

ÚTLÁN
Bókasafn Orkustofnunar



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

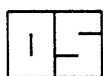
**TEM-viðnámsmælingar
á utanverðum
Reykjanesskaga**

Ragna Karlsdóttir

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

1997

OS-97001



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 232

**TEM-VIÐNÁMSMÆLINGAR
Á UTANVERÐUM REYKJANESSKAGA**

Ragna Karlsdóttir

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

OS-97001

Apríl 1997

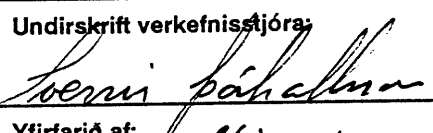
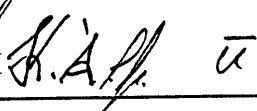
ISBN 9979-827-88-2

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 5688896
Netfang os@os.is - Heimasíða <http://www.os.is>

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

Skýrsla nr.: OS-97001	Dags.: Apríl 1997	Dreifing: <input type="checkbox"/> Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð til: Apríl 2002
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: TEM-VIÐNÁMSMÆLINGAR Á UTANVERÐUM REYKJANESSKAGA	Upplag: 20	
	Fjöldi síðna:	
Höfundar: Ragna Karlsdóttir	Verkefnisstjóri: Sverrir Þórhallsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Mat á útbreiðslu háhita, framhaldsrannsókn	Verknúmer: 630 232	
Unnið fyrir: Hitaveitu Suðurnesja		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Skýrslan greinir frá niðurstöðum TEM-viðnámsmælinga á utanverðum Reykjanesskaga árið 1996. Tilgangurinn var að leita að ummerkjum um háhitasvæði í Sandvík og við Fagradalsfjall og afmarka háhitasvæðið á Reykjanesi. Mælingarnar sýna víðáttumikið háhitasvæði sem nær yfir allt Reykjanesið neðan 300 m dýpis og er vel afmarkað til austurs en nær út í sjó í suður og vesturátt. Mælingarnar sýna háhitaummyndun í Sandvík en frekari könnun á því svæði var einn megingilgangur verksins. Ef jafnvægi ríkir milli ummyndunar og núverandi hitaástands er hér um aðskilið háhitasvæði að ræða, en slíkt verður að ákvarða með borun. Mælingar við Fagradalsfjall staðfestu ekki lágt viðnám vestan við fjallið. Rannsóknin sýnir einnig að unnt er að sjá mörk háhitaummyndunar í söltum jarðhitakerfum, en slíkt var ekki hægt með eldri mælingum.		
Lykilorð: Háhitasvæði, jarðhitarannsóknir, jarðhitaleit, viðnámsmælingar, ummyndun	ISBN-númer: ISBN 9979-827-88-2	
	Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Ytirtarið af: KÁ, SP og PI 	

ÁGRIP

Rannsóknir með TEM-viðnámsmælingum á utanverðum Reykjanesskaga árið 1996 sýna víðáttumikið háhitasvæði á Reykjanesi. Háhitasvæðið nær yfir allt Reykjanesið neðan 300 metra dýpis og er vel afmarkað til austurs en nær út í sjó í suður og vestur-átt.

Mælingarnar sýna háhitaummyndun í Sandvík. Ef jafnvægi ríkir á milli ummyndunar og núverandi hitaástands er hér um aðskilið háhitasvæði að ræða. Slíkt verður þó aðeins ákvarðað með borun.

Mælingar við Fagradalsfjall staðfestu lágt viðnám austan fjallsins, SV af Sandfelli, en hins vegar sýndu þær ekki lágt viðnám vestan við Fagradalsfjall.

Rannsóknin sýndi einnig, að unnt er að sjá mörk háhitaummyndunar í söltum jarðhita-kerfum en slíkt var ekki hægt með eldri mælingum.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA	6
3. FRAMKVÆMD MÆLINGA	7
4. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA	12
4.1 Viðnámsnið	13
4.2 Jafnviðnámskort	14
4.3 Jarðsjór	15
5. NIÐURSTÖÐUR	31
5.1 Reykjanes	31
5.2 Eldvörp	32
5.3 Sandvík	32
5.4 Fagradalsfjall	33
5.5 TEM-mælingar í söltu umhverfi	33
5.6 Lokaorð	33
6. HEIMILDIR	43
ENGLISH SUMMARY	45
VIÐAUKI 1: TEM-mælingar og túlkun þeirra	47
VIÐAUKI 2: Mæliferlar og túlkun	50

TÖFLUR

Tafla 1. Hnit og hæð TEM-mælinga á Reykjanesi 1996	11
Tafla 2. Hnit og hæð TEM-mælinga á Reykjanesi 1991 og 1996	12

MYNDIR

Mynd 1. Staðsetningarkort	9
Mynd 2. Viðnámssnið 1, 2 og 3	17
Mynd 3. Viðnámssnið 4 og 5	18
Mynd 4. Viðnámssnið 6	19
Mynd 5. Viðnámssnið 7 og 8	20
Mynd 6. Viðnámssnið 9 Reykjanes-Eldvörp	21
Mynd 7. Viðnámssnið 10 Sandvík-Eldvörp	23
Mynd 8. Jafnviðnámskort 400 m u.s.	25
Mynd 9. Jafnviðnámskort 600 m u.s.	25
Mynd 10. Jafnviðnámskort 800 m u.s.	27
Mynd 11. Jafnviðnámskort 1000 m u.s.	27
Mynd 12. Jarðsjór, efra lag	29
Mynd 13. Jarðsjór, neðra lag	29
Mynd 14. Hæð á háviðnámskjarna á Reykjanesi	35
Mynd 15. Viðnám-Ummyndun. Viðnámssnið 9 Reykjanes-Eldvörp	37
Mynd 16. Viðnám-Ummyndun. Viðnámssnið 11 Sandvík-Eldvörp	39
Mynd 17. Viðnámssnið 12 Svartsengi-Fagradalsfjall	41

1. INNGANGUR

Tilgangur verksins var að kanna hvort unnt væri að beita TEM-mælingum til að :

- Afmarka háhitasvæðið á Reykjanesi
- Leita að ummærkjum um háhitasvæði í Sandvík og við Fagradalsfjall.

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

Fram til þessa hafa TEM-mælingar einkum verið notaðar til rannsókna á háhitasvæðum hér á landi en nú er farið að nota þær í auknum mæli til rannsókna utan gosbeltanna. Samsvörun milli Schlumberger- og TEM-mælinga á háhitasvæðunum er allgóð en þar háttar þannig til að viðnámsmælingar sjá þykk viðnámslög með miklum mun í viðnámi. Munur á milli mælingaaðferða kemur þó oft fram í efstu 100 metrunum þar sem Schlumbergermælingar eru viðkvæmari fyrir lágviðnámi í yfirborði. Dýptarskynjun var álitin mjög sambærileg í báðum mælingaaðferðum.

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

Við TEM-mælingar í Eyjafirði 1995 sást í raun í fyrsta skipti að TEM-mælingar sjá dýpra og hafa betri upplausn en Schlumberger-mælingar utan gosbeltisins. Schlumberger-mælingarnar gefa að jafnaði betri upplausn í efstu 100-200 metrum mælingar en TEM-mælingarnar. Hins vegar sjá TEM-mælingarnar lagskiptingu á 500-1300 metra dýpi þar sem Schlumberger-mælingarnar sjá aðeins meðal-viðnám. (Ragna Karlsdóttir og Ólafur G. Flóvenz, 1997. Í prentun).

Til er all þéttriðið net Schlumbergermælinga á Reykjaneskaga frá árunum 1982 og 1983 (Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius, 1983). Niðurstöður þeirra mælinga leiddu í ljós lágt viðnám á háhitasvæðunum á Reykjanesi, í Eldvörpum og Svartsengi. Þær sýndu einnig lágt viðnám austur af Sandvík og vestan við Fagráskógarfjall en á þeim stöðum sér ekki merki jarðhita á yfirborði.

Schlumbergermælingarnar "sjá" hins vegar mjög grunnt þar sem aðstæður eru eins og á utanverðum Reykjaneskaga. Yfirborðið er þakið lítt grónum hraunum með mjög háu viðnámi (5000-25000 Ω m). Sjór er undir öllum utanverðum skaganum en ofan á flýtur ferskvatnslinsa. Linsan er víðast hvar innan við 60-70 metra þykk. Viðnám í hraunlögum, mettuðum fersku vatni, er lægra en í þurru eða 100-3000 Ω m. Viðnám-

ið í jarðlögum mettuðum jarðsjó er hins vegar 5-15 Ω m og enn lægra eða 2-5 Ω m ef jarðsjórinn er heitur eins og háttar til í jarðhitasvæðunum. (Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius, 1983).

Jafnstraumsaðferð, sem byggir á því að senda rafstraum í gegnum jarðlögin eins og gert er í Schlumbergermælingum, ræður illa við slíkar aðstæður, þ.e. mjög hátt viðnám á yfirborði, skörp viðnámsskil og mjög lágt fyrir neðan. Ljóst er að Schlumbergermælingarnar hafa "séð" hraunið á yfirborði, ferskvatnslinsuna og niður í jarðsjóinn á 100-300 metra dýpi

2. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA

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

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

Samanburður ummyndunarbeltanna við niðurstöður viðnámsmælinganna leiddi í ljós góða fylgni. Einkennandi viðnámsmynd af háhitasvæði er hátt viðnám, 10000-20000 Ω m, í yfirborði (ógróið hraun), viðnámslækkun niður í 500-1000 Ω m við vatnsborð, lágviðnámskapa með <10 Ω m utan á háviðnámskjarna með viðnámi allt að því stærðargráðu hærra. Samanburður á eðlisviðnámi og berghita og ummyndun í Nesjavalla-kerfinu leiddi í ljós að lágviðnámskapan svarar til smektít-zeólítabeltisins við hitastig

50-200° C. Háviðnámskjarninn svarar til klórít-epidótbeltisins við hitastig >240° C. Orsök mismunandi leiðni í ummyndunarbeltnu liggur í jónaskiptaeiginleikum einstakra steinda. Smektít og blandlagssteindirnar eru lagslíköt með lausbundnar jónir og því mikla jónaskiptaeiginleika og þar af leiðandi mikla leiðni. Í klóríti eru jónirnar hins vegar bundnar í kristalgrind og viðnámið því miklu hærra en í leirsteindunum (Deer o.fl., 1962).

Ljóst er að viðnámsmælingarnar gefa mynd af ummyndun kerfisins. Samsvörun á milli eðlisviðnáms og berghita er því aðeins fyrir hendi að jafnvægi ríki milli ummyndunar og berghita. Samsvarandi athuganir á öðrum háhitakerfum gefa sömu niðurstöður (Ragna Karlsdóttir, 1993; Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996).

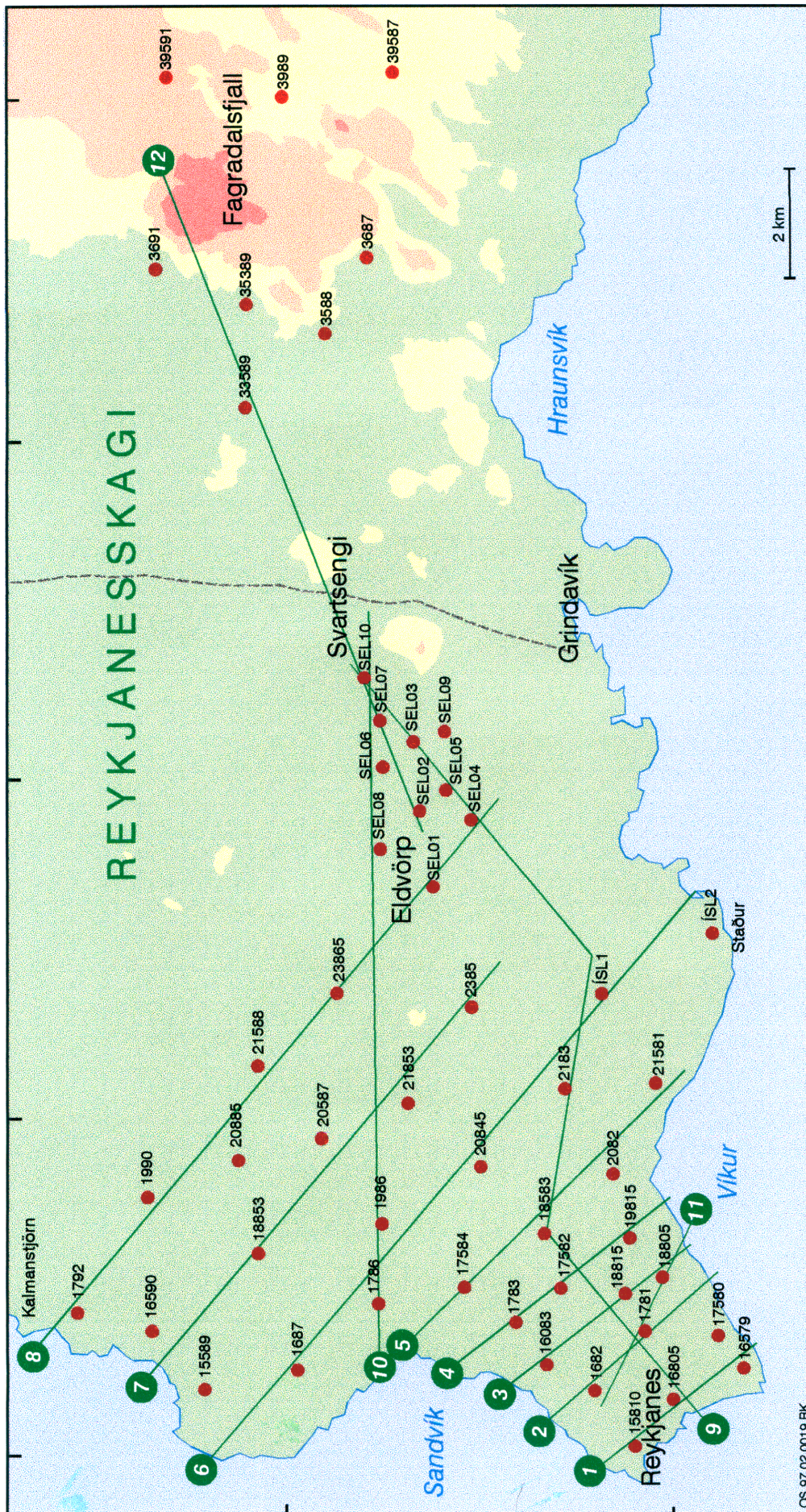
Svo aftur sé vitnað til tilraunar Ólafs G. Flóvenz o.fl. (1985), var því haldið fram að ummyndunarleiðnin væri ráðandi í ósöltum jarðhitakerfum en í söltum jarðhitakerfum væri leiðni jarðhitavökvans ráðandi og því sæist ekki háviðnámskjarni. Á þeim tíma var aðeins um Schlumbergermælingar að ræða sem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

3. FRAMKVÆMD MÆLINGA

Mælt var í júnímánuði 1996. Mælingarnar urðu alls 40, eða 32 mælingar á svæðinu frá Reykjanesi, norður fyrir Sandvík og austur undir Eldvörp og 8 mælingar við Fagradalsfjall. Víða er erfitt að komast að mælistöðum og á nokkrum stöðum þurfti að bera mælibúnaðinn nokkurn spöl. Þrátt fyrir það voru heildarafköst mjög góð og náðust 40 mælingar á 11 mælidögum, eða 3,6 mælingar á dag að meðaltali.

Eldri TEM-mælingar frá Eldvörpum (SEL1-SEL10) eru birtar með í þessarri skýrslu svo og 2 mælingar frá Stað við Grindavík (ÍSL1-ÍSL2).

Staðsetning mælinganna er sýnd á mynd 1 og hnit þeirra og hæð sýnd í eftirfarandi töflum 1 og 2:



Mynd 1. Staðsetningarkort

Tafla 1. Hnit og hæð TEM-mælinga á Reykjanesi 1996.

Mæling	Breidd			Lengd
15589	63,89	N	22,72	V
15810	63,82	N	22,73	V
16083	63,83	N	22,70	V
16579	63,80	N	22,69	V
16590	63,90	N	22,67	V
16805	63,81	N	22,71	V
1682	63,83	N	22,71	V
1687	63,87	N	22,71	V
17580	63,80	N	22,68	V
17582	63,83	N	22,67	V
17584	63,85	N	22,67	V
1781	63,82	N	22,68	V
1783	63,84	N	22,68	V
1786	63,86	N	22,68	V
1792	63,91	N	22,69	V
18583	63,84	N	22,65	V
18805	63,81	N	22,66	V
18815	63,82	N	22,67	V
18853	63,88	N	22,66	V
19815	63,82	N	22,65	V
1986	63,86	N	22,65	V
1990	63,90	N	22,65	V
20587	63,87	N	22,62	V
2082	63,83	N	22,63	V
20845	63,85	N	22,63	V
20885	63,89	N	22,63	V
21581	63,82	N	22,59	V
21588	63,88	N	22,60	V
2183	63,83	N	22,60	V
2385	63,85	N	22,57	V
21853	63,86	N	22,60	V
23865	63,87	N	22,57	V
33589	63,89	N	22,36	V
35389	63,89	N	22,32	V
3588	63,88	N	22,33	V
3687	63,88	N	22,30	V
3691	63,91	N	22,31	V
39587	63,87	N	22,23	V
39591	63,91	N	22,23	V
3989	63,89	N	22,24	V

Tafla 2. Hnit og hæð TEM-mælinga á Reykjanesi 1991 og 1996.

Mæling	Breidd			Lengd
ÍSL1	63,83	N	22,56	V
ÍSL2	63,81	N	22,54	V
SEL01	63,82	N	22,52	V
SEL02	63,86	N	22,50	V
SEL03	63,86	N	22,49	V
SEL04	63,85	N	22,50	V
SEL05	63,86	N	22,49	V
SEL06	63,87	N	22,47	V
SEL07	63,87	N	22,47	V
SEL08	63,87	N	22,51	V
SEL09	63,86	N	22,47	V
SEL10	63,87	N	22,45	V

4. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA

Niðurstöður viðnámsmælinganna eru settar fram sem viðnámsnið og jafnviðnámskort. Um túlkun viðnámsmælinga er vísað í viðauka. Eldri mælingar frá Eldvörpum voru endurtúlkaðar og tengdar nýju mælingunum. Dregin eru 8 samsíða NV-SA snið, snið Reykjanes-Eldvörp, snið Sandvík-Eldvörp og loks snið frá Svartsengi að Fagraðalsfjalli. Lega sniðanna er sýnd á mynd 1. Áður en hverju sniði er lýst fyrir sig er dregið á niðurstöður í grófum dráttum.

- Yfirborðslag með háu, oft tvískiptu viðnámi kemur fram í öllum mælingum. Lag þetta er um eða innan við 100 metra þykkt.
- Neðan við yfirborðslagið er lágviðnámslag með viðnám $< 10 \Omega\text{m}$. Þetta lag er tvískipt, hærra viðnám (5-10 Ωm) ofan á og lægra viðnám undir (1,5-4,3 Ωm). Þetta lag (jarðsjór) er tvískipt í öllum mælingum utan jarðhitasvæðanna, lægri hluti þess liggur yfir jarðhitasvæðinu í Eldvörpum og yfir lágviðnámsvæðinu í Sandvík en liggur upp að jarðhitasvæðinu á Reykjanesi.
- Neðan við jarðsjávarlagið er millilag með misháu viðnámi, þ. e. lægra yfir jarðhitasvæðunum og hærra utan þeirra.
- Lágviðnámskápa með viðnám oftast 1-3 Ωm liggur utan á jarðhitasvæðunum á Reykjanesi, Eldvörpum og Sandvík. Hún er oftast 100-200 metra þykk utan á háviðnámskjarnanum en virðist þykkna með dýpi en rétt er að benda á að þykktar og viðnámsákvörðunin er ónákvæmari þegar komið er niður á 800-1200 metra dýpi. Athyglisvert er að lágviðnámskápan tengist á milli jarðhitasvæðanna.
- Háviðnámskjarni sést í jarðhitasvæðunum á Reykjanesi, í Eldvörpum og undir lágviðnámskápu í Sandvík.

4.1 Viðnámsnið

Snið 1 (mynd 2) liggur NV-SA yst á Reykjanesi. Línan sker jarðhitasvæðið á Reykjanesi. Efri mörk lágviðnámskápunnar eru á 150-200 metra dýpi, þykkt hennar er 60-100 metrar og háviðnámskjarni fyrir neðan. Lægri hluti jarðsjávarlagsins liggur undir þunnu yfirborðslagi.

Snið 2 (mynd 2) liggur samsíða línu 1 þvert yfir jarðhitaummerkin á yfirborði og er mæling 1781 eins nærri Gunnuhver og unnt er. Lágviðnámskápan liggur upp undir yfirborði í mælingu 1781 en dýpkar á hana til beggja hliða þar sem efri mörk hennar eru á 150-170 metra dýpi. Þykkt hennar er 40-100 metrar. Jarðsjávarlagið sést ekki í mælingu 1781 en grillir í lægri hluta þess í hinum mælingunum.

Snið 3 (mynd 2) liggur samsíða hinum og um 1 km austar. Efri mörk lágviðnámskápunnar liggja á 300 metra dýpi norðan til en dýpkar á hana í syðstu mælingunni. Háviðnámskjarninn er hæstur í nyrstu mælingunni. Tvískipt jarðsjávarlag sést í syðstu mælingunni en neðri hluti þess sést í hinum mælingunum. Í þessari línu er greinilega farið að dýpka á jarðhitasvæðið, einkum til suð-vesturs.

Snið 4 (mynd 3) liggur samsíða þeim fyrri og enn austar. Þarna er enn ákveðnari dýpkuun á jarðhitasvæðið til suð-austurs því lágviðnámskápan er komin á 650 m u.s. og háviðnámskjarninn á um 1100 m.u.s. í tveimur syðri mælingunum. Aðeins í nyrstu mælingunni er lágviðnámskápan í sömu hæð og norðan til í línu 3 eða á 300 m u.s. og háviðnámskjarninn á 360 m.u.s.

Snið 5 (mynd 3) rétt nartar í jarðhitasvæðið. Háviðnámskjarninn sést ekki í nyrstu né syðstu mælingunni, en er á 100-1200 m u.s. í tveimur mælingum í milli. Lágviðnámskápan er orðin um 250 metra þykk. Lagið á milli jarðsjávarlagsins og lágviðnámskápunnar er hér með viðnám 15-25 Ω m og jarðsjávarlagið er tvískipt undir háu yfirborðslagi.

Snið 6 (mynd 4) er komin austur fyrir jarðhitasvæðið á Reykjanesi. Það sem er athyglisverðast í þessarri línu er toppur á háviðnámskjarna á 900 m u.s. og sést í tveimur mælingum norðan til í sniðinu svo og 300 metra þykk lágviðnámskápa sem hvelfist yfir. Þetta er svæðið austur af Sandvík. Lágviðnámskápan er annars á 900-1000 m u.s. í öllu sniðinu nema í syðstu mælingunni (800 m u.s.). Viðnám í millilaginu er lágt eða <5 Ω m yfir toppnum á háviðnámskjarnanum en hærra utan þess. Tvískipt jarðsjávarlag er undir háu yfirborðslagi í öllu sniðinu.

Snið 7 (mynd 5) sýnir að háviðnámskjarninn austur af Sandvík teygir sig til austurs. Háviðnámskjarninn sést á um 1000m.u.s. í tveimur mælingum og lágviðnámskápan er 400-500 metra þykk yfir honum. Lágviðnámskápan er síðan á 1000-1150 m u.s. en lyftir sér aðeins og er á um 800 m u.s. í nyrstu mælingunni. Viðnámið í millilaginu er 10-30 Ω m nema yfir háviðnámskjarnanum þar sem það er <10 Ω m.

Snið 8 (mynd 5) er austasta sniðið. Lágviðnámskápan er á 950-1200 m u.s. nema nyrst þar sem hún nær upp á 650 m u.s. Syðst í sniðinu sér svo í jarðhitasvæðið í Eldvörpum. Þar nær háviðnámskjarni upp í 350 m u.s. og liggur 100 metra þykk lágviðnámskápa

yfir honum. Tvískipt jarðsjávarlag er norðan til í sniðinu, neðri hluti þess liggur yfir jarðhitasvæðinu í Eldvörpum líkt og á Reykjanesi, en í einni mælingu (23865) við Sandfell sést einungis í efri hluta þess.

Snið 9, REYKJANES-ELDVÖRP. Sniðið liggur NA-SV í gegnum jarðhitasvæðin á Reykjanesi og í Eldvörpum. Lega þess er sýnd á mynd 1 og viðnámsneiðið á mynd 6. Á Reykjanesi nær háviðnámskjarninn upp í 150 m u.s. Yfir honum er þunn lágviðnámskápa sem þykkar með dýpi til austurs. Í Eldvörpum er háviðnámskjarninn og lágviðnámskápan um 200 metrum neðar, þ.e. dýpra er á jarðhitakerfið í Eldvörpum en á Reykjanesi. Athyglisvert er að lágviðnámskápan tengist á milli svæðanna en efri mörk hennar eru dýpst á 1150 m u.s. Tvískipta jarðsjávarlagið sést í mælingum á milli jarðhitasvæðanna en neðri hluti þess liggur síðan yfir Eldvörpin en upp að Reykjanessvæðinu.

Snið 10, SANDVÍK-ELDVÖRP. Sniðið liggur A-V frá Sandvík í vestri og sneiðir norðan í jarðhitasvæðið í Eldvörpum. Lega þess er sýnd á mynd 1 og viðnámsneiðið á mynd 7. Sniðið sneiðir norðan í jarðhitasvæðið í Eldvörpum og nær háviðnámskjarninn því upp í 450 m u.s. hæst en sýnir vel hvernig dýpkar á háviðnámskjarnann með dýpi til vesturs. Á sniðinu sést háviðnámskjarni 900 m u.s. upp af Sandvík og 300-400 metra þykk lágviðnámskápa yfir honum. Lágviðnámskápan tengist á milli svæðanna og eru efri mörk hennar niður á 900 m u.s. þar sem dýpst er á hana. Tvískipt jarðsjávarlagið er yfir Sandvík, neðri hluti þess liggur yfir Eldvörp, en það er ekki tvískipt í mælingunni við Sandfell eins og áður er getið.

4.2 Jafnviðnámskort

Til frekar glöggvunar á niðurstöðum mælinganna eru sýnd hér jafnviðnámskort á 400 m u.s., 600 m u.s., 800 m u.s. og 1000 m u.s.

Viðnám 400 m neðan sjávarmáls (mynd 8) sýnir vel afmarkaðan austurjaðar jarðhitasvæðisins á Reykjanesi. Háviðnámskjarninn nær yfir mestan hluta Reykjanessins og út í sjó í vestur og suðurátt. Austurjaðarinn hefur nánast norður-suður stefnu frá Rauðhól og suður í sjó vestarlega á Krossavíkurbergi. Í Eldvörpum sést háviðnámskjarninn sem aflangt svæði með SV-NA stefnu. Norðvestur jaðar jarðhitasvæðisins er vel afmarkaður en að sunnanverðu er í raun aðeins ein mæling sem sýnir lækkun á háviðnámskjarnanum og lágviðnámskápunni.

Utan jarðhitasvæðanna sýnir kortið viðnám neðan við lágviðnámslinsuna sem hér á undan er nefnd jarðsjór. Það er hæst á beltí frá sunnanverðri Sandvík og austur að Eldvörpum eða 20-30 Ω m. Viðnámið er annars á bilinu 6-17 Ω m nema austur af Sandvík, en þar er greinileg viðnámslægd með 3-5 Ω m viðnámi.

Viðnám 600 m neðan sjávarmáls (mynd 9) sýnir að háviðnámskjarninn á Reykjanesi breiðir úr sér aðeins til austurs miðað við myndina á undan. Háviðnámskjarninn í Eldvörpum hefur nú stækkað þannig að aðeins 3 km langur jaðar afmarkar jarðhitasvæðið til norð-vesturs. Aðrar breytingar eru þær að nú sést í lágviðnámskápu upp af Sandvík undir viðnámslægdinni sem sást 200 metrum ofar.

Viðnám 800 m neðan sjávarmáls (mynd 10) sýnir svipaða mynd. Helstu breytingar eru þær að lágviðnámskápan er þykkari utan á háviðnámskjarnanum bæði á Reykjanesi og í Eldvörpum. Lágviðnámskápan í Sandvík nær yfir stærra svæði og auk þess glittir í lágviðnámskápu við Stað við Grindavík og við Kalmanstjörn, sem er vestan á Reykjaneskaga. Hugsanlegt er þó að sjávaráhrifa gæti við Stað og Kalmanstjörn.

Viðnám 1000 m neðan sjávarmáls (mynd 11) sýnir að lágviðnámskápan er að verða samfelld yfir allt svæðið. Dýpra er á hana á milli Reykjanes og Sandvíkur (1140 m u.s.), undir Eldvarpahrauni (1160 m u.s.) og undir Hafnaheiði (1000-1200 m u.s.). Háviðnámskjarninn er sá sami á Reykjanesi en hefur stækkað til NV í Eldvörpum. Í Sandvík sér í háviðnámskjarna á stóru svæði.

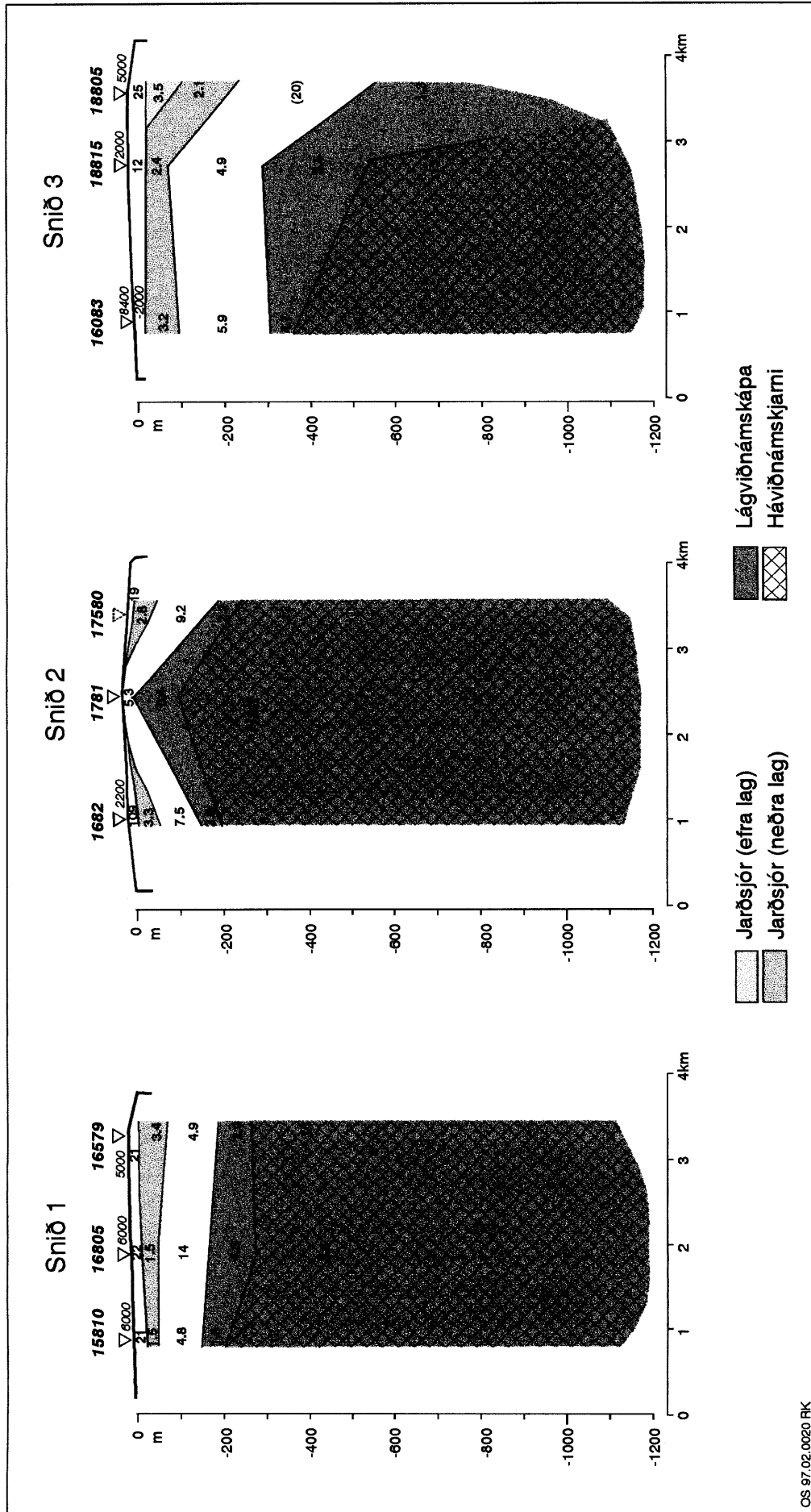
4.3 Jarðsjór

Eins og vikið er að áður er 150-250 metra þykkt tvískipt lágviðnámslag undir háu yfirborðslagi í öllum mælingum utan jarðhitasvæðanna. Neðan þessa lágviðnámslags hækkar viðnámið og breytist ekki með dýpi fyrr en kemur í lágviðnámskápuna nokkur hundruð metrum neðar. Ekki er ljóst hvað það er sem veldur þessu lágviðnámslagi en hér er leitt getum að því að á þessu dýpi sé sjór í mjög vel leku bergi. Viðnám í vökva lækkar með aukinni seltu og hækkandi hita og getur því viðnámsdreifingin í jarðsjónum endurspeglad seltu og/eða hitastig.

Lágviðnámslagið er tvískipt með hærra viðnám í efri hluta lagsins en lægra í neðri hluta þess. Efra lagið getur verið sjór blandaður fersku vatni úr ferskvatnslinsunni sem liggur ofan á. TEM-mælingarnar hafa ekki góða upplausn fyrir efstu 100 metra jarðar og sjá því ekki ferskvatnslinsuna. Neðan við jarðsjávarlagið hækkar viðnámið og viðnámsmælingarnar sjá ekki viðnámsbreytingu með dýpi fyrr en kemur í lágviðnámskápuna oft mörg hundruð metrum neðar. Leitt er getum að því að hærra viðnám neðan við tvískipta jarðsjávarlagið sé vegna minnkandi poruhluta. Mynd 12 sýnir viðnámsdreifinguna í efra laginu. Það liggur upp að jarðhitasvæðunum á Reykjanesi og í Eldvörpum og er viðnámið lægst þar eða 3,5-5 Ω m. Viðnámið er hæst eða 10-12 Ω m á vesturjaðri mælisvæðisins svo og við Stað. Hugsanlegt er að þarna sé greiður gangur við kaldan sjó og viðnámsdreifingin endurspeglar hitastig.

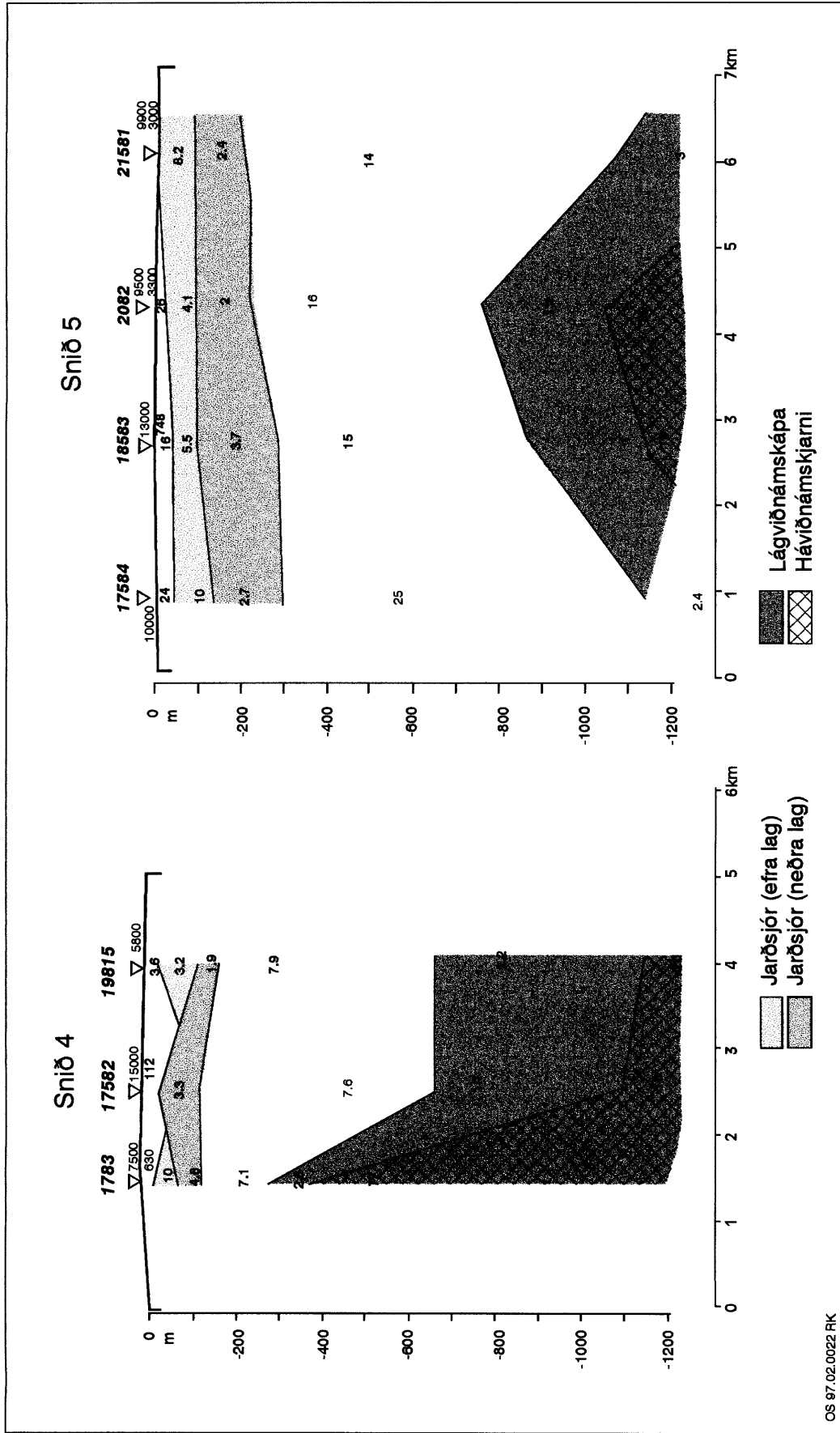
Hér er enn fremur sett fram sú tilgáta að viðnámslækkunin í neðra laginu sé vegna seltumunar þ.e. að neðra lagið sé saltara en það efra vegna íblöndunar af fersku vatni við efra lagið. Mynd 13 sýnir viðnámsdreifinguna í neðra laginu og er hugsanlegt að hún endurspeglar hitadreifingu í laginu.

Hvað viðnámsdreifingin í jarðsjónum þýðir er ekki ljóst. Þær skýringar sem settar eru fram hér á undan eru getgátur, sem ekki verða sannprófaðar nema með samanburði við mælingar á seltu og hitastigi úr borholum. Þetta getur hins vegar verið áhugavert fyrir þá sem vinna sjó, oft volgan, úr grunnum holum.

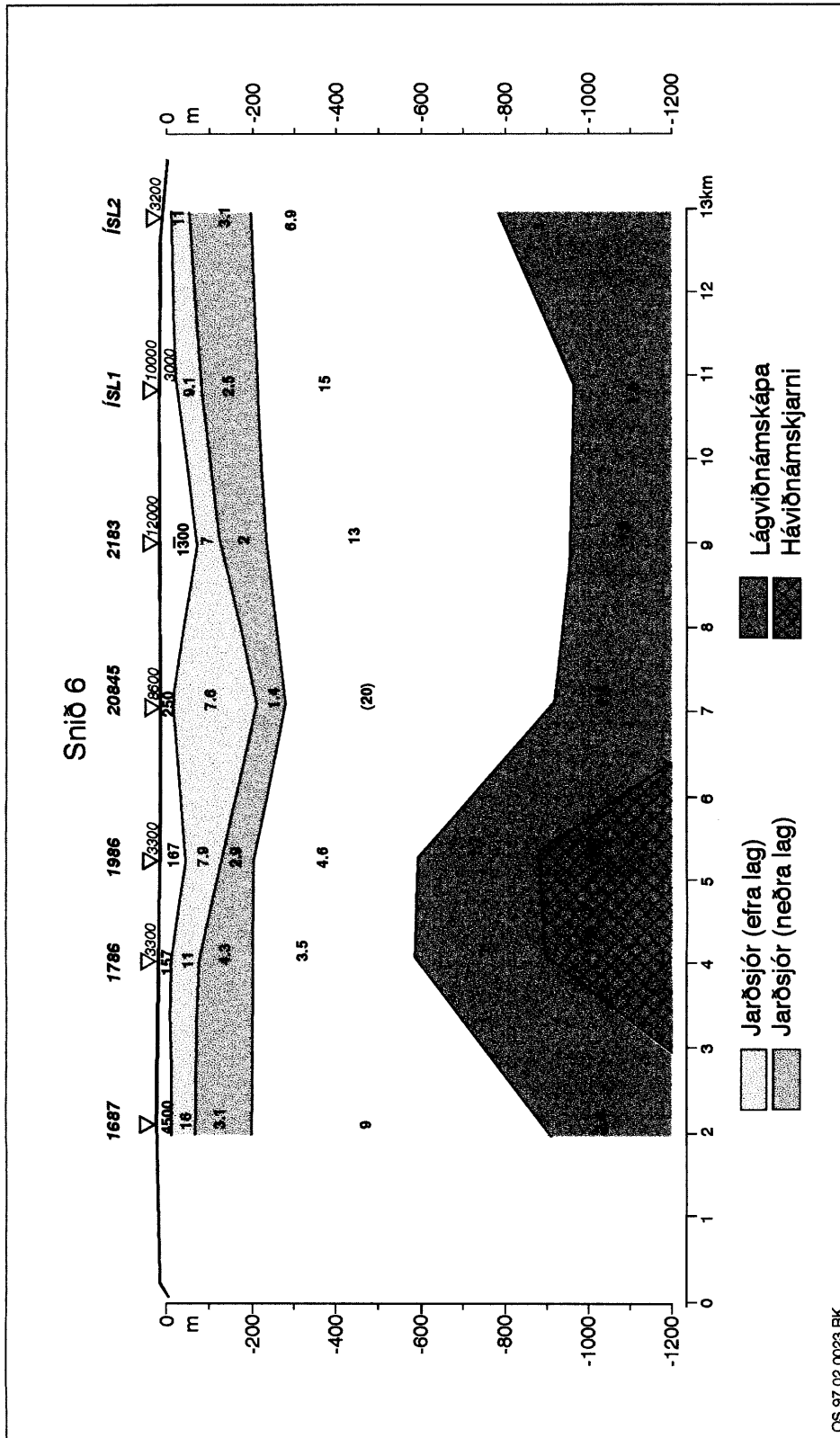


OS 97.02.0020 RK

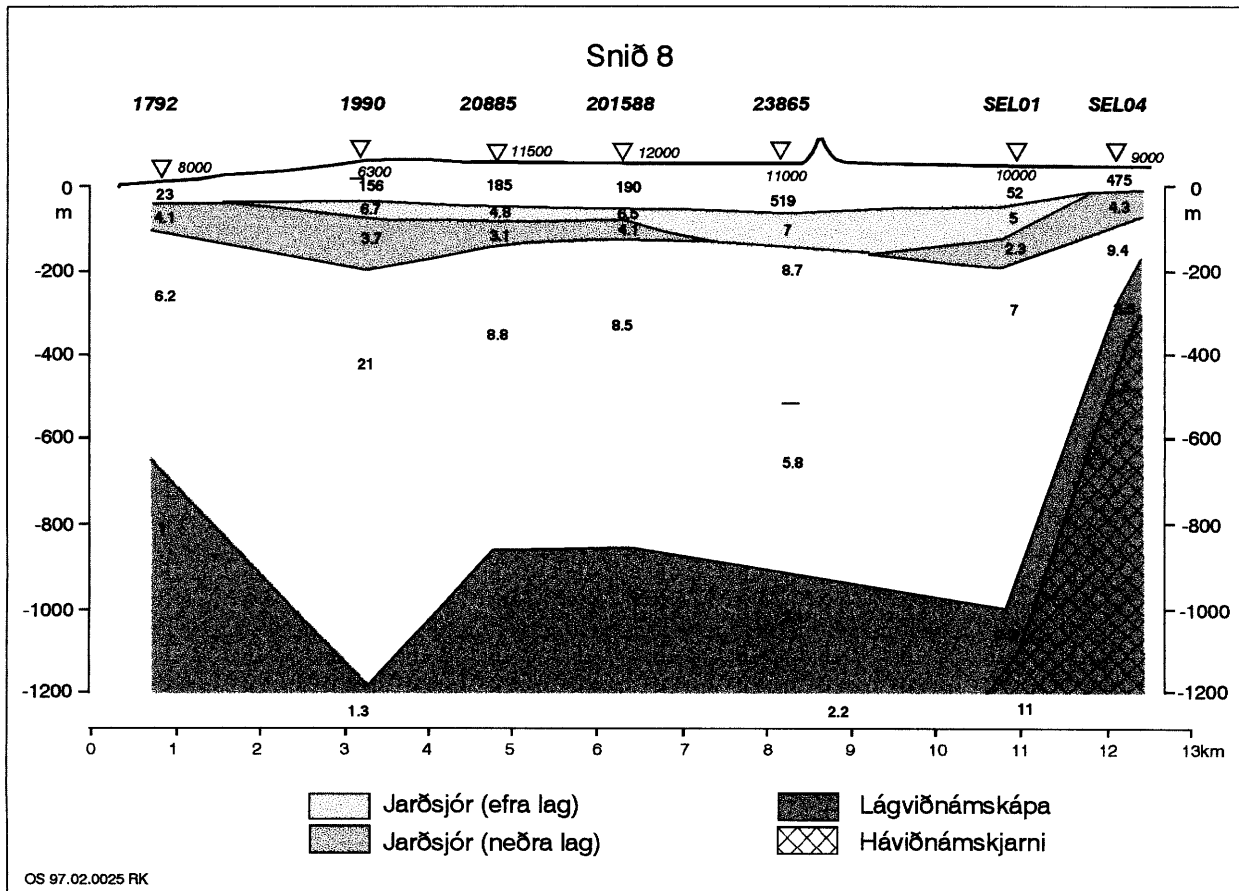
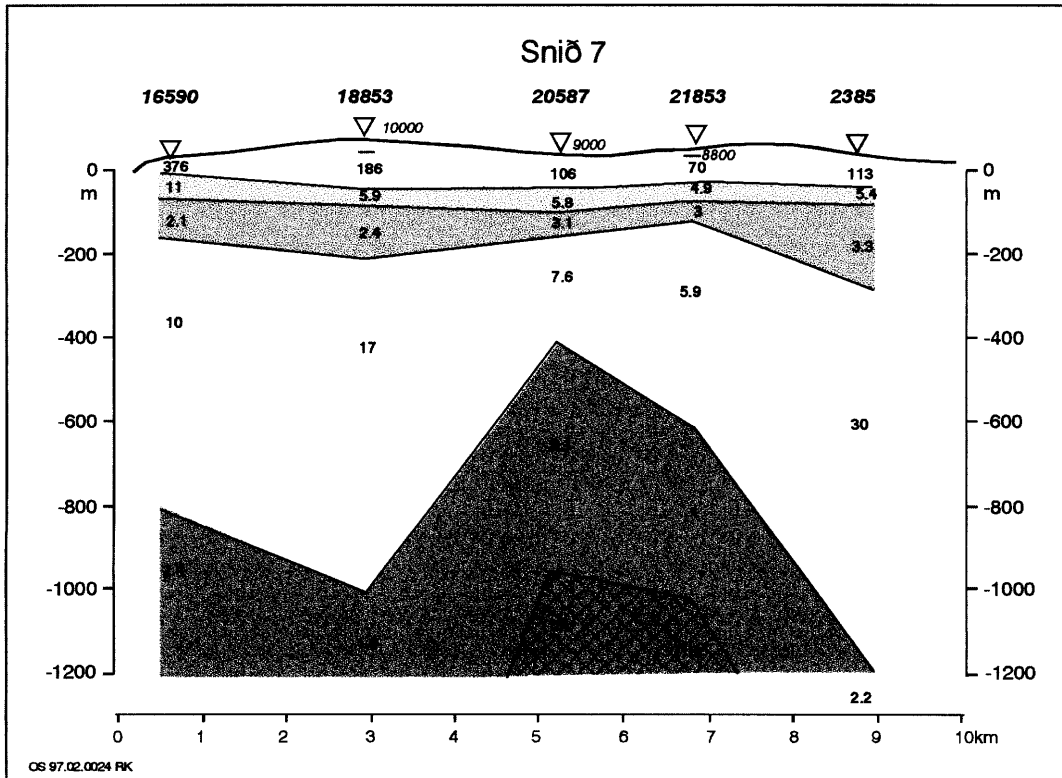
Mynd 2. Viðnámsnið 1, 2 og 3.



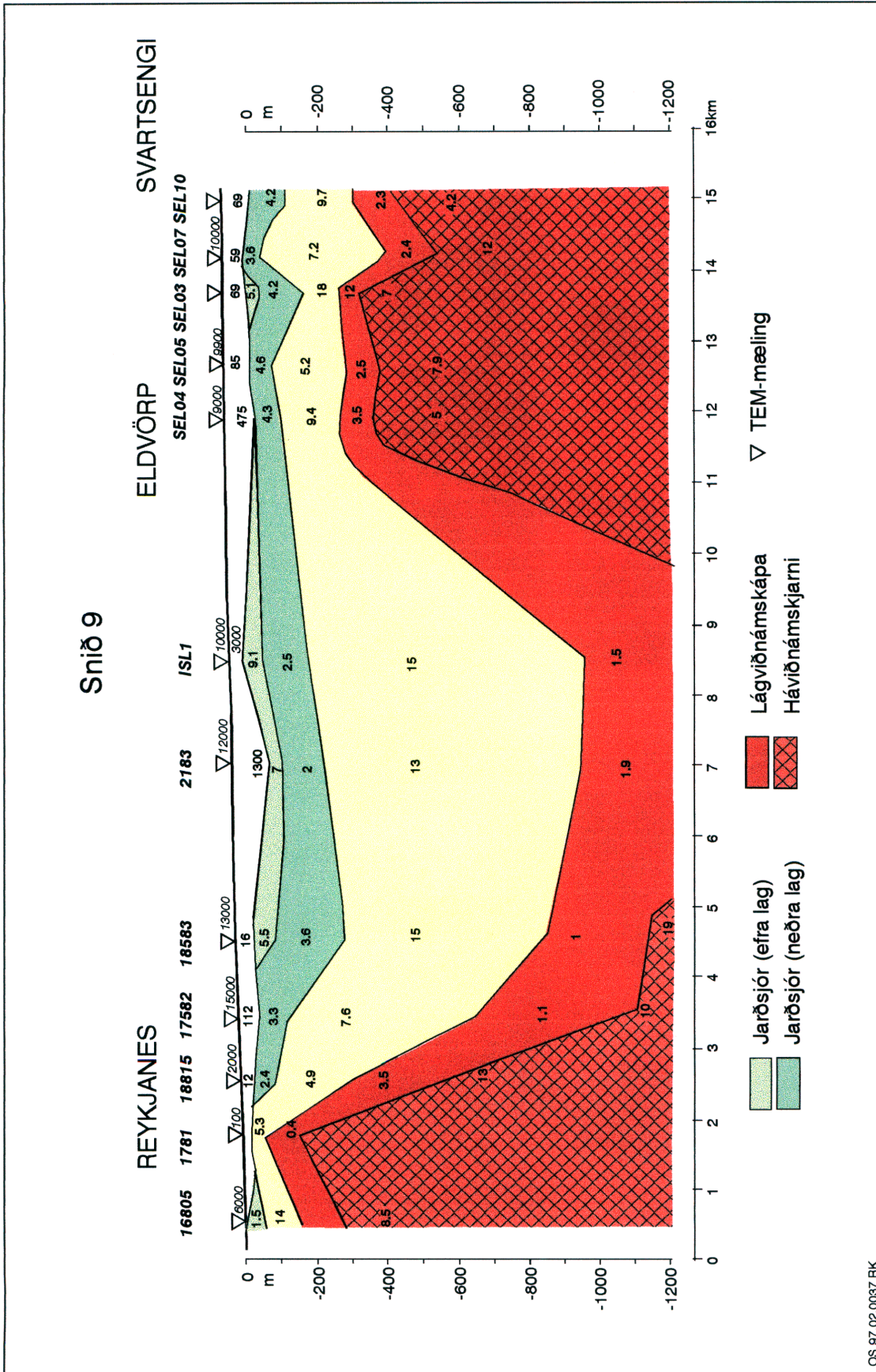
Mynd 3. Viðnámsnið 4 og 5



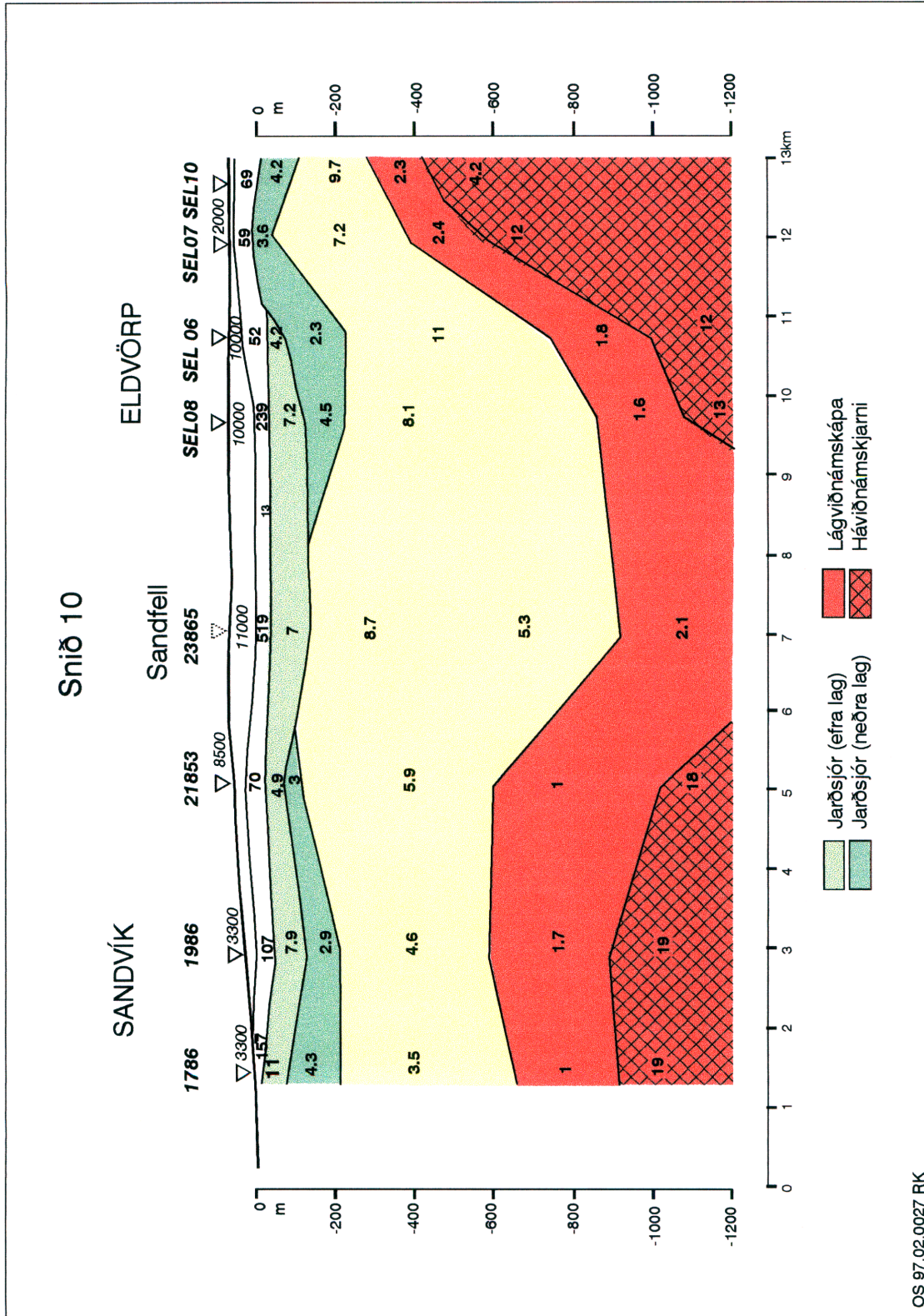
Mynd 4. Viðnámsnið 6.



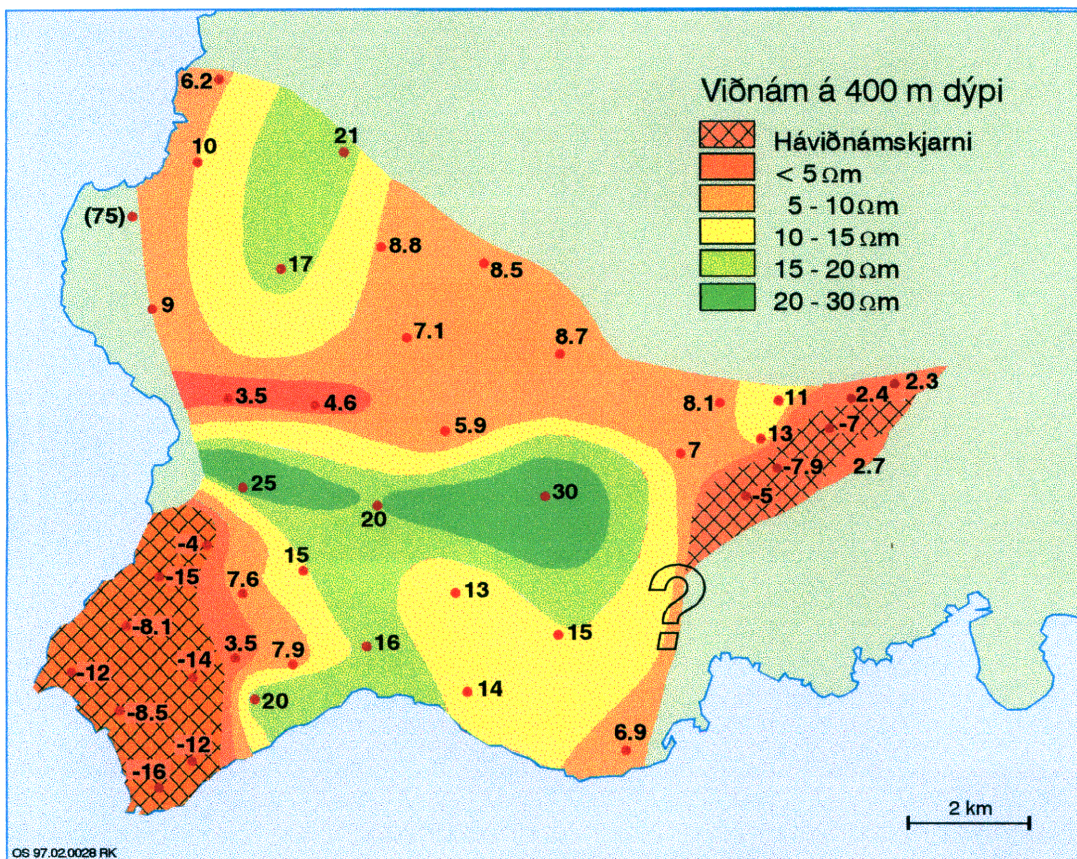
Mynd 5. Viðnámsnið 7 og 8.



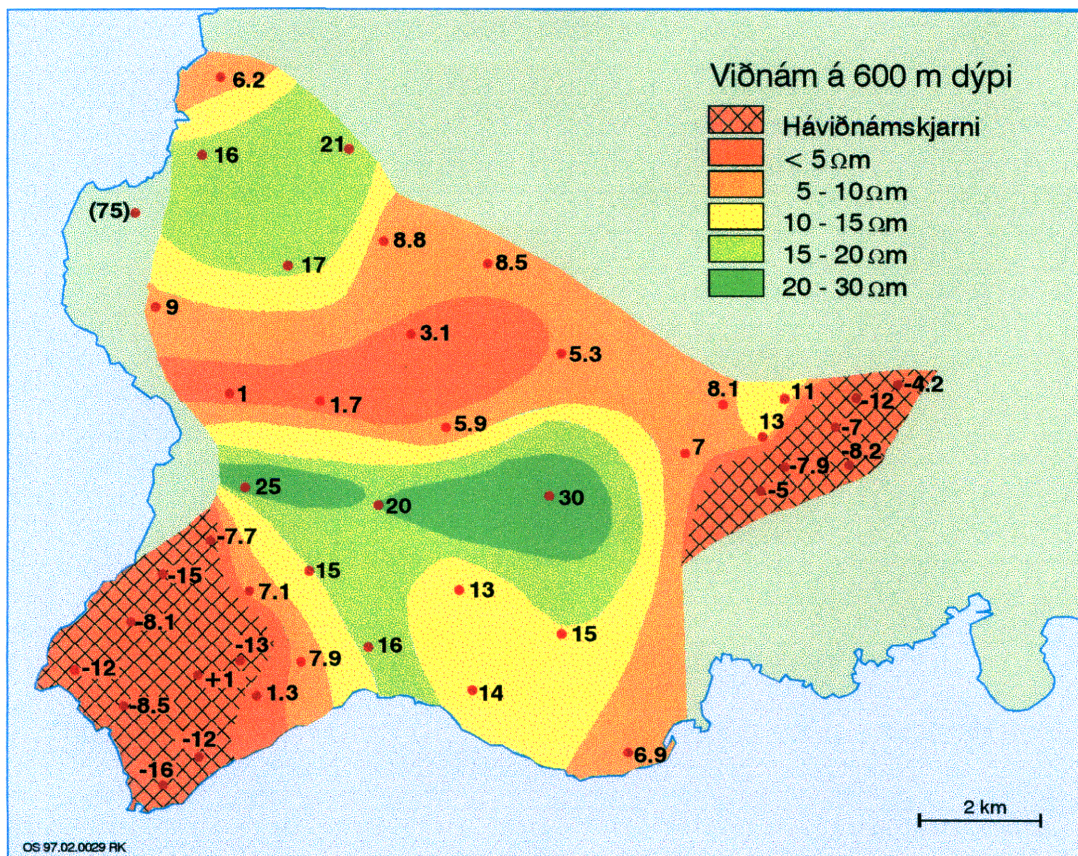
Mynd 6. Viðnámsnið 9 Reykjanes - Eldvörp.



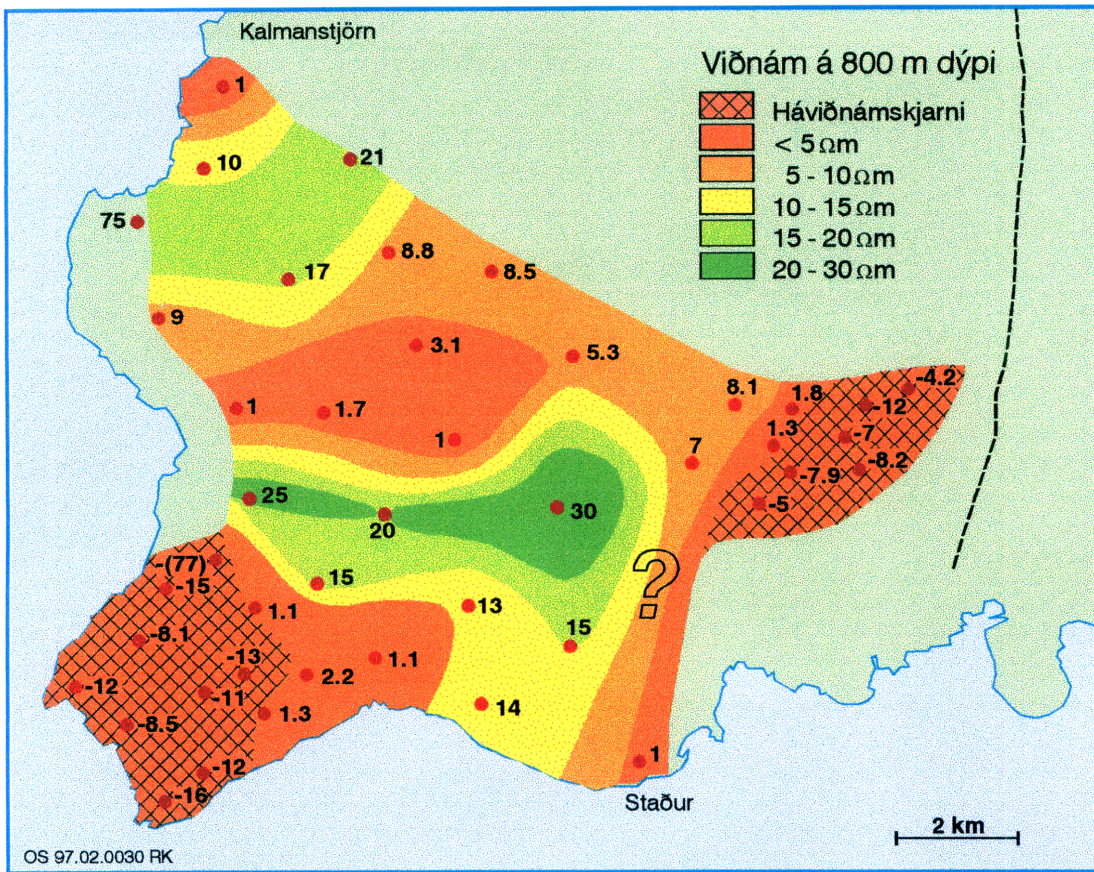
Mynd 7. Viðnámsnið 10 Sandvík - Eldvörp.



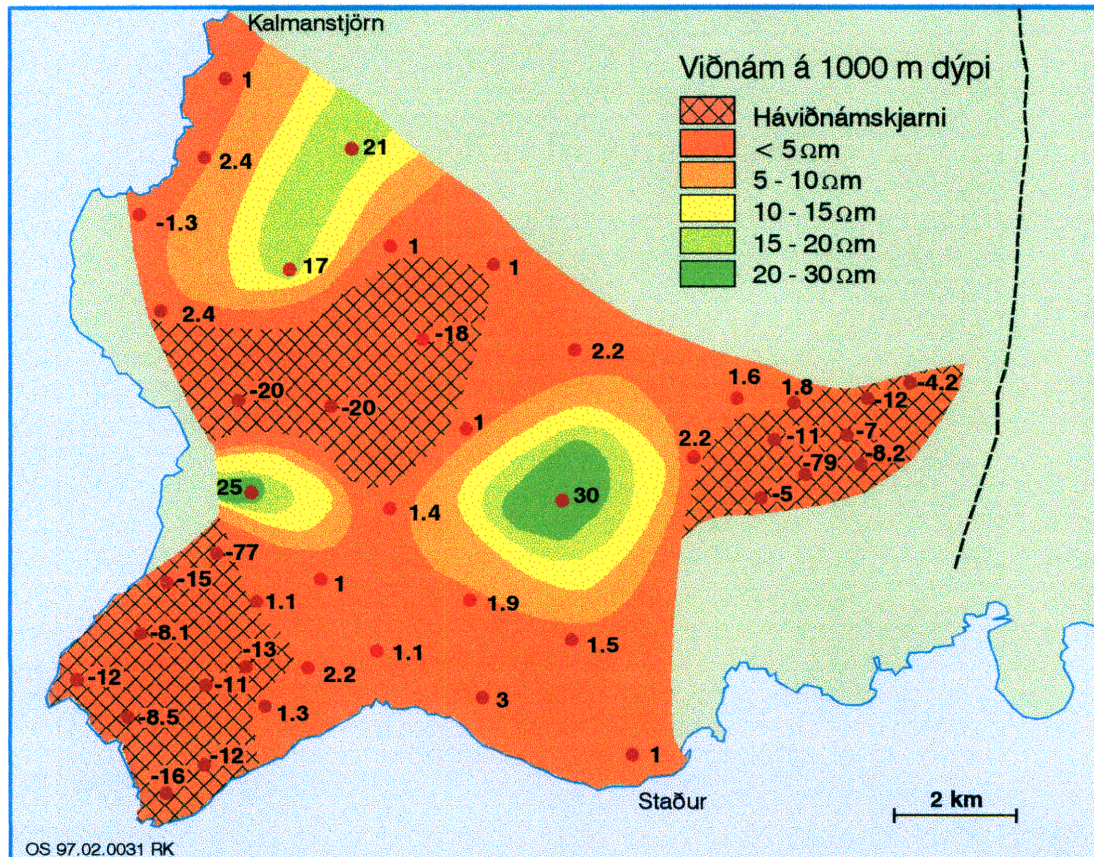
Mynd 8. Jafnviðnámskort 400 m u.s.



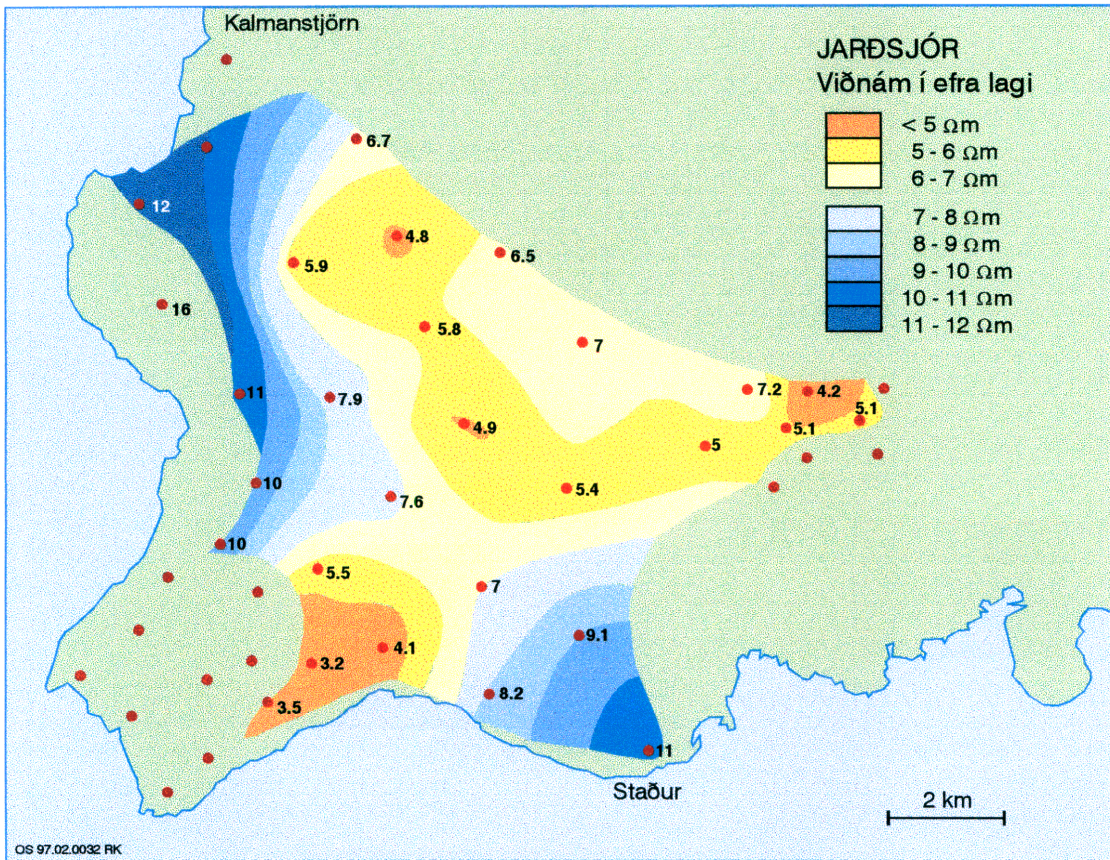
Mynd 9. Jafnviðnámskort 600 m u.s.



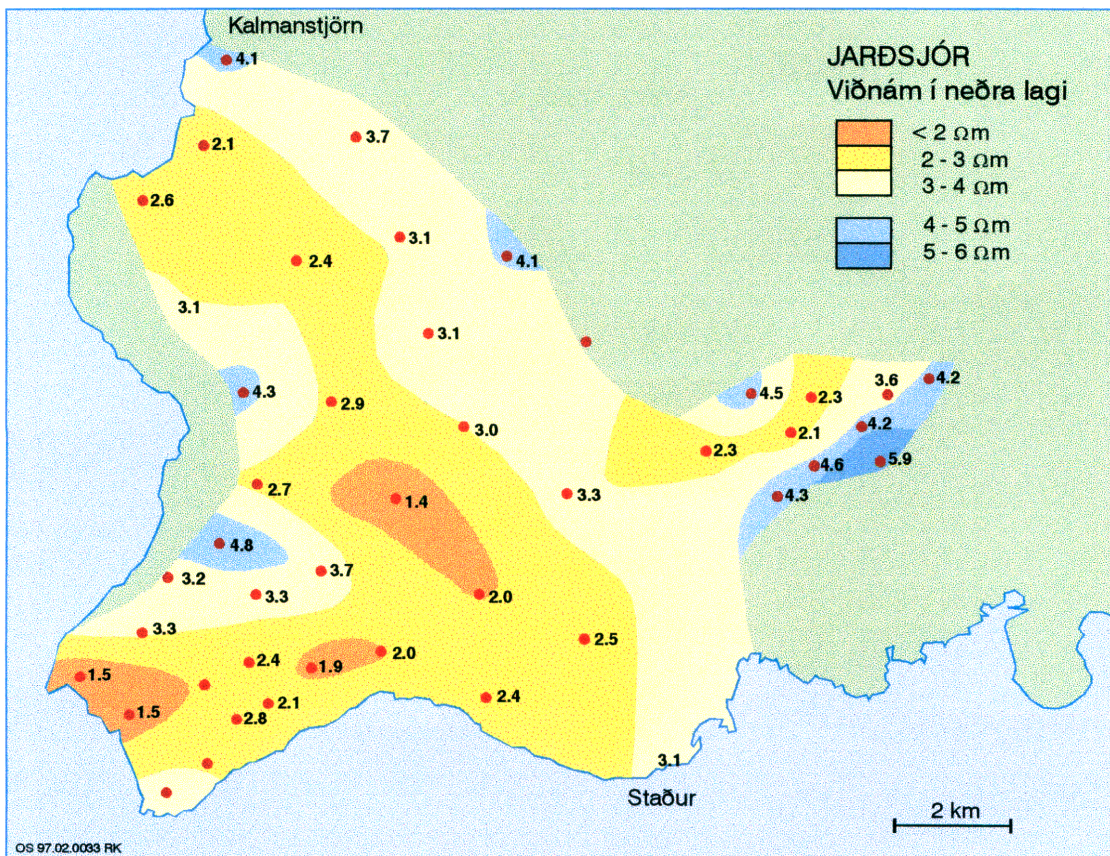
Mynd 10. Jafnviðnámskort 800 m u.s.



Mynd 11. Jafnviðnámskort 1000 m u.s.



Mynd 12. Jarðsjór, efra lag.



Mynd 13. Jarðsjór, neðra lag.

5. NIÐURSTÖÐUR

5.1 Reykjanes

Ransóknirnar 1996 benda til að háhitasvæðið á Reykjanesi sé stærra en eldri mælingar gáfu til kynna. Á 1000 metra dýpi undir sjávarmáli (mynd 11) sýnir háviðnámskjarninn útbreiðslu jarðhitasvæðisins eins og unnt er að sjá hana með mælingum á landi. Jarðhitasvæðið nær yfir allt Reykjanesið og út í sjó í suður- og vesturátt. Mynd 14 sýnir efri mörk háviðnámskjarnans á Reykjanesi. Jaðar jarðhitasvæðisins er vel ákvarðaður allt frá Rauðhól sem er upp af Litlu Sandvík (vestari) og þaðan um þrjá kílómetra í suðaustur þar sem jaðarinn sveigir síðan í suðvestur í átt að Krossavíkurbergi. Háviðnámskjarninn nær hæst upp í 100 m u.s. undir mesta ummyndunar- og hverasvæðinu. Þar er mjög lágt viðnám (5 Ω m) í yfirborði og lágviðnámskápan, sem liggur utan á háviðnámskjarnanum, nær þar uppundir yfirborð. Á myndinni sést vel hversu skart dýpkar á háviðnámskjarnann til austurs því mælingar eru nógu þéttar til að ákvarða það vel. Hann virðist vera á 200-300 metra dýpi (u.s.) undir vesturhluta nessins en mælingar eru þar heldur strjálldi og því getur verið meira "landslag" á háviðnámsfletinum en hér er gefið til kynna.

Eins og áður er rætt spegla viðnámsmælingar ummyndun í jarðhitakerfunum. Til þess að bera saman viðnámsmyndina og ummyndun er ummyndunarsnið úr borholum H2, H6, H8 og H9 fært inn á viðnámssnið 9 (Reykjanes-Eldvörp) og sett saman á mynd 15. Svarf úr borholunum var greint í verkefni hjá Jarðhitaskóla HSP undir leiðsögn Hjalta Franzsonar (Mungania, 1993). Ummyndunin er færð inn í súlur sem tákna borholurnar og þar eru merkt efri mörk blandlags-leirsteindabeltis og efri mörk epidótbeltis. Í bakgrunni er viðnámssnið 9, en viðnámsgildi fjarlægð. Í holum 8 og 9 sést að það dýpkar á blandlagsbeltið og epidótbeltið til austurs í takt við lágviðnámskápuna og háviðnámskjarnann. Hóla 2 nær ekki niður í epidótbeltið en fer ofan í blandlagsbeltið á um 200 m u.s. Viðnámssniðið (mæling 1781) bendir til að lágviðnámskápan sé talsvert ofar á þessum slóðum en þess ber að geta að um 500 metrar eru á milli H2 og TEM-mælingarinnar 1781. Í hólum 6 falla saman mörk ummyndunarbeltanna og eru á meira dýpi en viðnámssniðið gefur til kynna. Á mynd 16 er sýnt VNV-ASA snið yfir jarðhitasvæðið til að bera saman viðnám og ummyndun úr nálægum holum (snið 11). Lega þess er sýnd á staðsetningarkorti á mynd 1 svo og á mynd 14. Hér er mælingum varpað inn á sniðið úr meiri fjarlægð (sjá mynd 14) og því hætta á meiri skekkju. Ef lítið er á legu sniðsins og yfirborð háviðnámskjarnans á mynd 14 sést að í raun ætti hól 4 að varpast hærra á sniðið. Ummyndunin í holum 3 og 4 sýnir þó að það dýpkar á ummyndunarbeltin til suðausturs í takt við viðnámið.

Ljóst er af þessum samanburði að viðnámsvæðin falla ekki nákvæmlega saman við ummyndunarbeltin. Efri mörk epidótbeltis eru ákvörðuð þar sem fyrst verður vart við epidót í svarfgreiningu. Það virðist sem viðnámskilin á milli lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans séu alla jafna nokkru neðar eða allt að 200 metrum neðan við skilin á milli blandlagsbeltis og epidótbeltis. Hafa verður í huga að við túlkun TEM-mælinganna er einvíð og gerir ráð fyrir láréttum viðnámskilum. Slík túlkun getur sýnt ein-

hverja ónákvæmni við þessar aðstæður þar sem mælingin á að ákvarða skil sem eru í raun hallandi. Einnig má benda á að lagmót eru dregin beint á milli mælinga og bil á milli mælinga er að jafnaði 1-2 km. Viðnámsmyndin verður því nokkuð einfaldari en hún er í raun og líklegt að meira landslag sé í viðnámsflötunum. Enda þótt hliðrun sé á viðnámsmyndinni og ummyndunarmyndinni er fylgnin góð. Samskonar hliðrun sést í jarðhitakerfunum á Nesjavöllum, Námafjalli og Kröflu þar sem borholur eru til staðar og því unnt að gera þennan samanburð (Knútur Árnason, 1987; Ragna Karlsdóttir, 1993; og Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1995).

5.2 Eldvörp

Í ljósi þeirra niðurstaðna sem fengust á Reykjanesi, voru eldri TEM-mælingar frá Eldvörpum (Lúðvík S Georgsson, 1991) teknar upp og endurtúlkaðar. Þær sýna sömu ein-kenni um háhitaummyndun og mælingarnar á Reykjanesi. Á mynd 11, sem sýnir viðnámsmál á 1000 m u.s., sést afmarkaður norð-vestur jaðar háviðnámskjarnans en jarðhitasvæðið nær út fyrir mælissvæðið í aðrar áttir. Á viðnámsmálinu úr Eldvörpum á mynd 8 sést að háviðnámskjarninn nær hæst í 260-280 m u.s. (í SEL-3,4 og 5) en aðeins lægra austast eða 300 u.s. (SEL-10). Lækkun á háviðnámskjarnanum í SEL-7 getur verið lækkun á jarðhitasvæðinu til norðurs og SEL-9 sýnir lækkun til suð-austurs, sem gæti bent til þess að jarðhitasvæðið hefði SV-NA stefnu. Þetta eru hins vegar nánast vísbendingar því mælingar vantar til að ákvarða lögun og stærð jarðhitasvæðisins. Á mynd 15 er sýnt SV-NA viðnámsmál frá Eldvörpum (snið 9, Reykjanes-Eldvörp) og inn á það fært ummyndunarsnið úr borholunum EG-2 í Eldvörpum og holu 9 í Svartsengi (Hjalti Franzson, 1990). Austasta TEM-mælingin (SEL-10) er um 800 metrum frá holu 9 í Svartsengi. Efri mörk blandlagsbeltisins er nánast á sama dýpi og efri mörk lágviðnámskápunnar. Efri mörk háviðnámskjarnans er á 450 m u.s. en efri mörk epidótbeltisins 140 metrum neðar sem er í samræmi við hliðrunina sem er á Reykjanesi. Þessi tenging viðnámsmálsins við holu 9 staðfestir að Eldvörp og Svartsengi eru eitt og sama svæði.

Hola EG-2 í Eldvörpum er staðsett 1 km norð-vestan við viðnámsmálið á mynd 15, svo samanburður verður að skoða í því ljósi. Ummyndun í holunni bendir til þess að hún sé vel innan jarðhitakerfisins (Hjalti Franzson, 1996), en efri mörk blandlagsbeltisins eru á 400 m u.s. og efri mörk epidótbeltisins 200 metrum neðar. TEM-mæling (SEL-1) er hins vegar aðeins rúmlega 600 metrum austan við holuna og er greinilega í norð-vestur jaðri jarðhitakerfisins eins og sést á viðnámsmáli 8 á mynd 5. Borholan gefur til kynna að svæðið tegi sig í suð-vestur en mælingar vantar til að sjá hversu langt.

5.3 Sandvík

Á viðnámsmálinu Sandvík-Eldvörp á mynd 7 sést að upp af Sandvík eru merki háhitaummyndunar neðan 600 m u.s. en þar eru efri mörk lágviðnámskápunnar. Lágviðnámskápan er þykk, 300-400, metrar og háviðnámskjarninn hæst á 900 m u.s. Þessi háhitaummyndun sýnir að háhitakerfi hefur verið til staðar þarna. Hvort ummyndunin er í jafnvægi við núverandi hitaástand kerfisins verður aðeins ákvarðað með borun.

Reykjaneskerfið og Sandvíkurkerfið eru aðskilin. Þetta sést á mynd 11, sem sýnir viðnám á 1000 m u.s. Háviðnámskjarninn sést ekki í mælingu (17584) á milli svæðanna en þar tengist lágviðnámskápan á 1140 m u.s. Gera má ráð fyrir því að hún sé nokkur hundruð metra þykk þarna því gjarnan þykknar lágviðnámskápan verulega með fjarlægð frá jarðhitasvæði. Sandvíkurkerfið er einnig aðskilið frá Eldvarpakerfinu en lágviðnámskápan tengist á 920 m u.s. á milli þeirra.

5.4 Fagradalsfjall

Mælingar við Fagradalsfjall sýna ekki merki um háhitaummyndun rétt vestan við fjallið eins og grunur var um og er lágviðnámskápan á 1050-1200 metra dýpi þar. Ein mæling austan við Fagradalsfjall sér í lágviðnámsvæðið sem kennt er við Sandfell. Á mynd 17 er sýnt viðnámsnið 12, frá Eldvörpum að Fagradalsfjalli. Mælingar vantar til að sjá stærð jarðhitasvæðisins í Svartsengi í austur og er eðlilegra að fjalla betur um þessar fáu mælingar við Fagradalsfjall í tengslum við fleiri mælingar á þessu svæði.

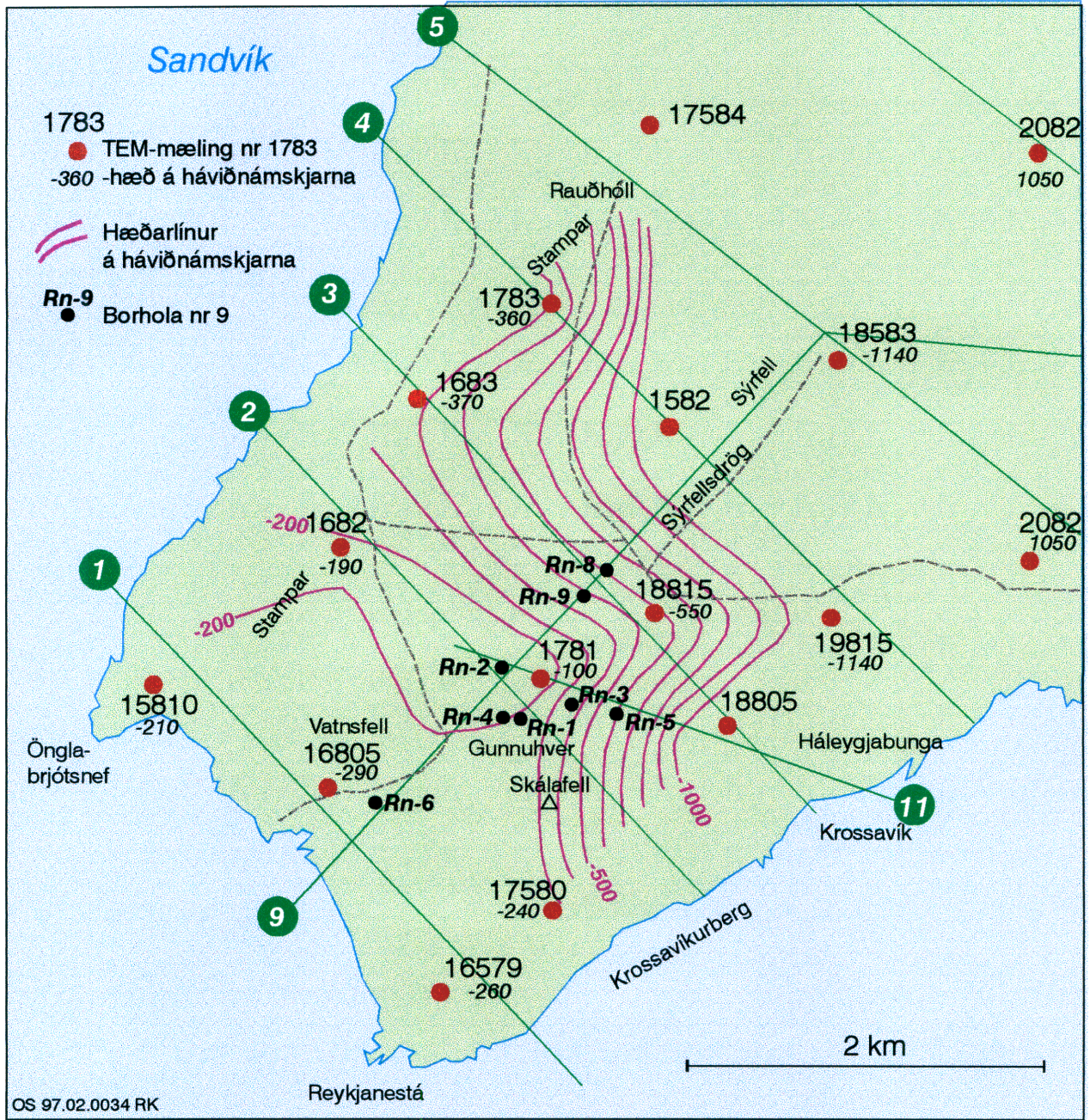
5.5 TEM-mælingar í söltu umhverfi

Af þessum niðurstöðum má sjá að TEM-mælingarnar frá árinu 1996 virðast greina lagskiptingu allt niður á 1000-1200 metra dýpi. Þær greina lágviðnámskápu og háviðnámskjarna á jarðhitasvæðunum á utanverðum Reykjanesskaga. Því er ljóst er að leiðni jarðhitavökvans í söltum jarðhitakerfum er ekki einráð, eins og haldið hefur verið fram til þessa. TEM-mælingarnar "sjá" mismunandi leiðni í ummyndunarbeltum jarðhitakerfanna líkt og í ferskvatnskerfum. Hins vegar er leiðni í háviðnámskjarna og lágviðnámskápu mun meiri í söltum kerfum en ferskvatnskerfum. Viðnámið í lágviðnámskápunni á utanverðum Reykjanesskaga er gjarnan 1-3 Ω m og hækkar svo í 5-10 Ω m í háviðnámskjarnanum. Til samanburðar má skoða viðnámið í Brennisteinsfjöllum, en þangað eru um 30 km frá Svartsengi. Þar er viðnámið í lágviðnámskápunni < 10 Ω m og hækkar svo í tugi eða hundruð Ω m í háviðnámskjarnanum (Ragna Karlsdóttir, 1995). Þetta bendir til þess að leiðni jarðhitavökvans hafi áhrif í leiðni í jarðhitakerfunum til lækkunar viðnámsins í heild en rannsóknin sýnir að TEM-mælingarnar greina samt sem áður mismunandi viðnám í ummyndunarbeltum jarðhitakerfanna.

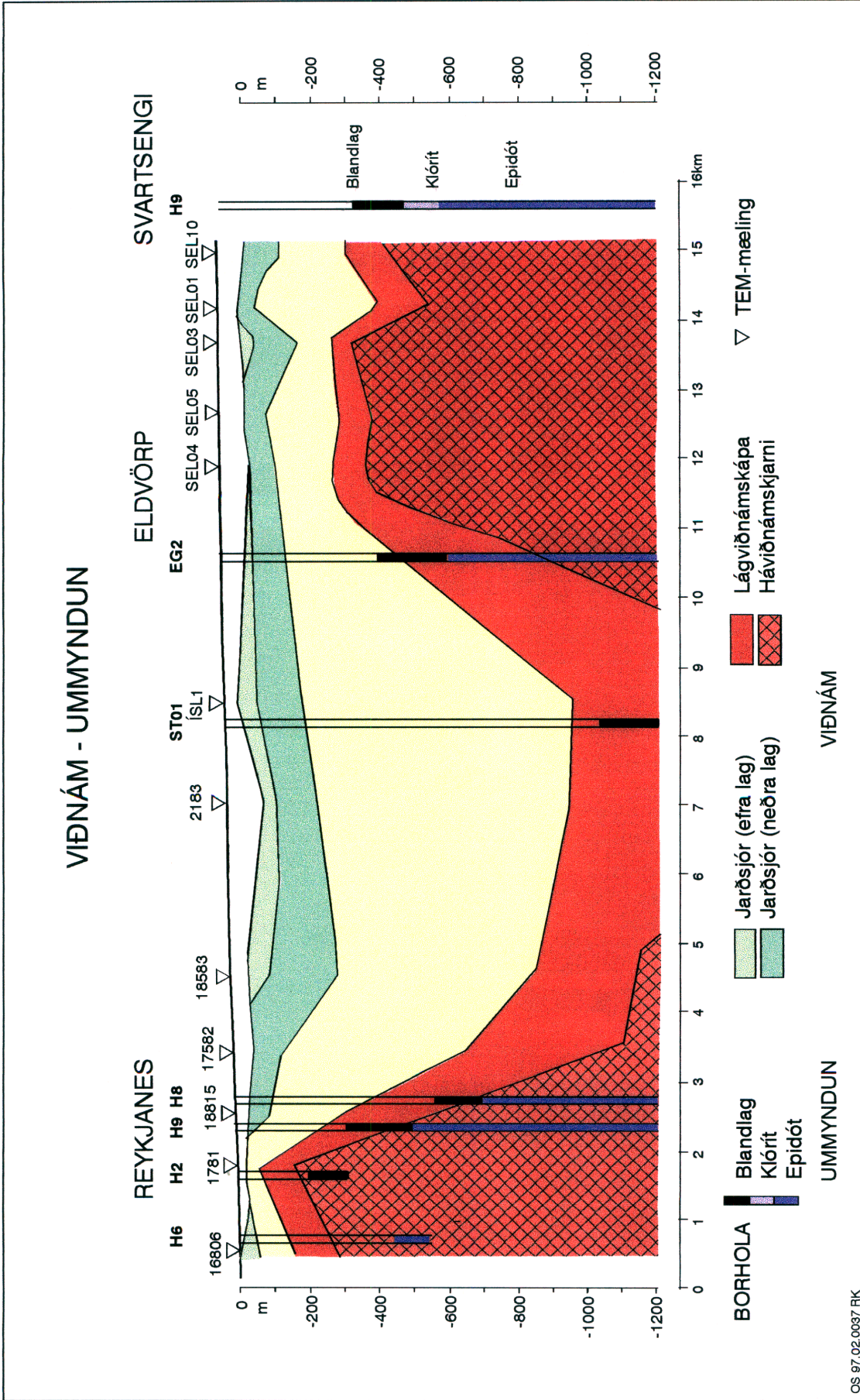
5.6 Lokaorð

Það er athyglisvert að sjá að lágviðnámskápan tengist á milli jarðhitasvæðanna. Á mælisvæði TEM-mælinganna á utanverðum Reykjanesskaga er lágviðnámskápan nánast samfelld á 900-1200 m u.s. Á mynd 15, sem sýnir viðnámsnið 9 (Reykjanes-Eldvörp) og ummyndunarsnið úr holunum á Reykjanesi, Eldvörpum og einni holu í Svartsengi, er einnig sýnt ummyndunarsnið úr holu (ST01), sem boruð er við Stað, vestan Grindavíkur. Í holunni, sem er vel utan háhitasvæðanna, er komið niður á blandlagsbelti á 1040 m u.s. TEM-mæling rétt við holuna sýnir lágviðnámskápuna á 970 m u.s. Þetta rennir stoðum undir það að þessi lágviðnámskápa fylgi blandlagsbeltinu.

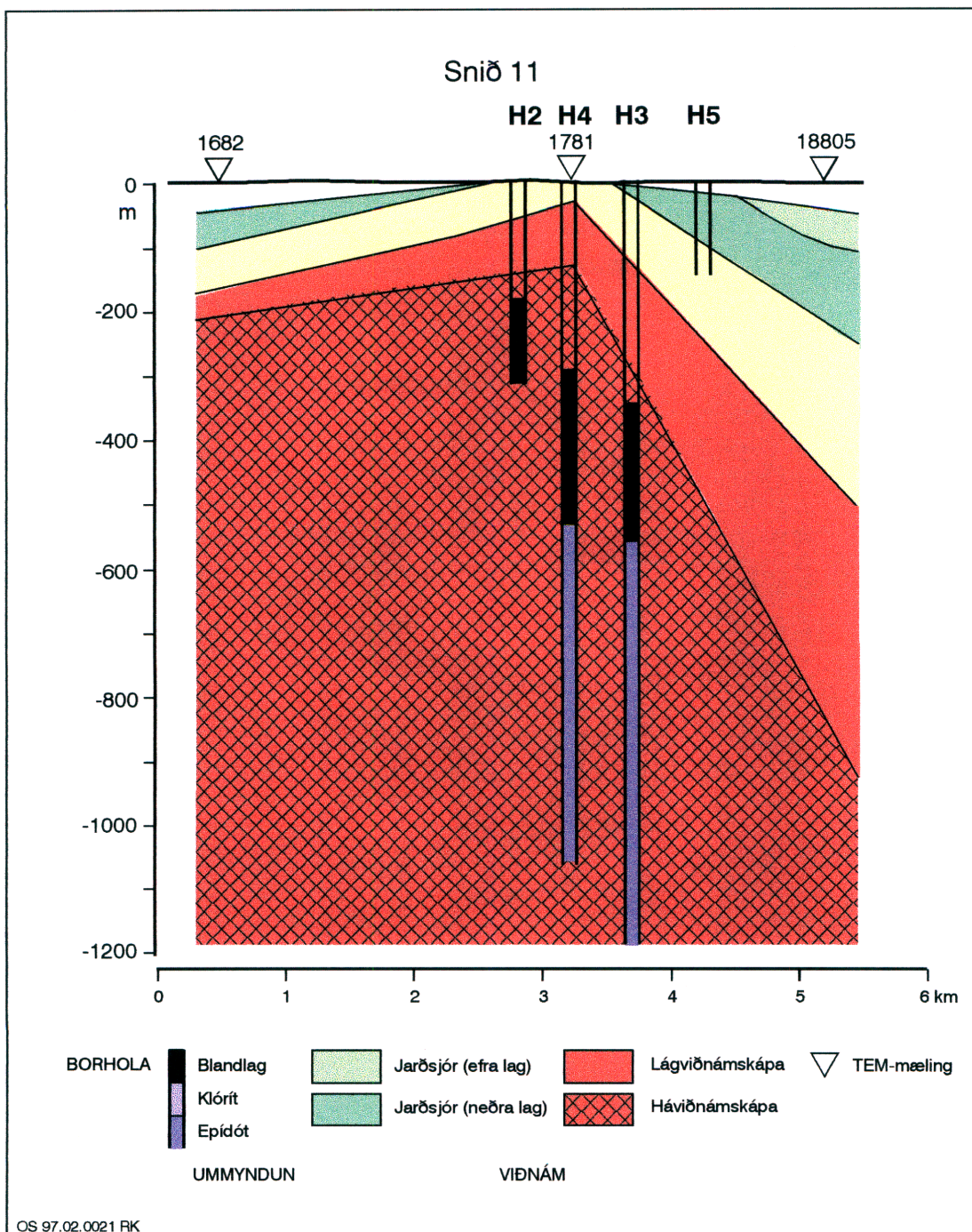
Þetta vekur upp spurningar um: Hvort lágviðnámskápa sé til staðar í gosbeltinu? Hvort hægt sé að rekja dýpi á hana og þar með hvort hún segi til um hitaástand á því dýpi? Með rannsóknum og þróun leitaradferða, sem ná dýpra, er hægt að svara þessum spurningum og þar með gætu hugsanlega opnast möguleikar á því að vinna háhita utan virkustu og um leið fallegustu hluta háhitasvæðanna, og stuðla þannig að bættri sambúð orkuvinnslu og umhverfis.



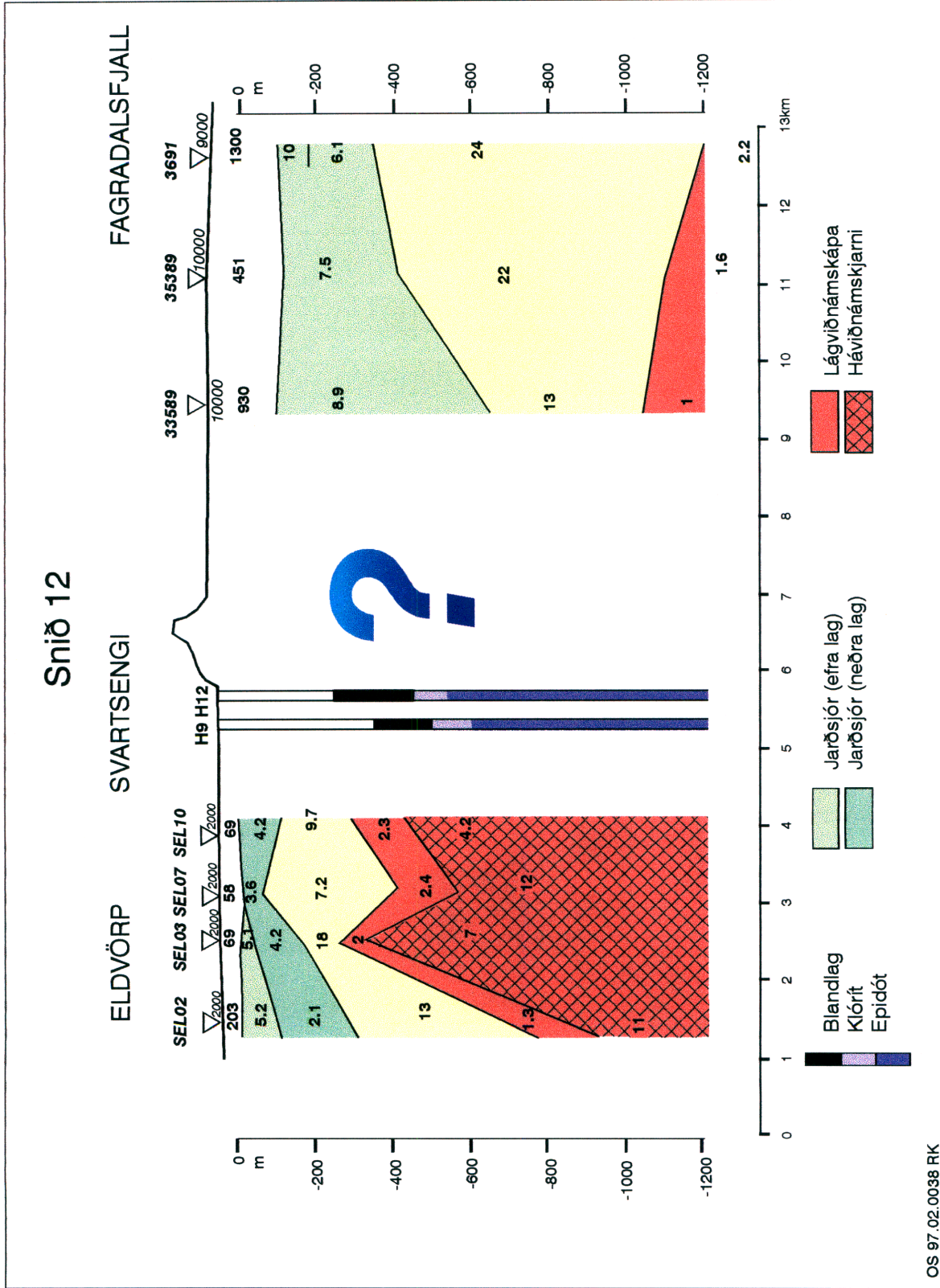
Mynd 14. Hæð á viðnámskjarna á Reykjanesi.



Mynd 15. Viðnám - ummyndun. Viðnámsnið 9, Reykjanas - Eldvörp.



Mynd 16. Viðnám - ummyndun. Viðnámsnið 11 Sandvík - Eldvörp.



Mynd 17. Viðnámsnið 12 Svartsengi - Fagradalsfjall.

6. HEIMILDIR

- Deer W.A., Howie R.A. og Zussman J., 1962: *Rock-Forming Minerals, Vol. 3 Sheet Silicates. Longmans, Green and Co Ltd, London. 270 s.*
- Hjalti Franzson, 1990: *Svartsengi Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess. Orkustofnun OS-90050/JHD-08 41s.*
- Hjalti Franzson, 1996: *Eldvörp, hola EG-2. Jarðfræðirannsóknir. Orkustofnun OS-96030/JHD-05, 65 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.*
- Knútur Árnason, 1984: *The effect of finite potential electrode separation of Schlumberger soundings. 54th Annual International SEG Meeting, Atlanta. Extended Abstracts: 129-132.*
- Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986: *Nesjavellir. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1985. Orkustofnun, OS-86017/JHD-02, 125 s.*
- Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: *Nesjavellir - Ölkelduháls. Yfirborðsrannsóknir 1986. Orkustofnun, OS-87018/JHD-02, 112 s.*
- Knútur Árnason, Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Gylfi Páll Hersir, 1987a: *Resistivity Structure of High-Temperature Geothermal Systems in Iceland. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), XIX General Assembly, Vancouver, Kanada, 9.-22. ágúst. Abstracts V.2: 447.*
- Knútur Árnason, 1989: *Central-Loop Transient ElectroMagnetic 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.*
- Knútur Árnason, 1995: *Áhrif lagskiptingar á niðurstöður viðnámsmælinga. Orkustofnun, OS-95013/JHD-08 B, 12 s.*
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í Kröflu. Orkustofnun OS-96005/JHD-03, 96 s.*

- Lúðvík S Georgsson og Helga Tulinius, 1983: *Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjaneskaga 1981 OG 1982*. Orkustofnun, OS-83049/JHD-09, 70 s.
- Lúðvík S Georgsson, Guðni Axelsson, Hjalti Franzson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1985: *Hola STG-1 á Stað við Grindavík*. Orkustofnun OS-85081/JHD-40 B, 23 s.
- Lúðvík S Georgsson, 1991: *TEM-viðnámsmælingar í Svartsengi og Eldvörpum sumarið 1991*. Orkustofnun OS-91053/JHD-31 B. 12 s.
- Mungania J, 1993: *Borehole geology of well RN-9 Reykjanes, SW-Iceland*. UNU Geothermal Training Programme, Report 12, 1993. 38 s.
- Ólafur G. Flóvenz og Brynjólfur Eyjólfsson, 1981: *Viðnámsmælingar og mat á jarðhitastöðum í Eyjafirði*. Orkustofnun, OS-81029/JHD-17, 65 s.
- Ólafur G Flóvenz, Lúðvík S Georgsson og Knútur Árnason, 1985: Resistivity structure of the upper crust in Iceland. *J. Geophys. Res.*, 90: 100136-10150.
- Ragna Karlsdóttir, 1992: *Námafjall TEM-viðnámsmælingar 1992*. Orkustofnun, OS-93022/JHD-12 B. 34 s.
- Ragna Karlsdóttir, 1995: *Brennisteinsfjöll TEM-Viðnámsmælingar* Orkustofnun, OS-95044/JHD-06 41s.
- Ragna Karlsdóttir og Ólafur G. Flóvenz, 1997: *TEM-Viðnámsmælingar í vestanverðum Eyjafirði* Orkustofnun. (Í prentun).
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988: *Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings*. *Geophysics*, v. 53: 1459-1468.

ENGLISH SUMMARY

This report holds the results of a resistivity survey in the south-western part of Reykjanes peninsula. The survey was carried out in 1996, using central loop TEM (Transient Electromagnetic)-soundings in an area extending from the shoreline in south and west to Kalmannstjörn in north and Eldvörp high temperature area in east. Apart from that a few soundings were carried out in the vicinity of Fagradalsfjall. The interpretation of the resistivity data is presented both as resistivity sections and iso-resistivity maps.

The purpose of the survey was to:

- Delineate the high temperature field at Reykjanes.
- Verify the existence of a low-resistivity anomaly at Sandvík and at Fagradalsfjall.

The resistivity structure of a high temperature field consists of a low-resistivity cap underlain by a resistive core. Comparison between the resistivity structure and the thermal alteration derived from borhole data shows that the resistivity measurements reflect the alteration of the thermal field. The low resistivity-cap corresponds to the conductive smectite- and mixed-layer-clay-zone whereas the high-resistivity core corresponds to the chlorite-epidot-zone. Provided there is an equilibrium at present between temperature and thermal alteration, the results of the resistivity survey can be conveyed directly to temperature. Thus the low-resistivity cap would indicate temperatures above 150° C and the high resistivity core temperatures exceeding 240° C.

The survey reveals an extended high temperature field at Reykjanes. As seen on the resistivity map at 1000 meters below sea level (see fig. 13) the north-eastern boundary of the geothermal field is well defined but boundaries to south and west are off shore. The high-resistivity core reaches the height of -100 m (a.s.l.) in the area where the most geothermal manifestations are seen at the surface. From there it dips slightly towards south and west to about -300 m (a.s.l.) as far as it is possible to detect on land. Towards north and east the core dips steeply. The height of the upper limit of the high resistivity core is seen on fig 16. A good correlation is seen between the resistivity structure and the thermal alteration derived from borhole data.

The resistivity structure at Sandvík indicates high temperature alteration below -600 m (a.s.l.). The high-resistivity core reaches as high as -900 m (a.s.l.) where the temperature would exceed 250° C provided there is equilibrium between thermal alteration and present temperature state. That will however only be verified by drilling.

Reinterpretation of older TEM soundings from Eldvörp geothermal field in view of the results from Reykjanes indicate strongly that Eldvörp and Svartsengi are one system. The high-resistivity core reaches the height of -260 to -280 m (a.s.l.) with thin overlying low-resistivity cap. The easternmost sounding shows the low-resistivity cap at the same depth as the mixed-layer-clay-zone is seen in borhole 9 in Svartsengi at a distance of 800 meters.

The TEM-soundings carried out in this survey do not have a good resolution for the uppermost 100 meters. They show high resistivity surface layer and double layered 150-250 meter thick low resistivity-layer beneath. This low resistivity layer is characterized as double layered with higher resistivity on top and lower resistivity beneath. The layer on top can be explained as a mixed layer of seawater and freshwater from the above lying freshwater-lense detected with Schlumberger-soundings. The lower resistivity can be explained as more concentrated seawater. The sea-water layer is clearly affected by the geothermal fields and how high they reach in the bedrock. It exists as a double layer above Sandvík, on the other hand only the lower part exists over Eldvörp and Reykjanes geothermal fields reaching closer to the surface.

There is no indication of a high temperature alteration west of Fagradalsfjall mountain as hinted by low-resistivity anomaly detected by older Schlumberger soundings.

It has been emphasised in this report that the resistivity soundings reflect the alteration of a geothermal field. This has been verified by comparing the results of resistivity surveys to available borehole data for freshwater geothermal systems such as Nesjavellir-, Námafjall- and Krafla-high temperature fields. Until now it has been stated that in saline high-temperature fields, the conductivity of the thermal fluid would exceed that of the alteration. In this survey, using the TEM-method instead of DC-methods such as the Schlumberger-method, it is clear that the TEM soundings have a resolution down to 1200 meters depth and detect the typical resistivity structure of high temperature geothermal fields even in low-resistivity surroundings as in saline systems. It is however likely that the conductivity of the thermal fluid has a bearing as the resistivity values in both the low-resistivity cap as well as in the high-resistivity core are definitely lower in the saline geothermal systems in Reykjanes Peninsula than in freshwater geothermal systems inland.

VIÐAUKI 1: TEM-mælingar og túlkun þeirra

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

Í rafsegulaðferðum er notað tímaháð rafsegulsvið í stað tímaóháðs 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 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).

TEM-mælingar með straumlykkju sem uppsprettu voru fyrst reyndar hér á landi sumarið 1986. Nesjavallasvæðið varð fyrir valinu sem prufustaður 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 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 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 og tvívið túlkun á jafnstraumsmælingum á háhitasvæðum (Knútur

Árnason, 1987 og 1990).

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 lítil. Þetta gerir ennfremur kleift að gera TEM-mælingar þegar jörð er þakin snjó. Með því að nota vélsleða eða bíla búna til aksturs á snjó má oft, seinni hluta vetrar, komast auðveldlega um mælisvæði sem eru lítt- eða ófær farartækjum að sumarlagi. Helsti gallinn við mælivinnu seinni part vetrar er sá að meiri hætta er á að veður hamli vinnu en að sumri til.

Túlkun viðnámsmælinga

Mæliniðurstöður viðnámsmælinga eru yfirleitt settar fram sem sýndarviðnám. Samband uppsprettumerkis og mælds merkis er háð eðlisviðnámi jarðar. Fyrir mælingar sem kanna viðnám sem fall af dýpi er sýndarviðnámið fært sem fall af fjarlægð milli straum- og 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 raunverulega dreifingu eðlisviðnáms jarðarinnar, eftir því sem kostur er, út frá sýndarviðnámsferlunum,

Einvið 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 frumtúlkun 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.

Tvívið túlkun gerir ráð fyrir því að eðlisviðnám jarðar geti breyst með dýpi og í eina lárétta stefnu. Tvívið túlkun er mun tímafrekari og flóknari ein einvið túlkun en gefur að jafnaði mun áreiðanlegri niðurstöður. Orkustofnun hefur yfir að ráða forritum til tvíviðrar túlkunar jafnstraumsmælinga. Tvívið túlkun á TEM-mælingum er mun flókanari og er enn á rannsóknarstigi. Orkustofnun kom sér fyrst upp hugbúnaði til tvíviðrar 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 tvívið 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 kolli 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 sjálfvirkt.

VIÐAUKI 2: Mæliferlar og túlkun

