan Vatnaskil hefur gert reiknilíkan af grunnvatnsrennsli á þessu svæði (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1991). Ef niðurstöður viðnámsmælinganna eru bornar saman við grunnvatnsborð samkvæmt reiknaða líkaninu sést að það fellur nærri áður nefndum viðnámskilum. Á viðnámsniðunum á myndum 3 til 11 er grunnvatnsborðið samkvæmt reiknilíkaninu merkt með stjörnu við hverja mælingu. Þá sést enn fremur að þessi samsvörun er ekki innan háhitasvæðisins og þar sem áhrifa þess gætir enda gerir reiknilíkanið ekki ráð fyrir háhitasvæðinu.

Háhitasvæðið sjálf kemur fram sem **lágviðnámskápa** með minna en 10 Ω m viðnámi og **háviðnámskjarni** undir. Eins og frá er skýrt í viðauka endurspeglar viðnámið í háhitasvæðinu ummyndun þess. Þannig sýnir lágviðnámskápan belti, þar sem smektít og zeolítar eru ráðandi ummyndunarsteindir. Sé jafnvægi á milli ummyndunar og hitastigs þýðir þetta hitastig á bilinu 50 -200° C. Háviðnámskjarninn endurspeglar belti þar sem klórít er ráðandi ummyndunarsteind. Þetta þýðir hitastig um eða ofan við 240° C. Afgerandi hækkun í viðnámi neðan lágviðnámskápunnar er einnig vísbending um að háhitakerfið sé ferskvatnskerfi ólíkt því sem við á um háhitasvæðin utar á Reykjanesskaga. Þar er selta jarðhitavökvans ráðandi þáttur í leiðninni í klórít-beltinu og viðnámsþækkun verður lítil neðan lágviðnámskápunnar.

Utan á lágviðnámskápunni er svo lag með 12-25 Ω m viðnámi en þar fyrir utan er svo djúpviðnám. Háviðnámskjarninn og lágviðnámskápan utan á honum mynda vel afmarkaðan topp, lítið eitt aflangan, með NA-SV stefnu eða sömu stefnu og sprungur og misgengi á svæðinu. Hæsti toppurinn á lágviðnámskápunni er í mælingu B9162 á 80 metra dýpi (B9162 er í 430 m y.s og toppurinn er því í 350 m y.s.). B9162 er staðsett um 1,5 km NA af Kistufelli þar sem mest ummerki eru um jarðhita á yfirborði.

4.3 Viðnámsnið

Nokkur snið eru teiknuð í gegnum jarðhitasvæðið til þess að bera saman viðnámskipan innan háhitakerfisins og utan þess þar sem áhrifa jarðhitans gætir ekki. Lega sniðanna er sýnd á mynd 1 og hvert snið fyrir sig er dregið upp á myndum 3-11.

Lína 1 (mynd 3) liggur A-V yfir Brennisteinsfjöll og Vesturása. Sniðið sker háhitasvæðið á nokkru dýpi því toppur lágviðnámskápunnar er þarna á um 600 m dýpi (230 m.y.s.). Mælingar sem eru 1-2 km sunnan við línuna eru utan háhitasvæðisins. Aðeins ein mæling (B8962) sér lágviðnámskápana en mælingar austan og vestan við

skera 10-30 Ω m viðnámið sem liggur gjarnan utan á lágviðnámskápunni. Sniðið virðist því sneiða suðurenda háhitasvæðisins. Efstu 500 metrar í sniðinu sýna ótruflað hávið-nám.

Lína 2 (mynd 4) liggur A-V um Hvalhnúka og um 1 km norðan Kistufells. Hér gengur háhitasvæðið eins og fleygur upp undir yfirborð og er toppur lágviðnámskápunnar á 80 m dýpi (350 m y.s.) í B9162. Efsti toppur lágviðnámskápunnar hefur 3 Ω m viðnám en fyrir neðan tekur við 500-600 m þykk lágviðnámskápan með 5-6 Ω m viðnámi. Hávið-námskjarninn nær upp í 300 m u.s. eða á um 750 m dýpi. Ótrufluð viðnámsskipan sést vestan og austan við háhitasvæðið og viðnámslögin þynnast síðan og leggjast eins og skæni utan á lágviðnámskápuna. Mælingin B9162 er einmitt á þeim stað þar sem mest ummerki um jarðhita sjást á yfirborði.

Lína 3 (mynd 5) liggur A-V, 1 km norðan við línu 2. Hér hefur dýpkað á topp lágvið-námskápunnar um 200 metra (150 m y.s.) frá línu 2 en toppur háviðnámskjarnans nær upp í 220 m u.s. og er hæstur hér. Að öðru leyti er viðnámsskipan lík og í línu 2.

Lína 4 (mynd 6) liggur A-V yfir Draugahlíðar 1 km norðan við línu 3. Hér er lágvið-námskápan um 300 m neðar en í línu 3 og háviðnámskjarninn um 500 m neðar en í línu 3. Viðnámsskipan er sú sama og í línunum á undan.

Lína 5 (mynd 7) er nyrsta A-V sniðið og liggur norðan undir Lönguhlíð, yfir Grindaskörð og yfir hátopp Bláfjalla. Í þessu sniði er lágviðnámskápan komin niður á 300 m u.s. og sniðið sker hana þar sem dýpkar hratt á hana til norðurs. Þetta sést betur á N-S sniðunum. Toppur lágviðnámskápunnar er á 500-600 m dýpi undir Grindaskörð-um, en þar sjást merki um háhitaummyndun á yfirborði (Jón Jónsson, 1978).

Lína 6 (mynd 8) er vestasta N-S sniðið og liggur allt frá Skúlatúnshrauni, norðan Lönguhlíðar og suður að Herdísarvík. Sniðið rétt nartar í hitasvæðið að vestanverðu og það glyttir í 10 Ω m viðnám neðst í mælingu B6092. Mælingarnar í Herdísarvík bera allar merki sjávaráhrifa og er ekki hægt að tengja þær við mælisvæðið í Brennisteinsfjöllum enda eru 5 km fjarlægð í milli mælinga í Herdísarvík og mælisvæðisins í Brennisteinsfjöllum.

Lína 7 (mynd 9) liggur N-S 2 km austar og liggur yfir virkasta yfirborðsjarðhitann, eins og lína 2. Hér nær lágviðnámskápan upp undir yfirborð eins og í línu 2 og hér sést líka að háviðnámskjarninn er hæstur (220 m u.s.) um 1 km norðan við aðalhitasvæðið eins og fjallað var í línu 3.

Lína 8 (mynd 10) liggur N-S 2 km austan við línu 7. Hér er háviðnámskjarninn kominn niður á 900 m u.s. og lágviðnámskápan þykk því sniðið sker hana þar sem hún er á nið-urleið í austur. Viðnámsskipan er ótrufluð í efstu 500 metrum sniðsins.

Lína 9 (mynd 11) liggur N-S 2 km austan við línu 8 og er nánast komin út fyrir jarðhitasvæðið en rétt gryllir í lágviðnámskápuna niður á 1000 m u.s.

Af þessum sniðum sést að háhitasvæðið í Brennisteinsfjöllum er vel afmarkað. Eins og lýst er hér að framan er viðnámsskipan utan háhitasvæðisins mjög regluleg.

Háhitasvæðið sjálf fleygast svo upp í þessa viðnámskipan, viðnámslögin þynnast og leggjast utan á háhitasvæðið sem er líkt og aflangur hryggur með NNA-SSV stefnu. Háhitasvæðið ákvarðast af háviðnámskjarna og lágviðnámskápu utan á honum. Lágviðnámskápan hefur viðnám $< 10 \Omega\text{m}$ og utan á hana leggst oft lag með $10\text{-}30 \Omega\text{m}$ viðnámi. Mynd 12 sýnir dýpi á efri mörk lágviðnámskápunnar (m y.s.) og kemur þar vel fram lögunin á hitasvæðinu.

4.4 Jafnviðnámskort

Til nánari glöggvunar á stærð háhitasvæðisins eru teiknuð tvö jafnviðnámskort, sem sýna viðnám á 200 m og 700 m dýpi undir sjávarmáli. Viðnámskort á 200 m u.s. (mynd 13) sker topp lágviðnámskápunnar ofan háviðnámskjarnans. Lágviðnámskápan myndar aflangt svæði með NNA-SSV stefnu. Á viðnámskortinu sem sýnir viðnámið á 700 m u.s. (mynd 14) er lágviðnámsvæðið orðið um 18 ferkílómetrar að flatarmáli og teygir sig lengra til NNA og SSV. Stefnan er hin sama og sprungustefnan á svæðinu, sem teiknuð er upp eftir jarðfræðikorti Jóns Jónssonar (mynd 1) og sett inn á mynd 14.

Háhitasvæðið er vel afmarkað með háu viðnámi á alla vegu nema til suðurs. Ekki er hægt að tengja mælingarnar í Brennisteinsfjöllum við mælingar í Herdísarvík og kemur þar tvennt til. Annars vegar of mikil fjarlægð á milli og hins vegar bera mælingarnar í Herdísarvík merki sjávaráhrifa. En lágt viðnám til suðurs frá háhitasvæðinu getur verið vísbending um afrennsli frá því til suðurs eða suð-suðvesturs í sprungustefnu svæðisins.

5. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

- Viðnámsmælingar með TEM-aðferð í Brennisteinsfjöllum gefa mjög skýra mynd af háhitasvæði sem einkennist af háviðnámskjarna og lágviðnámskápu utan á honum. Lágviðnámskápan rís hæst, í um það bil 350 m y.s. í mælingu B9162. Hún er staðsett þar sem mest jarðhitaummerki eru á yfirborði, um 1,5 km NA af Kistufelli. Háviðnámskjarninn er þarna á um 500 m u.s. en hann rís hæst í 350 m u.s. um 2 km norðar eða í mælingu B6292.
- Að því tilskildu að jafnvægi sé á milli ummyndunar bergsins og núverandi hitaástands svarar lágviðnámskápan til smektít-zeolítabeltisins með hitastig á bilinu $50\text{-}200^\circ \text{C}$. Háviðnámskjarninn endurspeglar klórítbeltið með hitastig um eða yfir 240°C .
- Stærð jarðhitasvæðisins má meta af stærð lágviðnámsvæðisins á mynd 14. Þar er lágviðnámsvæðið á 700 metra dýpi undir sjávarmáli um 18 ferkílómetrar sem er sambærilegt við stærð Námafjallssvæðisins.
- Líklegasta uppstreymissvæði er samkvæmt þessum mælingum um 1,5 - 2,5 km norð-austur af Kistufelli og líklegt er að hitastig á 700 - 800 metra dýpi þar sé um eða yfir 240°C ef jafnvægi er á milli ummyndunar og núverandi hitaástands.

- Háviðnámskjarninn gefur vísbendingu um að jarðhitakerfið sé ferskvatnskerfi en ekki mettað söltu vatni eins og jarðhitakerfin á utanverðum Reykjanesskaga s. s. Svartsengi og Reykjanes.
- Lágt viðnám til suðurs frá háhitasvæðinu getur bent til afrennslis frá því í suðurátt.

6. HEIMILDIR

Hjalti Fransson, 1988: *Borholujarðfræði. Vatnsgengd í jarðhitageymi*. Orkustofnun, OS-88046/JHD-09, 58 s.

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

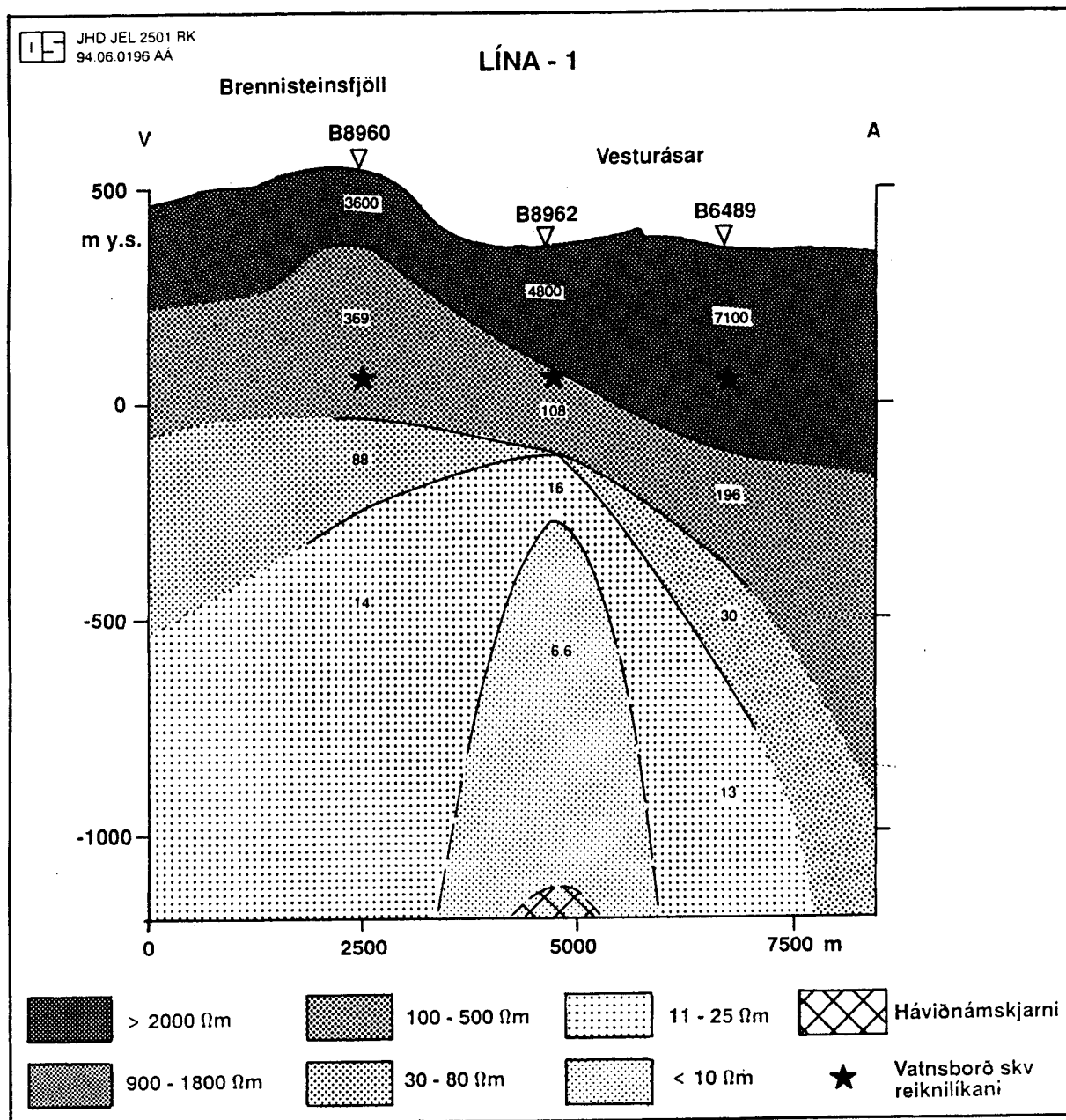
Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: *Nesjavellir - Ölkelduháls. Yfirborðsrannsóknir 1986*. Orkustofnun, OS-87018/JHD-02, 112 s.

Jón Jónsson, 1978: *Jarðfræðikort af Reykjanesskaga*. Skýrsla Orkustofnunar, OS JHD 7831.

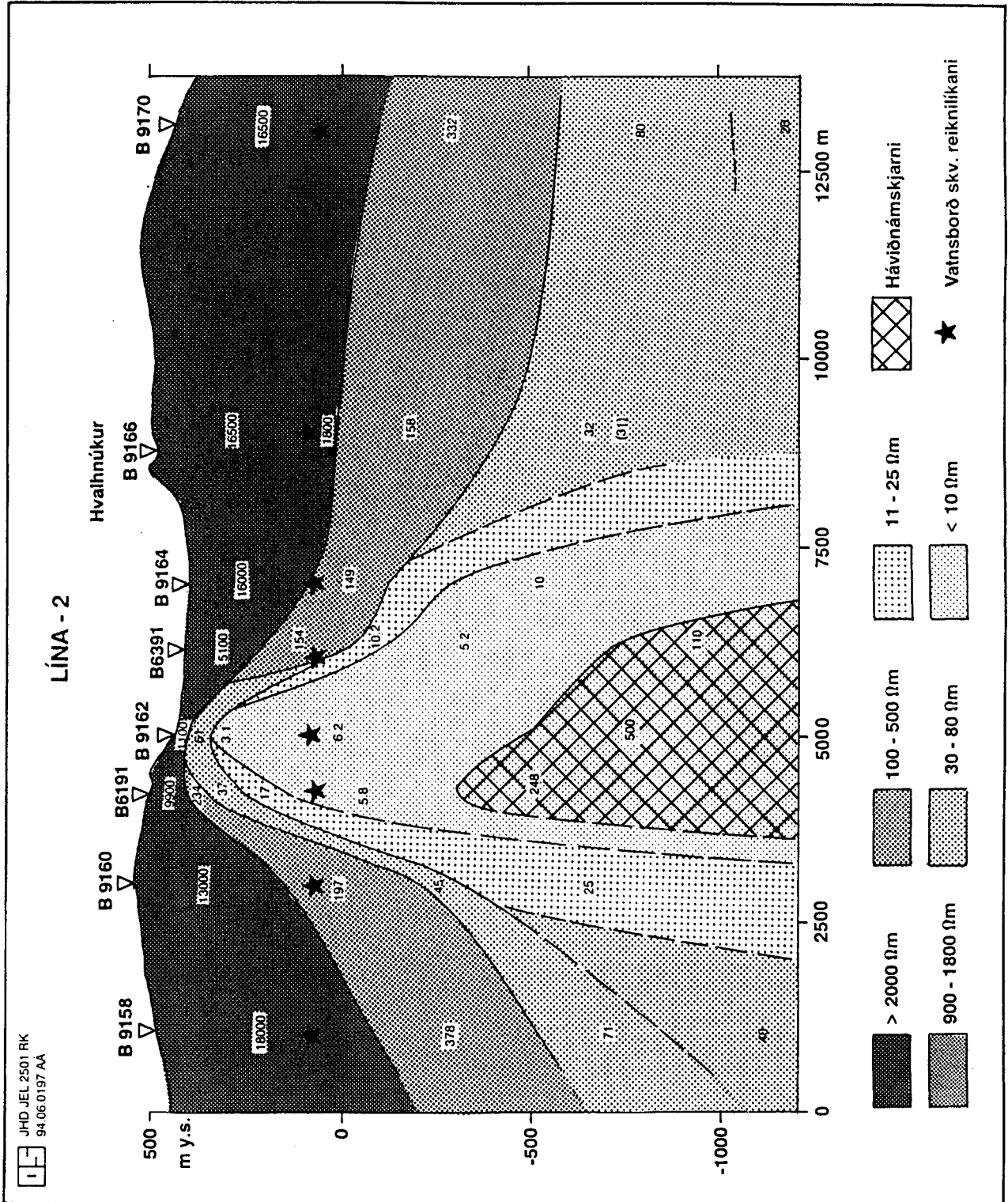
Lúðvík S. Georgsson, 1989: *Viðnámsmælingar á suðurströnd Reykjanesskaga. Sérverkefni í fiskeldi 1988 og 1989*. Orkustofnun, OS-89053/JHD-25 B, 18 s.

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

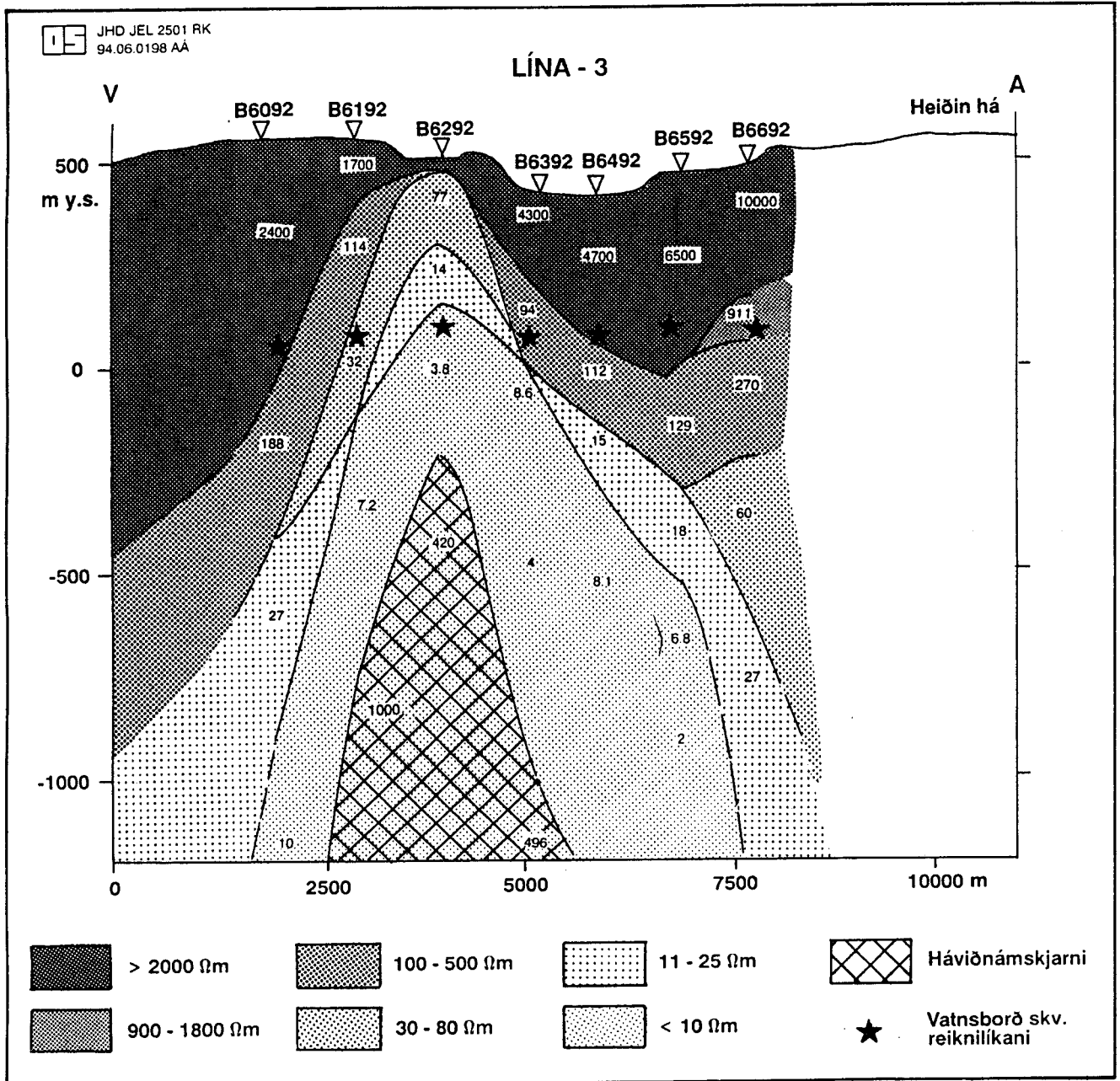
Ragna Karlsdóttir, 1992: *Brennisteinsfjöll, TEM-mælingar 1992*. OS-92051/JHD-27 B, 20 s.



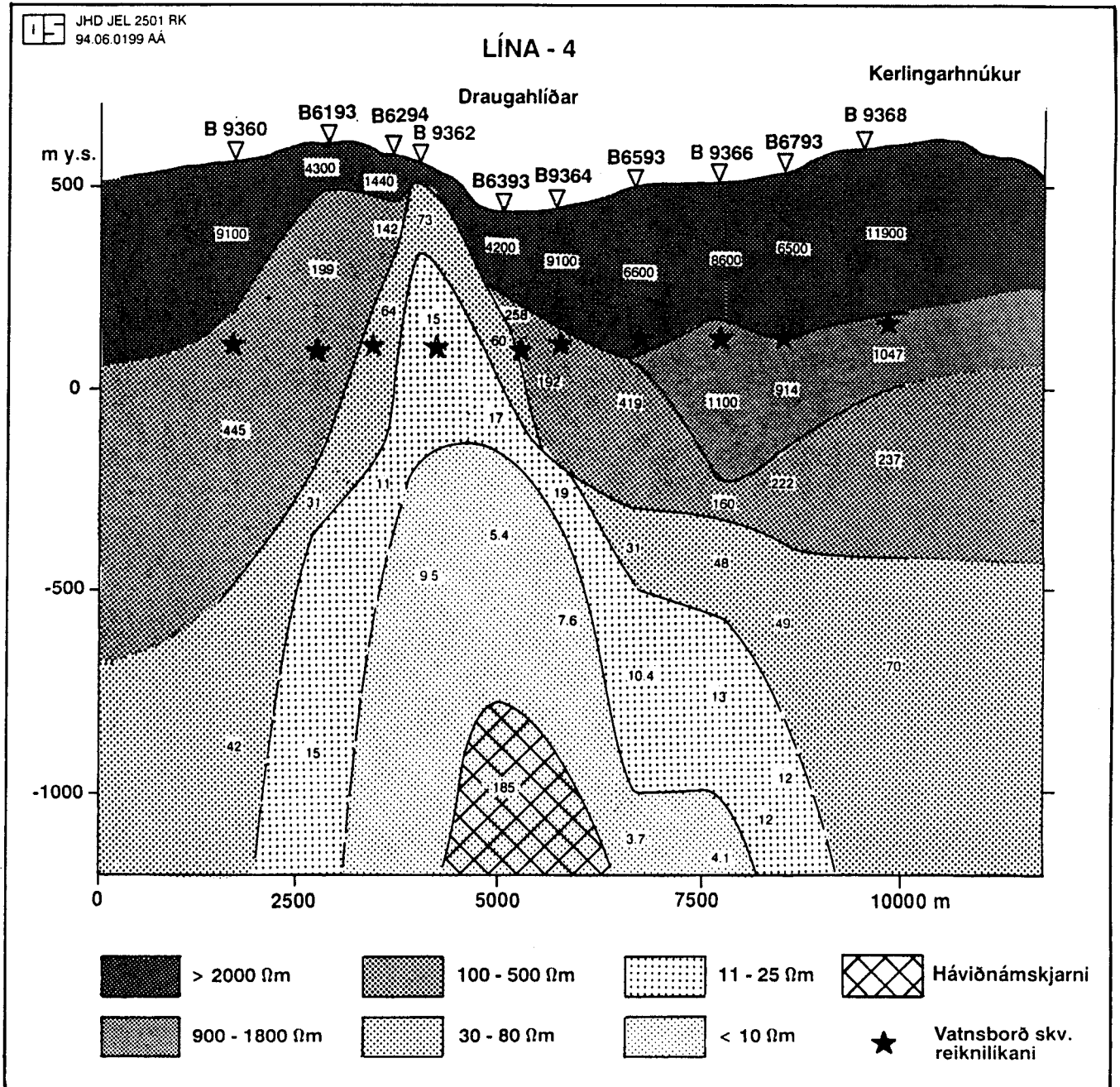
Mynd 3: Lína 1, Viðnámsnið.



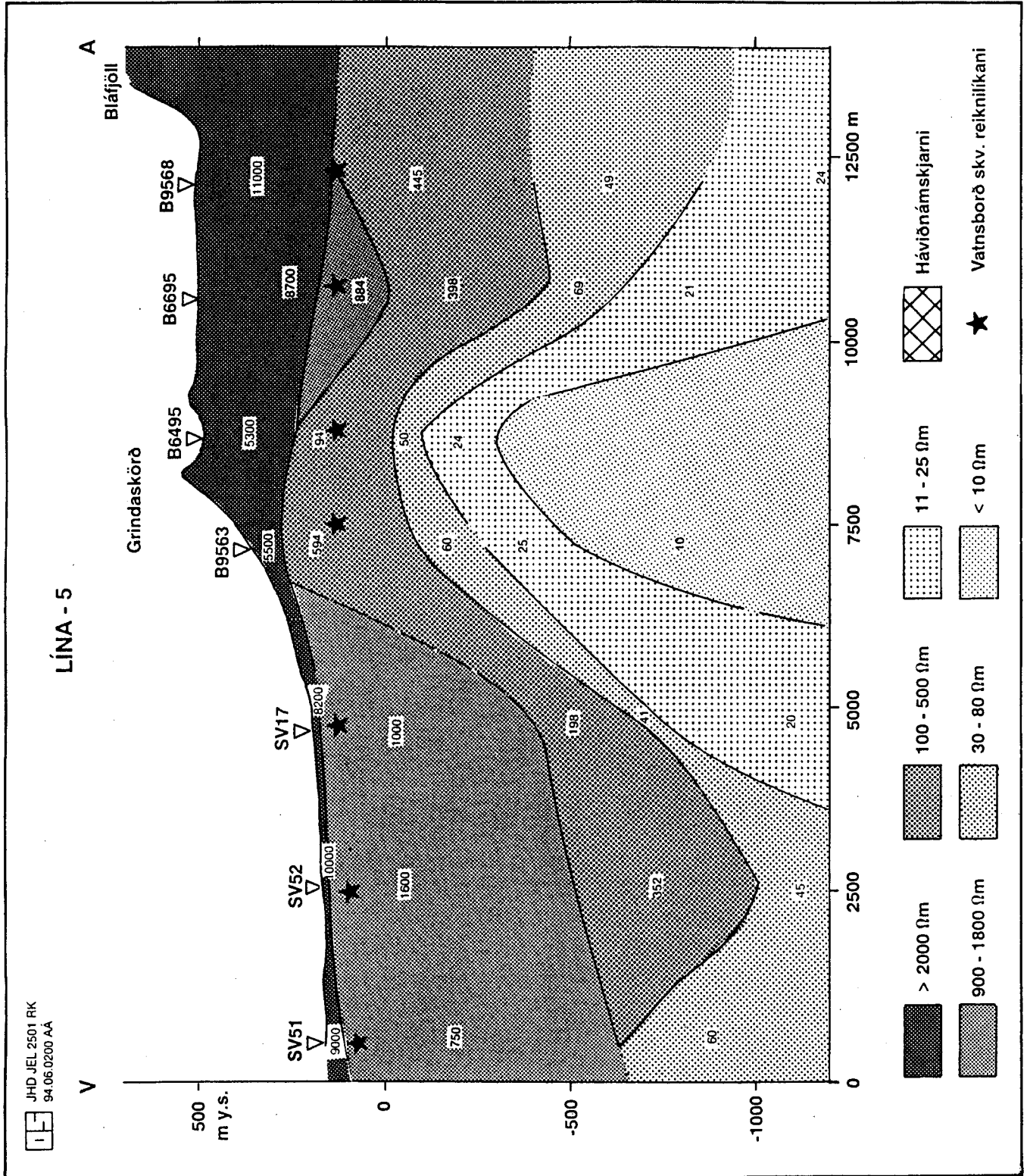
Mynd 4: Lína 2, Viðnámsnið.



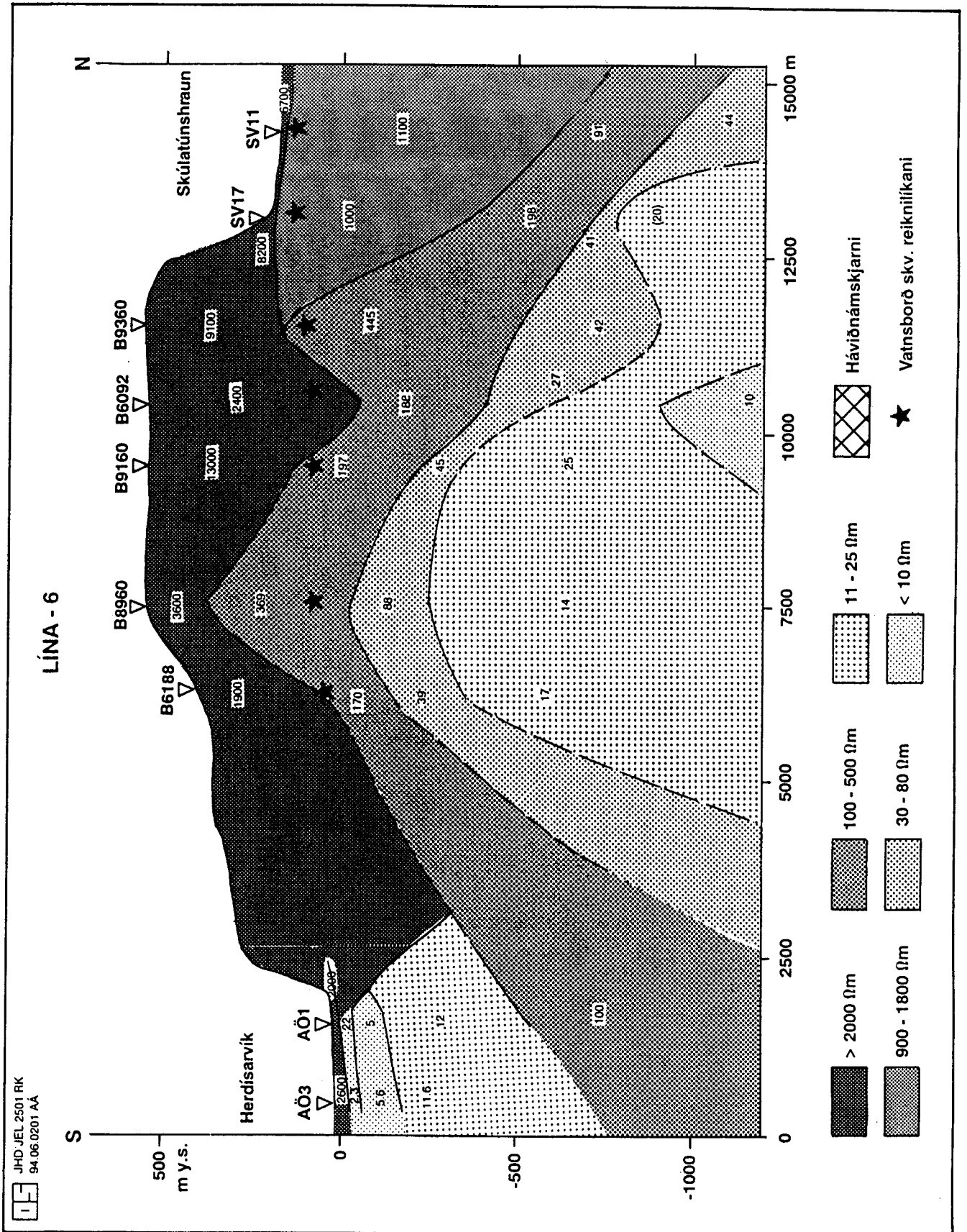
Mynd 5: Lína 3, Viðnámsnið.



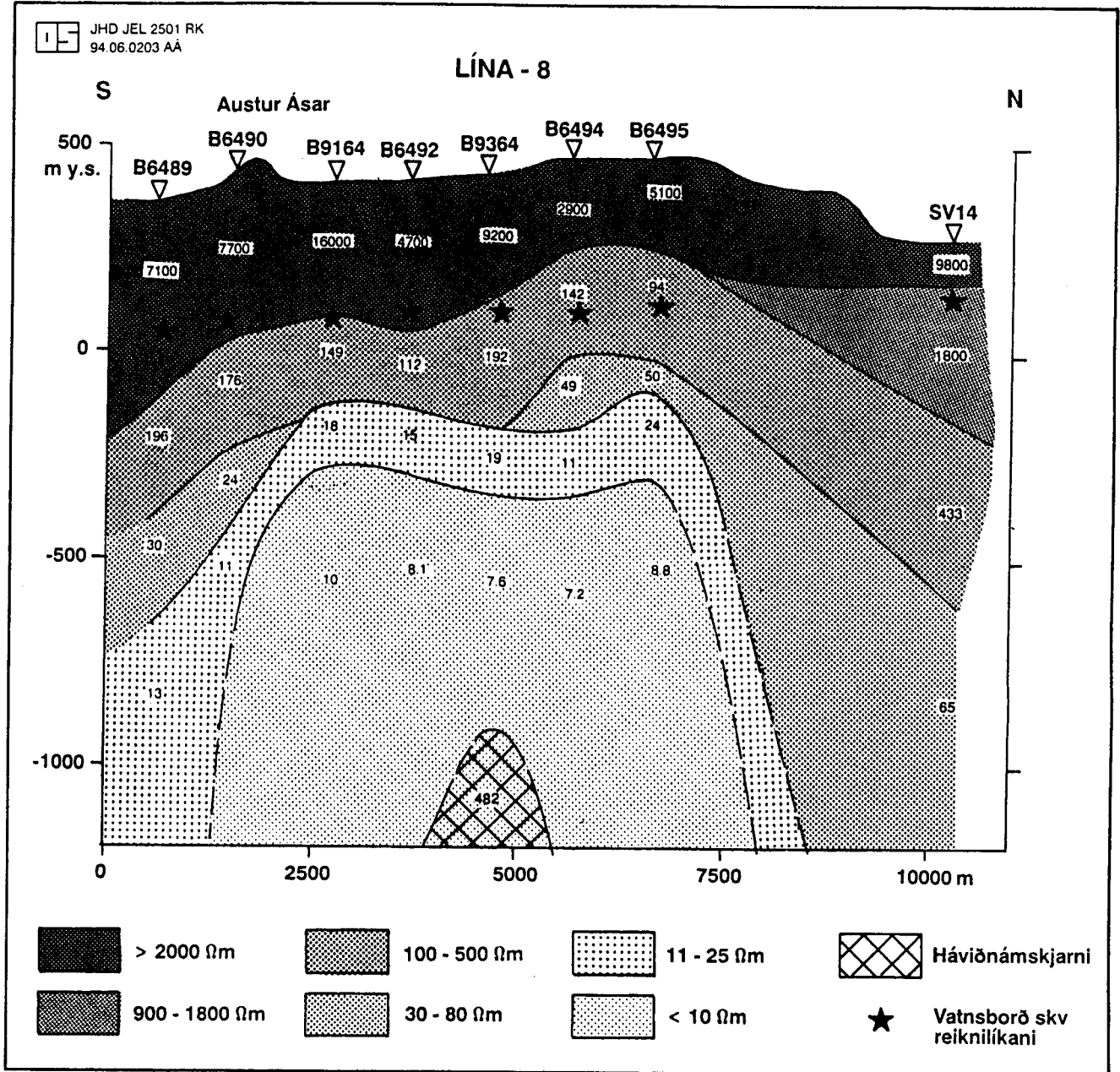
Mynd 6: Lína 4, Viðnámsnið.



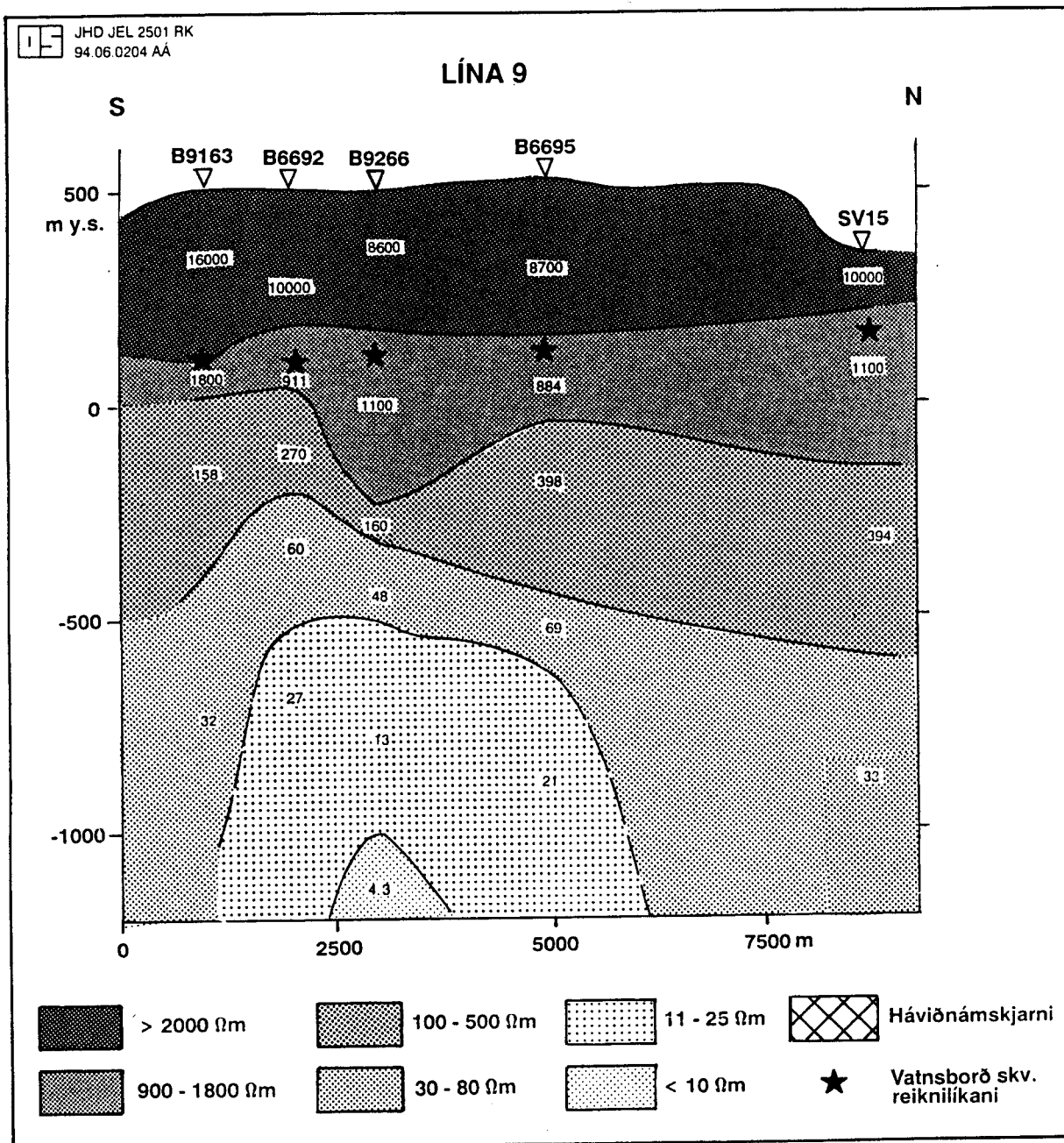
Mynd 7: Lína 5, Viðnámsnið.



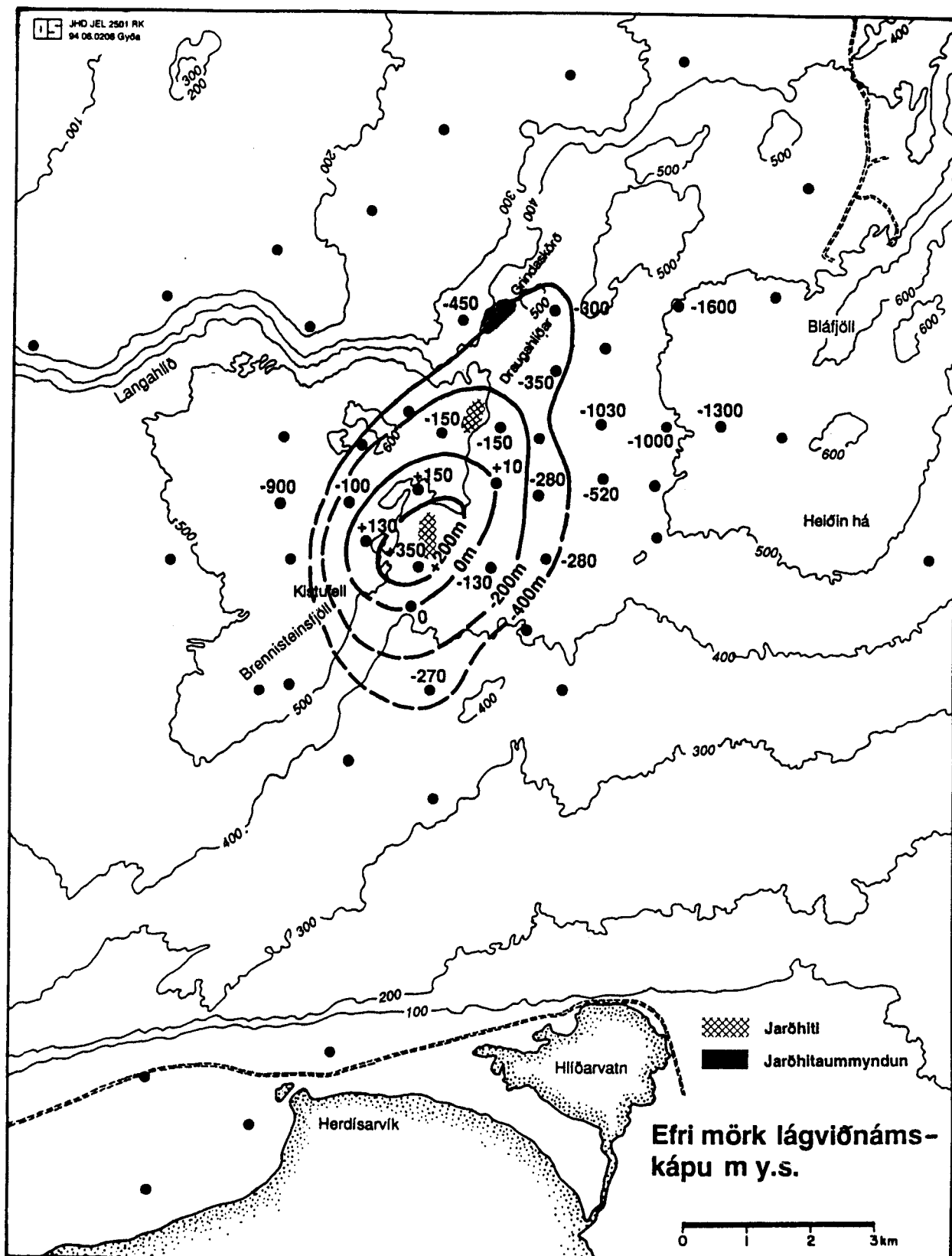
Mynd 8: Lína 6, Viðnámsnið.



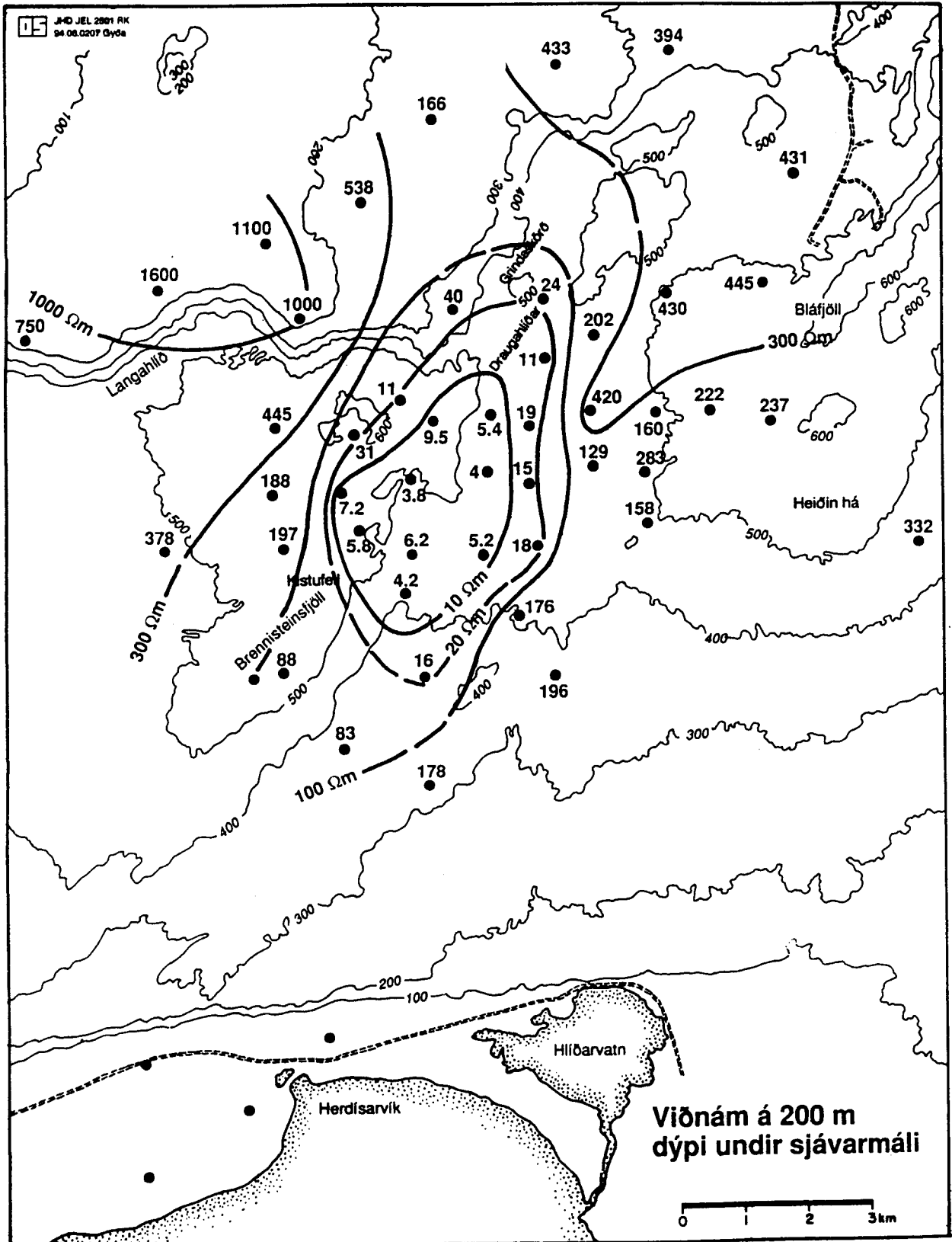
Mynd 10: Lína 8, Viðnámsnið.



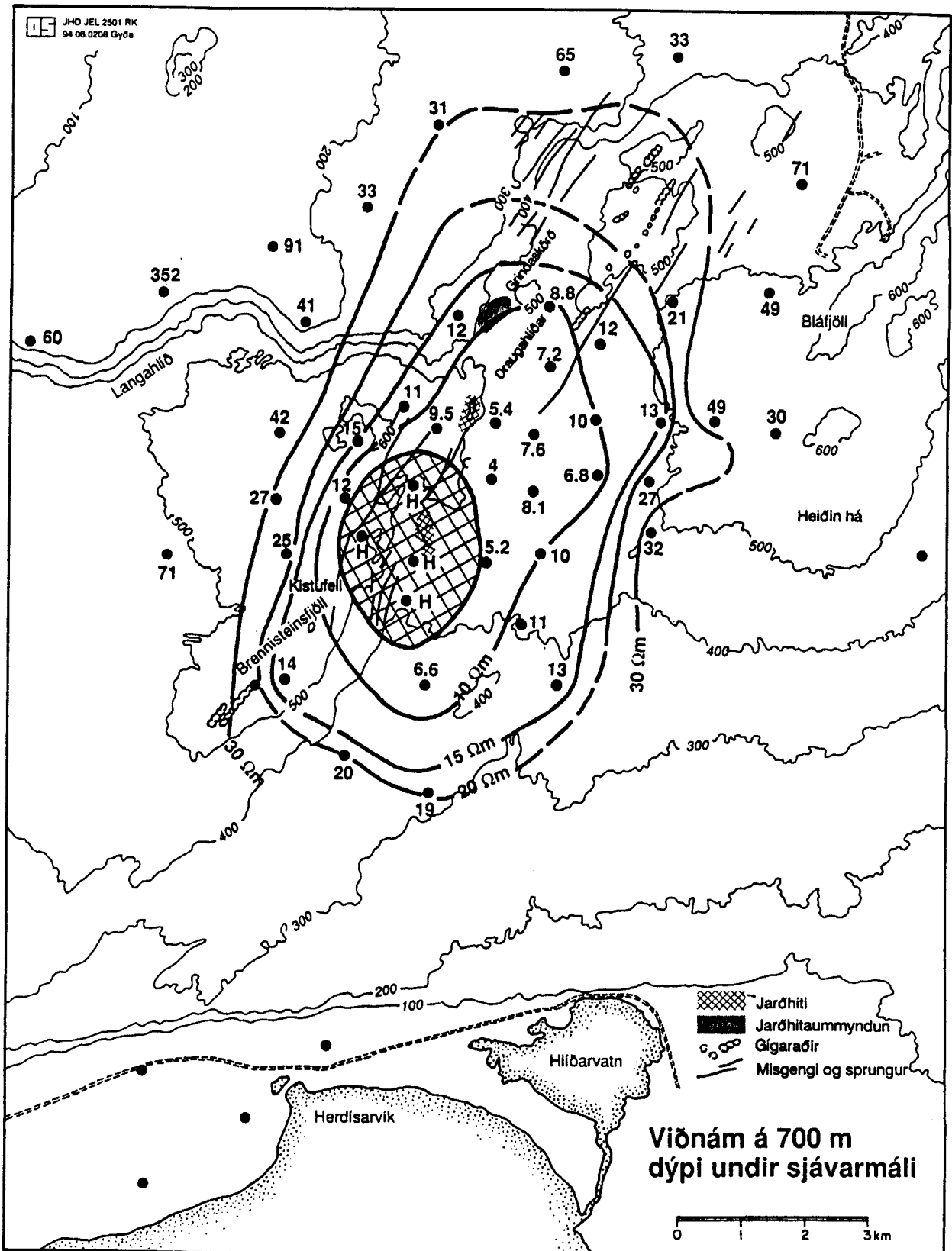
Mynd 11: Lína 9, Viðnámsnið.



Mynd 12: Efri mörk lágviðnámskápunnar.



Mynd 13: Viðnám í 200 m hæð undir sjávarmáli.



Mynd 14: Viðnám á 700 m dýpi undir sjávarmáli.

VIÐAUKI I: TEM-mælingar

Knútur Árnason hefur tekið saman greinagóða lýsingu á TEM-mælingum og túlkun þeirra sem mun birtast í skýrslu um viðnámsmælingar á Kröflusvæði (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1994) og fer hún hér á eftir.

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

TEM-mælingar (transient electromagnetic) með straumlykkju sem uppsprettu eru mælingar þar sem rafsegulsviðið er gert af manna völdum. Lögð er 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 dofna. Við það spanast straumar í jörðinni sem leitast við að viðhalda segulsviðinu. Eftir því sem lengra líður frá því að straumurinn var rofinn ná spanstraumarnir dýpra í jörðu og segulsviðið á yfirborði dofnar. Hnignun segulsviðsins er mæld með því að mæla span í spólu í miðju sendilykkjunnar. Út frá styrk spansins í móttökuspólunni, sem fall af tíma, má síðan ákvarða eðlisviðnám undir mælistað, sem fall af dýpi (Knútur Árnason 1989).

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

(Knútur Árnason, 1987 og 1990). Vonast hafði verið til þess að TEM-mælingarnar hefðu meiri dýptarskynjun en Schlumbergermælingar, en í ljós kom að hún var mjög sambærileg.

TEM-mælingar hafa þann ótvíræða kost fram yfir jafnstraumsmælingar að ekki þarf að senda straum ofan í jörðina. Það er oft mikið vandamál að koma nægilegum straumi til jarðar í jafnstraumsmælingum á svæðum þar sem jarðvegur og gróður er lítill. Þetta gerir ennfreður 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.

VIÐAUKI II: Túlkun viðnámsmælinga

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

Einvíð túlkun gerir ráð fyrir því að viðnám breytist einungis með dýpi (eina átt), en ekki í láréttar stefnur. Gert er ráð fyrir því að jörðinni undir mælistað megi skipta upp í endanlega mörg lárétt lög með mismunandi eðlisviðnámi. Túlkunarmaður velur 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. 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 og hefur fæst viðnámslög.

Að lokinni framtúlkun mælinganna eru teiknuð viðnámsnið og viðnámslíkön nærliggjandi mælinga borin saman. Á þessu stigi er túlkunin oft samræmd þ.e. aðlægar mælingar hafi sama fjölda viðnámslaga en þó aldrei slakað á kröfum um gæði túlkunarinnar og að reiknaður líkanferill falli að mælda ferlinum.

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

Knútur Árnason, 1984 :*The effect of finite potential electrode separation of Schlumberger soundings*. 54th Annual International SEG Meeting, Atlanta. Extended Abstracts, bls. 129-132.

Knútur Árnason, Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Gylfi Páll Hersir, 1987a: *Resistivity Structure of High-Temperature Geothermal Systems in Iceland*.

International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) XIX General Assembly, Vancouver, Kanada, 9.-22, ágúst. Abstracts V.2: 447.

Knútur Árnason, 1989: *Central-Loop Transient ElectroMagnetic Sondings over a Horizontally Layered Earth*. Orkustofnun, OS-89032/JHD-06, 128 s.

Knútur Árnason, 1990: *Central-loop Transient ElectroMagnetic Soundings in Geothermal and Ground Water Exploration, A Step Forward*. Geothermal Resource Council TRANSACTIONS, Vol. 14, Part II, 845-851.

Knútur Árnason, 1993: *JARÐHITI Á ÖLKELDUHÁLSSVÆÐI. Viðnámsmælingar 1991 og 1992*. Orkustofnun, OS-93037/JHD-10, 82 s.

Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988: *Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings*. Geophysics, v. 53. bls. 1459-1468.

