



**ORKUSTOFNUN**

**Rannsóknasvið**

**TEM-viðnámsmælingar  
í Svartsengi 1997**

**Ragna Karlsdóttir**

**Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja**

**1998**

**OS-98025**





**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630235

**Ragna Karlsdóttir**

# **TEM-VIÐNÁMMSMÆLINGAR Í SVARTSENGI 1997**

**Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja**

**OS-98025**

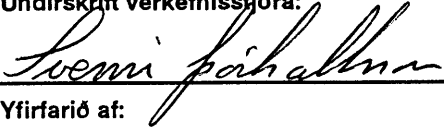
**Maí 1998**

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

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

<b>Skýrsla nr.:</b> OS-98025	<b>Dags.:</b> Maí 1998	<b>Dreifing:</b> <input type="checkbox"/> Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð til Apríl 2002
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> TEM-VIÐNÁMSMÆLINGAR Í SVARTSENGI 1997	<b>Upplag:</b> 20	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 44	
<b>Höfundar:</b> Ragna Karlsdóttir	<b>Verkefnisstjóri:</b> Sverrir Þórhallsson	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Mat á stærð háhitakerfis, framhaldsrannsókn	<b>Verknúmer:</b> 630 235	
<b>Unnið fyrir:</b> Hitaveitu Suðurnesja		
<b>Samvinnuaðilar:</b>		
<b>Útdráttur:</b> Í skýrslunni er greint frá niðurstöðum TEM-viðnámsmælinga sem gerðar voru sumarið 1997 á svæðinu umhverfis Svartsengi og Eldvörp í þeim tilgangi að afmarka stærð háhitasvæðisins þar. Verkið er í raun framhald viðnámsmælinga á utanverðum Reykjanesskaga frá 1996, sem sýndu að Eldvörp og Svartsengi eru eitt jarðhitasvæði. TEM-viðnámsmælingar greina dýpi betur en eldri mæliaðferðir og á Reykjanesi sýna þær kerfisbundna drætti í viðnámskipan í söltum háhitakerfum eins og á Reykjanesskag, sem tengja má við ummyndun af völdum jarðhitavirkni. Helstu niðurstöður mælinganna 1997 eru þær að samfelld jarðhitakerfi virðist ná frá Eldvörpum í suðvestri um Svartsengi og að Arnarsetri í norðaustri og er flatarmál þess á 1000 m dýpi (u.s.) um 30 ferkílómetrar. Lágviðnámskápa sem umlykur jarðhitasvæðin og markar ytri mörk þeirra nær yfir allt rannsóknarsvæðið frá Reykjanesi að Fagradalsfjalli. Hún er samfelld milli háhitasvæðanna og er á 800-1200 m dýpi u.s. á milli Reykjaness og Eldvarpa og á 1200-1500 m dýpi u.s. austan við Svartsengi. Viðnámskipanin virðist endurspegla jarðhitaummyndun bergsins, en ekki er ljóst hvort jafnvægi er á milli ummyndunar og hita né heldur hvort háviðnámskjarninn tengist á milli háhitasvæðanna.		
<b>Lykilord:</b> Svartsengi, háhitasvæði, jarðhitakerfi viðnámsmælingar, stærð svæðis/kerfis, lágviðnámskápa, háviðnámskjarni, jarðsjór	<b>ISBN-númer:</b> ISBN 9979-68-015-6	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> KÁ, PI	



## ÁGRIP

Samfellt háhitakerfi í Svartsengi og Eldvörpum er um 30 ferkílómetrar að flatarmáli á 1000 metra dýpi (u.s.). Flatarmál núverandi borsvæðis í Svartsengi er um hálfur ferkílómetri.

Lágviðnámskápa, sem umlykur jarðhitasvæðin og markar ytri mörk þeirra, nær yfir allt rannsóknarsvæðið frá Reykjanesi að Fagradalsfjalli. Hún er samfelld milli háhitasvæðanna og er á 800-1200 metra dýpi u.s. á milli Reykjanes og Eldvarpa og á 1200-1500 metra dýpi u.s. austan við Svartsengi. Viðnámsskipanin virðist endurspegla jarðhitaummyndun bergsins, en ekki er ljóst, hvort jafnvægi er á milli ummyndunar og hita né heldur hvort háviðnámskjarninn tengist á milli háhitasvæðanna.

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA	5
3. FRAMKVÆMD MÆLINGA	6
4. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA OG NIÐURSTÖÐUR	9
4.1 Viðnámssnið	9
4.2 Dýpi á jarðhitakerfið og stærð þess	10
4.3 Jarðsjór	11
5. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	27
6. HEIMILDIR	27
VIÐAUKI 1: Lýsing á TEM-mæliaðferðinni og túlkun mælinga	31
VIÐAUKI 2: Einstakar mælingar og túlkun þeirra	33
TAFLA 1. Hnit og hæð TEM-mælinga á Reykjanesi 1997	7
<b>MYNDIR</b>	
Mynd 1. Staðsetning TEM-viðnámsmælinga á utanverðum Reykjaneskaga	8
Mynd 2. Viðnámssnið 1	12
Mynd 3. Viðnámssnið 2	13
Mynd 4. Viðnámssnið 3	14
Mynd 5. Viðnámssnið 4	15
Mynd 6. Viðnámssnið 5	16
Mynd 7. Viðnámssnið 6	17
Mynd 8. Viðnámssnið 7	18
Mynd 9. Viðnámssnið 8	19
Mynd 10. Viðnámssnið 9	20
Mynd 11. Viðnámssnið 10	21
Mynd 12. Viðnámssnið 11	22
Mynd 13. Efra borð lágviðnámskápu, m y.s.	23
Mynd 14. Hæð á háviðnámskjarna	24
Mynd 15. Samanburður á viðnámi og ummyndun í borholum	25
Mynd 16. Jarðsjór á utanverðum Reykjaneskaga	26



## 1. INNGANGUR

Sumarið 1997 var svæðið umhverfis Svartsengi og Eldvörp rannsakað með TEM-viðnámsmælingum og var tilgangur verksins að afmarka stærð háhitasvæðisins.

TEM-mælingar sem gerðar voru á utanverðum Reykjanesskaga 1996 (Ragna Karlsdóttir, 1997) sýndu að Eldvörp og Svartsengi eru eitt svæði, en þær mælingar, svo og TEM-mælingar í Eldvörpum frá 1991 (Lúðvík S. Georgsson, 1991), afmörkuðu einungis vesturjaðar Eldvarpa-Svartsengissvæðisins. Því var ákveðið að bæta við mælingum til að ákvarða stærð jarðhitakerfisins. Í raun má líta á þetta verkefni sem framhald mælinganna frá 1996.

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 mæliaðferð (Schlumberger-mælingum). Komið hefur í ljós að TEM-mælingarnar greina dýpi betur en Schlumbergermælingar og á Reykjanesi sást að þær greina kerfisbundna drætti í viðnámsskipan í söltum háhitakerfum eins og á Reykjanesskaga, sem tengja má við ummyndun af völdum jarðhitavirkni. Um samband eðlisviðnáms og jarðhita er dregið á hér í næsta kafla en einnig vísað í skýrsluna um mælingarnar frá 1996.

Lýsing á TEM-mæliaðferðinni og túlkun mælinga er í viðauka 1.

## 2. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA

Ástæða þess að viðnámsmælingum er beitt við jarðhitarannsóknir er sú, að berg, mettað heitu vatni leiðir betur rafstraum en þurrt berg. Eðlisviðnám í vatnsmettuðu bergi er auk þess háð poruhluta bergsins, viðnámi vatnsins, hitastigi og ummyndun bergsins. Þessir þættir spila saman á flókinn hátt, sem enn er ekki skilinn að fullu.

Hér á eftir verður dregið á helstu þætti sem eru ráðandi í eðlisviðnámi í háhitakerfum á Íslandi. Við rannsóknir á háhitasvæðinu á Nesjavöllum 1985 og 1986 fékkst allstarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins og sú mynd var borin saman við umfangsmikil gögn úr borholum (Knútur Árnason o. fl., 1986, 1987a, 1987b). Þá kom í ljós góða fylgni milli hitastigs, ummyndunar og eðlisviðnáms. Þar sem ríkir jafnvægi á milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndunarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979). Við hitastig frá 50-100° C og upp í 200° C er smektít og zeolítar ráðandi ummyndunarsteindir. Frá 200° C upp í 230° C eru zeolítar 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  $\Omega$ m í yfirborði (ógróíð hraun),
- viðnámslækkun niður í 500-1000  $\Omega$ m við vatnsborð,
- lágviðnámskápa með  $< 10$   $\Omega$ m,
- háviðnámskjarni undir lágviðnámskápunni með viðnámi allt að því stærðargráðu hærra.

Samanburður á eðlisviðnámi, berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu sýndi að lágviðnámskápan svarar til smektít-zeolítabeltisins við hitastig 50-200° C. Háviðnámskjarninn svarar til klórft-epidótbeltisins við hitastig >240° C. Orsök mismunandi leiðni í ummyndunarbeltonum liggur í jónaskiptaeiginleikum einstakra steinda. Smektít og blandlagssteindirnar eru lagsflök með lausbundnar jónir og því mikla jónaskiptaeiginleika og þar af leiðandi með mikla leiðni. Í klórfti eru jónirnar hins vegar bundnar í kristalgrind og viðnámið því miklu hærra en í leir-steindunum (Deer o.fl.,1962).

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

Við viðnámsrannsóknirnar á utanverðu Reykjanesi 1996 var í fyrsta sinn beitt TEM-mælingum við rannsóknir á söltu jarðhitakerfi hér á landi. Fram að þeim tíma var talið að ummyndunarleiðnin væri ráðandi í ósöltum jarðhitakerfum en í söltum jarðhitakerfum væri leiðni jarðhitavökvans ráðandi og því sæjust ekki áhrif ummyndunarinnar. Í ljós kom að TEM-mælingarnar gátu greint viðnámsskipan í söltu kerfi sem er í samræmi við viðnámsskipan ósöltu jarðhitakerfanna. Þær greina lágviðnámskápu og háviðnámskjarna á jarðhitasvæðunum á utanverðum Reykjaneskaga svo ljóst er að leiðni jarðhitavökvans í söltum jarðhitakerfum er ekki einráð. TEM-mælingarnar "sjá" mismunandi leiðni í ummyndunarbeltonum jarðhitakerfanna líkt og í ferskvatnskerfum. Hins vegar er leiðni í háviðnámskjarna og lágviðnámskápu mun lægri í söltum kerfum en ferskum svo leiðni jarðhitavökvans hefur áhrif til lækkunar á viðnáminu (Ragna Karlsdóttir, 1997).

### 3. FRAMKVÆMD MÆLINGA

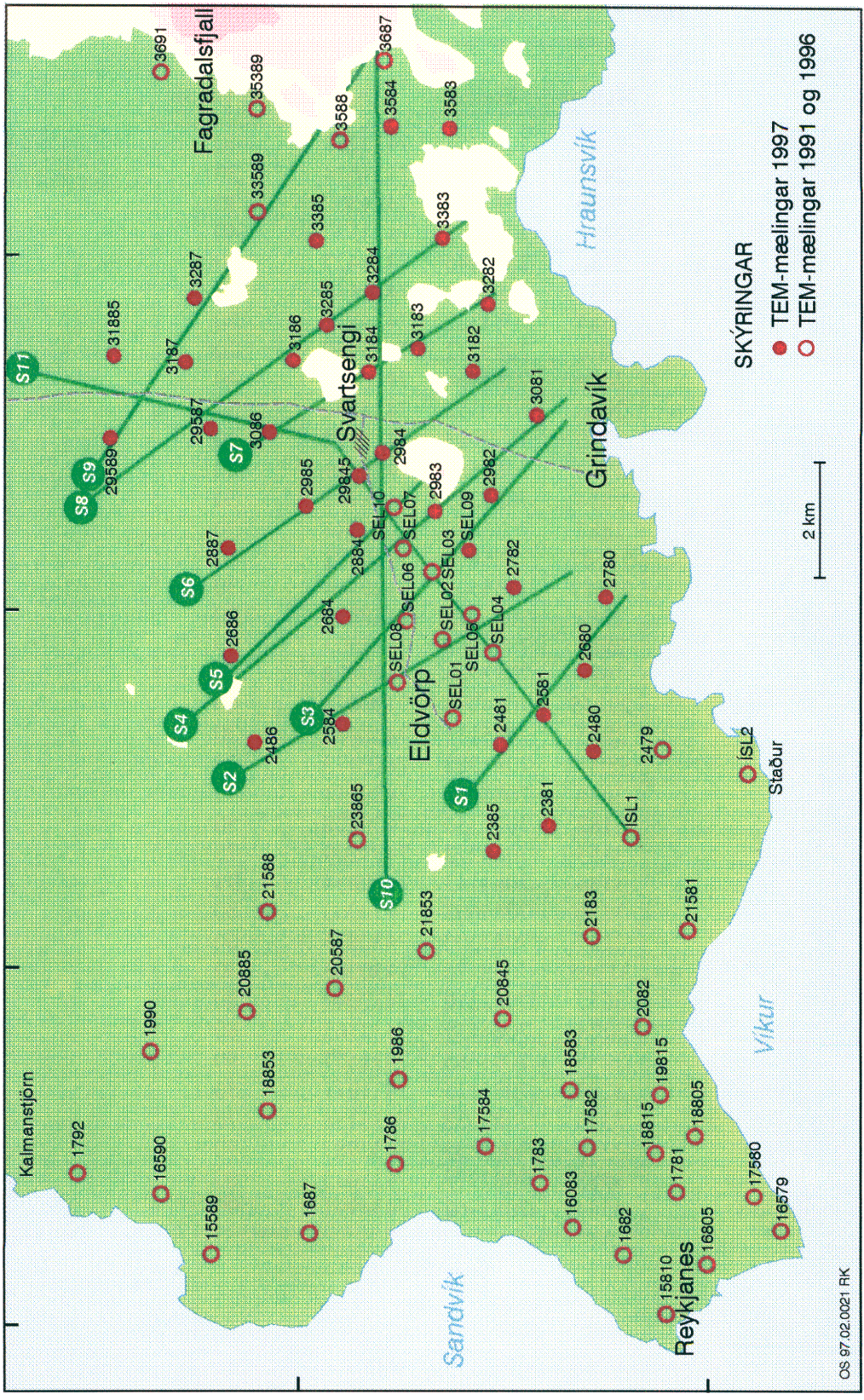
Rannsóknin fór fram sumarið 1997. Mælingarnar urðu alls 37, og þekja svæðið frá Eldvörpum allt austur að Fagradalsfjalli og norður fyrir Arnarsetur. Víðast hvar er erfitt að komast að mælistöðum og á nokkrum stöðum þurfti að bera mælibúnaðinn nokkurn spól. Heildarafköst urðu mjög góð miðað við aðstæður eða 2,5 mælingar á dag að meðaltali, sem verður að teljast gott á landsvæði eins og í Illahrauni.

Staðsetning allra TEM-mælinga á utanverðum Reykjaneskaga, allt austur að Fagradalsfjalli er sýnd á mynd 1. Hnit TEM-mælinga frá 1997 og hæð er sýnd í töflu 1 en einstakar mælingar og túlkun þeirra er í viðauka 2.

Tafla-1. Hnit og hæð TEM-mælinga á Reykjanesi 1997.

Mæling	Breidd	Lengd	Hæð yfir sjó
2381	7080778	7423257	40
2479	7078834	7424614	30
2480	7080027	7424562	30
2481	7081643	7424527	40
2486	7085846	7424439	40
2581	7080940	7425114	30
2584	7084332	7424817	50
2680	7080272	7425930	20
2684	7084464	7426621	40
2686	7086358	7425890	30
2780	7079943	7427178	10
2782	7081567	7427224	20
2884	7084275	7428107	30
2887	7086490	7427644	30
29587	7086897	7429681	60
29589	7088502	7429504	30
2982	7082013	7428833	20
2983	7082982	7428503	30
2984	7083944	7429428	30
29845	7084294	7429023	60
2985	7085111	7428482	30
3081	7081282	7430173	20
3086	7085696	7429711	40
3182	7082350	7430828	50
3183	7083273	7431209	75
3184	7084145	7430834	95
3186	7085602	7430903	80
3187	7087300	7430875	60
31885	7088476	7430903	30
3282	7082210	7432049	80
3284	7084189	7432163	80
3285	7084885	7431527	80
3287	7087225	7431911	80
3383	7083038	7433188	70
3385	7085233	7432987	80
3583	7082979	7435035	80
3584	7083962	7434991	90





Mynd 1. Staðsetning allra TEM-viðnámsmælinga á utanverðum Reykjanessskaga.



## 4. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA OG NIÐURSTÖÐUR

Líta má á mælingarnar 1997 sem framhald mælinga frá 1996. Við úrvinnslu mælinganna er beitt einvörðri túlkun, þ.e. lárétt lagskipt líkan fæst undir hverjum mælistað og líkónin eru síðan tengd saman. Um túlkun viðnámsmælinga er vísað í viðauka. Niðurstöður mælinganna eru settar fram sem viðnámsenni og kort sem sýna efri mörk lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans.

Áður en hverju sniði er lýst fyrir sig er dregið á niðurstöður í grófum dráttum.

- Yfirborðslag með háu viðnámi, oft tvískiptu, kemur fram í öllum mælingum. Lag þetta er um eða innan við 100 metra þykkt og viðnámið 500 og allt upp í 10000  $\Omega$ m.
- Neðan við yfirborðslagið er lágviðnámslag með viðnám <10  $\Omega$ m. Þetta lag er tvískipt, hærra viðnám (5-10  $\Omega$ m) ofan á og lægra viðnám undir (1,5-5  $\Omega$ m). Trúlega er þetta jarðsjór sem blandast ferskvatnslinsunni efst í laginu en er saltari og því með lægra viðnámi neðst. Þetta lag (jarðsjór) er tvískipt í öllum mælingum á svæðinu frá Reykjanesi og um eða austur fyrir Svartsengi. Þar fyrir austan sést tvískiptingin ekki og viðnámið er 5-10  $\Omega$ m.
- Neðan við jarðsjávarlagið er millilag með misháu viðnámi, þ. e. lægra að jafnaði yfir jarðhitasvæðunum og hærra utan þeirra.
- Lágviðnámskápa með viðnám oftast 1-3  $\Omega$ m liggur utan á jarðhitasvæðunum á Reykjanesi, í Sandvík og Svartsengi-Eldvörpum. 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 undir lágviðnámskápunni sést í jarðhitasvæðunum á Reykjanesi, í Svartsengi-Eldvörpum og Sandvík.

### 4.1 Viðnámsenni

Viðnámsenni S1-S9 liggja NV-SA og skera Eldvörp og Svartsengi. Jarhitakerfið kemur fram sem aflangur hryggur með SV-NA stefnu frá Eldvörpum að Svartsengi en sveigir þá til norðlægar stefnu.

**Snið S1** (mynd 2) rétt nartar í suðvestasta hluta kerfisins. Undir yfirborðslaginu er jarðsjávarlagið (tvískipt). Háviðnámskjarninn er á 280 m u.s. í mælingu 2481 og dýpkar á hann til suðausturs. Af mælingum fyrra árs er vitað að það dýpkar á hann til norðvesturs. Þunn lágviðnámskápa liggur utan á háviðnámskjarnanum.

**Snið S2** (mynd 3) og **snið S3** (mynd 4) eru mjög svipuð. Skýr toppur á háviðnámskjarnanum og lágviðnámskápa yfir. Toppur lágviðnámskápunnar er í u.þ.b. sömu hæð í sniðum S1, S2 og S3 en háviðnámskjarninn er hæstur í sniði S1, síðan dýpkar aðeins á hann til austurs frá Eldvörpum (snið S2) en grynkar svo á hann aftur þegar enn austar dregur (snið S3). Jarðsjávarlagið er tvískipt í báðum sniðum nema yfir hæsta toppi jarðhitakerfisins í hvoru sniði, þar nær efra lagið ekki yfir.

**Snið S4** (mynd 5) og **snið S5** (mynd 6) liggja enn austar og er snið 5 rétt vestan við núverandi borsvæði í Svartsengi. Viðnámsmyndin er lík og í fyrri sniðum, en háviðnámskjarninn heldur breiðari um sig. Jarðsjávarlagið er tvískipt suðaustan við jarðhitakerfið. Efra lagið nær ekki yfir topp jarðhitakerfisins og norðvestan við sést tvískiptingin ekki.

**Snið S6** (mynd 7) liggur um borsvæði Svartsengis. Toppur lágviðnámskápunnar er í 300 m u.s. og toppur háviðnámskjarnans um 250 metrum neðar. Neðra lag (lægra viðnám) jarðsjávarlagsins liggur yfir jarðhitakerfinu eins og í sniðunum vestan við en tvískiptingin í jarðsjávarlaginu



er nú einnig horfin suðaustan við jarðhitakerfið.

**Snið S7** (mynd 8) liggur samsíða sniði 6, u.þ.b. 1 km norðaustar og sýnir að á þessum slóðum eru mörk jarðhitakerfisins mjög skörp til suðausturs. Neðra lag jarðsjávarlagsins liggur yfir jarðhitakerfinu en utan við jarðhitakerfið er tvískiptingin horfin.

**Snið S8** (mynd 9) og **snið S9** (mynd 10) skera nyrsta hluta jarðhitakerfisins. Þau eru áþekk að viðnámskipan. Toppur lágviðnámskápunnar er í 300-350 m u.s. og toppur háviðnámskjarnans 250 metrum neðar í sniði S8, en hærri eða um 400 m u.s undir Arnarsetri í sniði S9. Austast í sniði S9 sést í háviðnámskjarna. Líklegast sést þarna í áhrif frá jarðhitakerfinu við Sandfell, austan Fagradalsfjalls og verður ekki rætt nánar hér. Neðri hluti jarðsjávarlagsins sést yfir jarðhitakerfinu og það er tvískipt yfir jarðhitakerfinu í nyrsta sniðinu en ekki utan jarðhitakerfisins.

**Snið 10** (mynd 11) liggur A-V þvert yfir háhitasvæðið, rétt sunnan við borsvæðið í Svartsengi og nær allt frá Sandfelli í vestri, austur að Fagradalsfjalli. Lágviðnámskápan er á um 300 m u.s. og háviðnámskjarninn um 100 metrum neðar, þar sem hann er hæstur.

**Snið 11** (mynd 12) liggur nánast eftir háhrygg jarðhitakerfisins frá SV til NA. Inn á sniðið eru settar holur 9 og 12 í Svartsengi og hola ST-01 við Stað í Grindavík og sýnt ummyndunarsnið úr þeim. Blandlagsbeltið í holunum er á sama dýptarbili og lágviðnámskápan. Ummyndunarsnið úr holu (ST01), sem boruð er við Stað, vestan Grindavíkur vel utan háhitasvæðisins, sýnir efri mörk blandlagsbeltis á 1040 m u.s. (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1985), TEM-mæling rétt við holuna sýnir lágviðnámskápuna á 970 m u.s. Þetta rennir stoðum undir það að lágviðnámskápan fylgi blandlagsbeltinu. Neðan við hækkar viðnámið þegar komið er niður í klórít- og ep-idótumyndun (háviðnámskjarnann).

## 4.2 Dýpi á jarðhitakerfið og stærð þess

Eins og vikið er að hér að framan "sáu" eldri viðnámsmælingar einungis lága viðnámið í efsta hluta jarðhitakerfisins. Þær hafa í raun aðeins skynjað efsta hluta lágviðnámskápunnar, en einnig átt erfitt með að aðskilja hana frá jarðsjónum. Þær sáu lögun kerfisins næst yfirborði (Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius, 1983), og lögun lágviðnámsvæðisins í eldri mælingum er hin sama og á efsta hluta kerfisins samkvæmt TEM-mælingunum. TEM-mælingarnar sjá hins vegar háviðnámskjarnann sem sýnir útbreiðslu háhitakerfisins með dýpi.

Til að gera sér mynd af stærð og lögun jarðhitakerfisins eru sett fram kort sem sýna annars vegar hæð (m y.s.) á efri mörkum lágviðnámskápunnar og hins vegar hæð (m y.s.) á efri mörkum háviðnámskjarnans. Segja má að lágviðnámskápan ákvarði mörk háhitaummyndunarinnar. Á mynd 13 sést hæð á efri mörkum lágviðnámsþekjunnar allt frá Reykjanesi austur að Fagradalsfjalli. Á milli háhitasvæðanna er lágviðnámskápan á 800-1100 metra dýpi undir sjávarmáli. Hún nær þar upp í yfirborð eins og á Reykjanesi, en þar nær hitavæðið að öllum líkindum út fyrir strandlínuna og ekki hægt að segja til um lögun jarðhitakerfisins. Lægri toppur eða upp í 400 metra undir sjávarmáli sést yfir Sandvíkursvæðinu. Eldvörp-Svartsengi koma síðan fram sem aflangur hryggur með NA-SV stefnu. Hryggurinn nær hæst í 245-260 metra undir sjávarmáli, og er hæstur í Eldvörpum en er um 50 metrum lægri undir borsvæðinu í Svartsengi. Við Kalmans-tjörn, Stað svo og suðaustast á mælisvæðinu er eins og aðeins grynna á lágviðnámskápuna. Þetta verður að taka með nokkurri varúð því áhrif sjávar geta komið svona fram.

Á mynd 14 sést hæð á efri mörkum háviðnámskjarnans. Drættirnir eru miklu skarpari hér. Háviðnámskjarninn kemur fram sem hryggur með NA-SV stefnu. Háviðnámskjarninn rís hæst í Eldvörpum í 250 metra undir sjávarmáli en hrygglangan er í 300 metra hæð (u.s.) allt norður að Arnarsetri. Núverandi borsvæði í Svartsengi er rétt utan í háhryggnum. Segja má að háviðnámskjarninn afmarki háhitakerfið. Flatarmál háhitakerfisins í Svartsengi-Eldvörpum, á 1000 metra dýpi undir sjávarmáli, er tæplega 30 ferkílómetrar samkvæmt kortinu á mynd 14.

Ummyndunarsnið í gegnum holur 9, 4 og 12 í Svartsengi (Hjalti Fransson, 1990) er sýnt á mynd 15 ásamt niðurstöðum TEM-mælinganna. Þar er einnig færður inn berghiti, sem reiknaður er út frá hitamælingum í holunum (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991). Rétt er að taka fram að viðnámsmælingarnar eru í nokkurri fjarlægð frá holunum og því getur verið meira landslag í viðnámsmyndinni en þetta snið gefur til kynna.

Eins og vikið er að áður er blandlagsbeltið í holunum á sama dýptarbili og lágviðnámskápan. Ummyndunarsnið úr holu (ST01), sem boruð er við Stað vestan Grindavíkur vel utan háhitasvæðisins, sýnir efri mörk blandlagsbeltis á 1040 m u.s. (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1985), og TEM-mæling rétt við holuna sýnir lágviðnámskápuna á 970 m u.s. Þetta rennir stöðum undir það að lágviðnámskápan fylgi blandlagsbeltinu. Neðan við hækkar viðnámið þegar komið er niður í klórít- og epidótummyndun (háviðnámskjarnann).

### 4.3 Jarðsjór

Í öllum mælingum utan jarðhitasvæðanna er 150-250 metra þykkt lágviðnámslag undir háu yfirborðslagi. Þetta lágviðnámslag er tvískipt vestan til á rannsóknarsvæðinu en eitt lag austan til. 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 vökvá lækkar með aukinni seltu og hækkanði hita og getur því viðnámsdreifingin í jarðsjónum endurspeglad seltu og/eða hitastig.

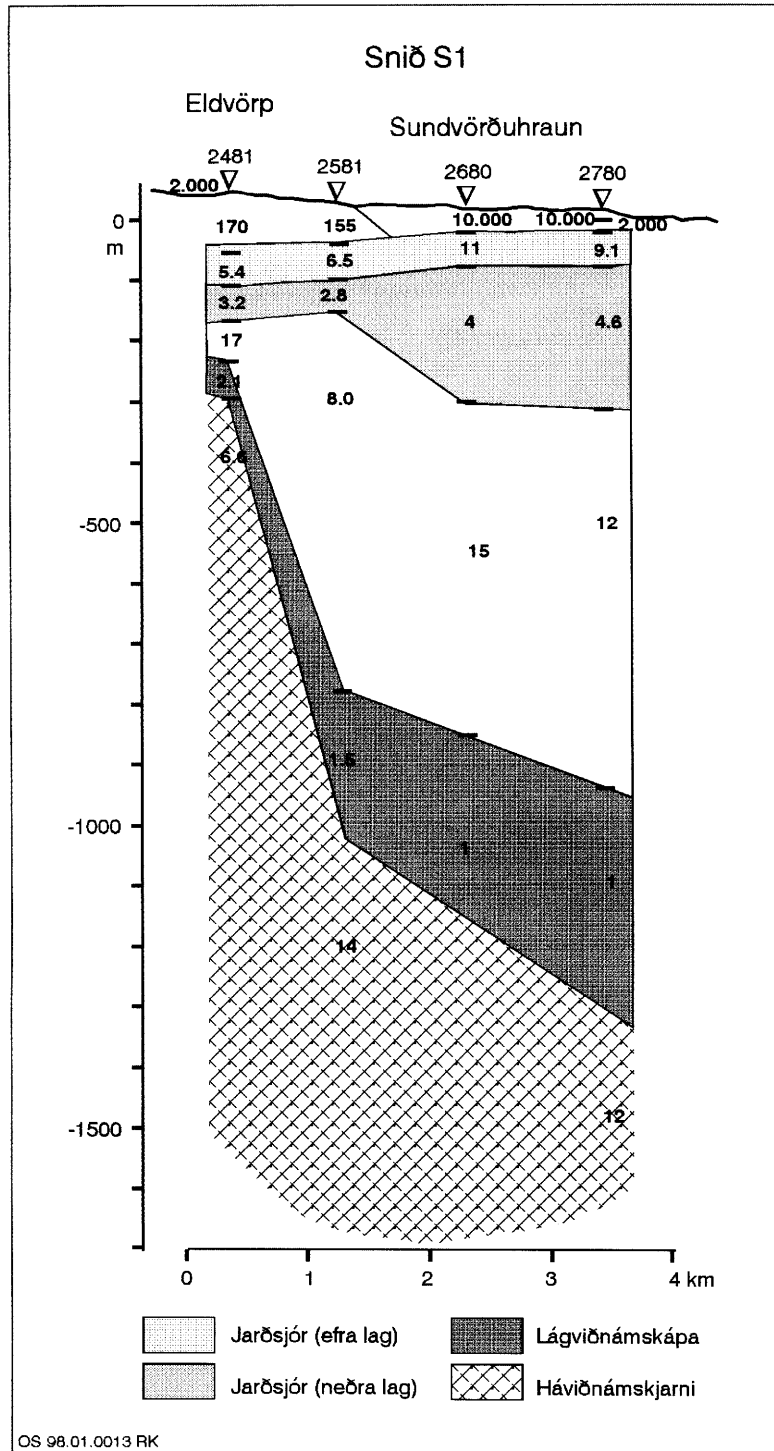
Þar sem lágviðnámslagið er tvískipt er hærra viðnám í efri hluta lagsins en lægra í neðri hluta þess. Efra lagið getur verið sjór blandaður fersku vatni úr ferskvatnslinsunni sem liggur ofan á. TEM-mælingarnar hafa ekki góða upplausn fyrir efstu 100 metra jarðar og sjá því ekki linsuna.

Hér er ennfremur sett fram sú tilgáta að viðnámslækkunin í neðra laginu endurspegli einnig hitadreifingu í laginu.

Efra lagið liggur upp að jarðhitasvæðunum á Reykjanesi og í Eldvörpum-Svartsengi (sjá mynd 16). Norðvestan við Svartsengi svo og austan við, er jarðsjávarlagið eitt. Trúlega er seltan orðin minni á þessum slóðum og lagið jafngildi efra lagsins vestar á Skaganum. Efra lagið nær yfir allt svæðið frá Reykjanesi og austur að Fagradalsfjalli nema yfir toppi háhitasvæðanna á Reykjanesi og í Svartsengi-Eldvörpum. Neðra lagið liggur yfir vesturhluta rannsóknarsvæðisins, yfir háhitasvæðunum á Reykjanesi og Eldvörpum-Svartsengi. Það finnst ekki í nokkrum mælingum norðan við, né í mælingunum austan við Svartsengi.

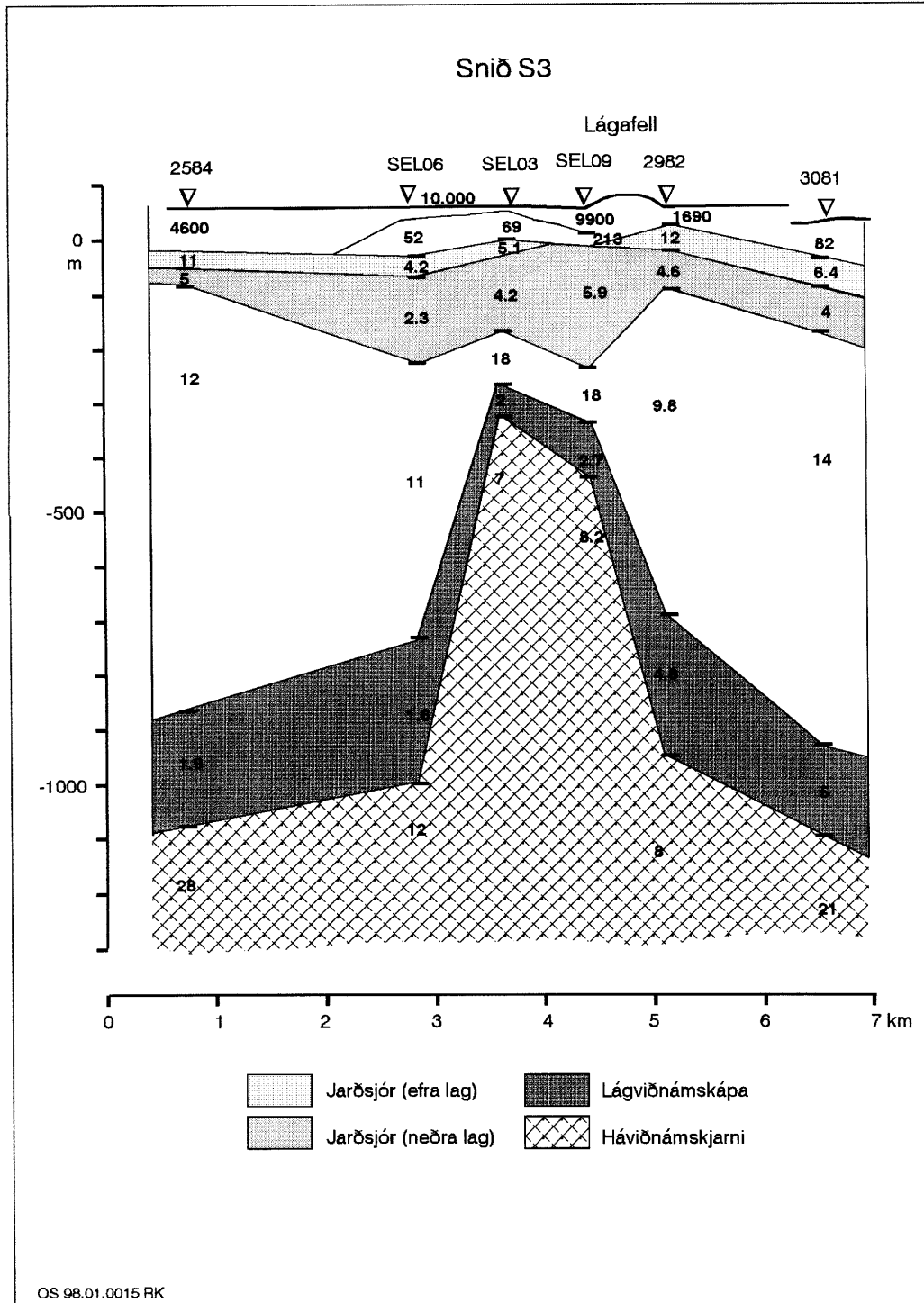
Hvað viðnámsdreifingin í jarðsjónum þýðir er ekki ljóst. Þær skýringar sem settar eru fram hér á undan eru getgátur, sem ekki verða sannprófaðar nema með samanburði við mælingar á seltu og hitastigi úr borholum. Þetta getur hins vegar verið áhugavert fyrir þá sem vinna sjó, oft volgan, úr grunnnum holum.

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.



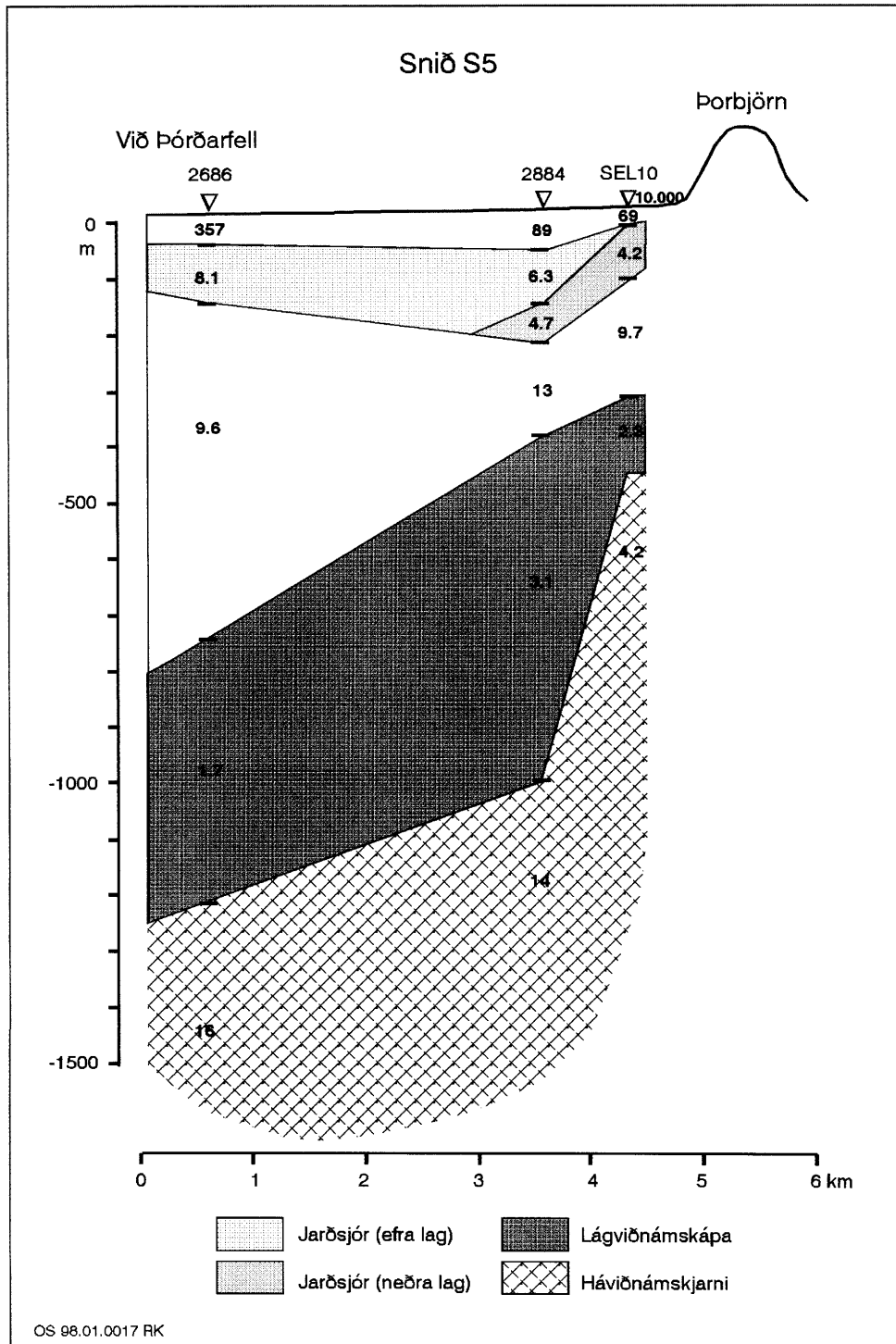
**Mynd 2.** Viðnámsnið 1.



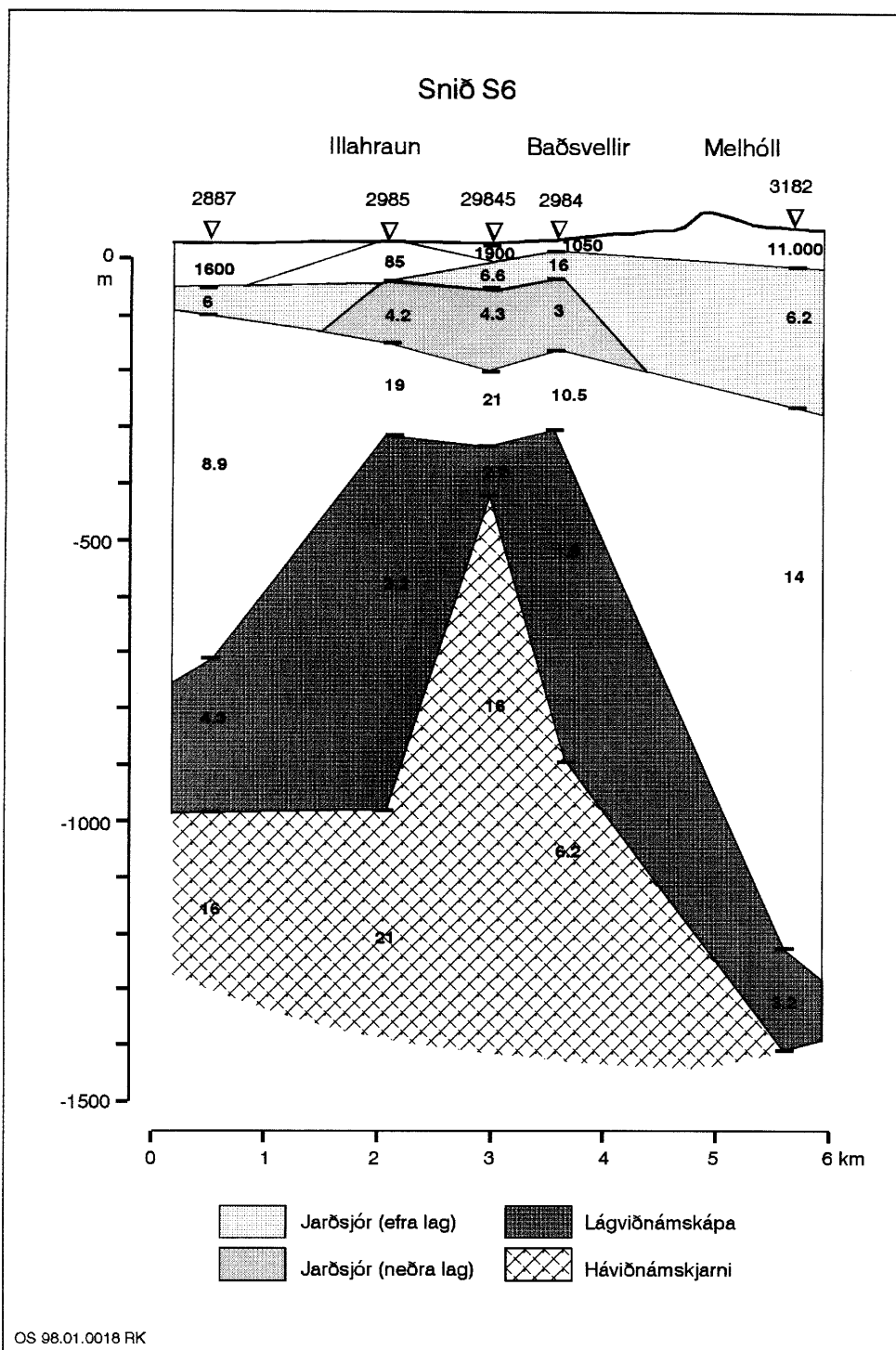


**Mynd 4.** Viðnámsnið 3.



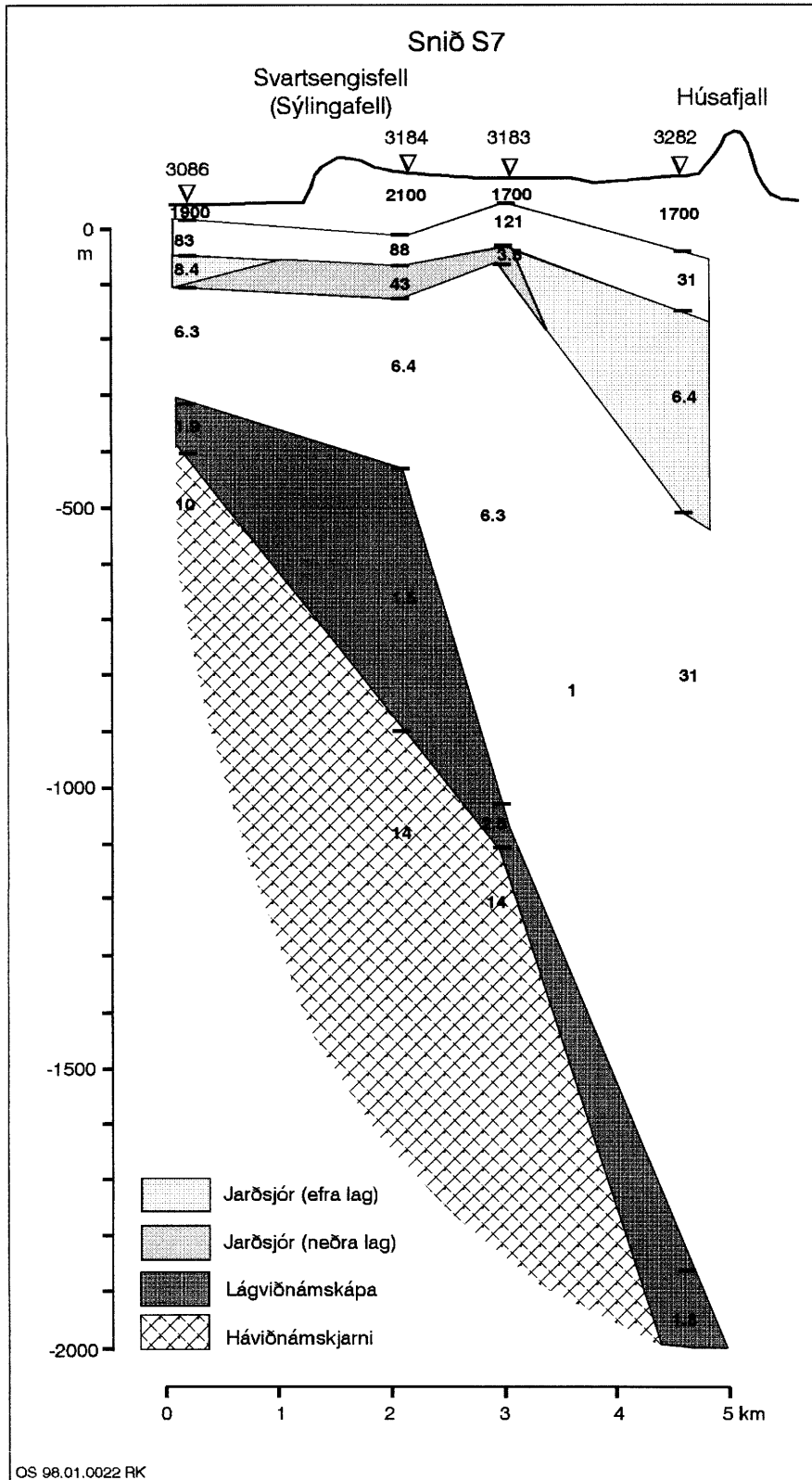


**Mynd 6.** Viðnámsnið 5.

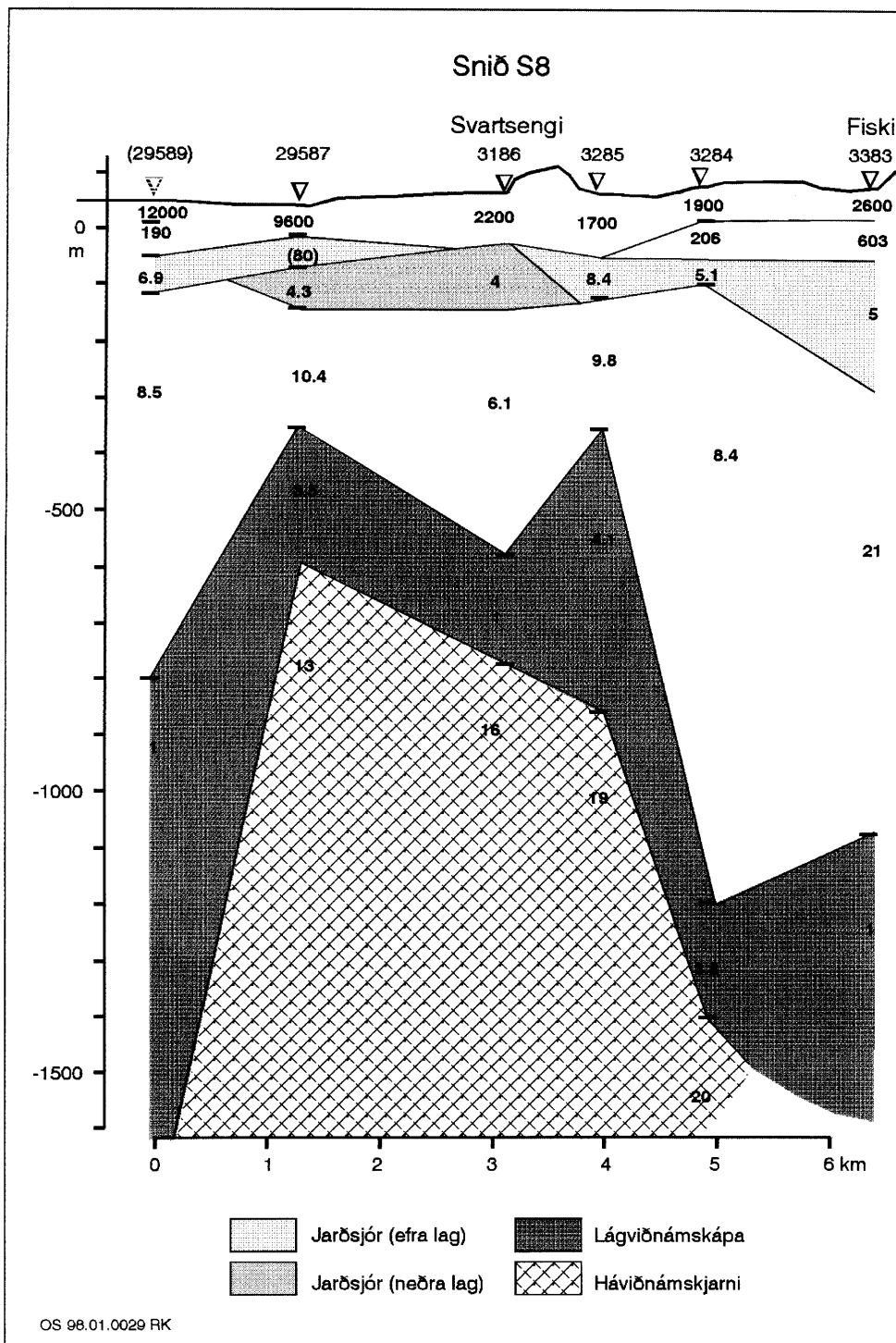


**Mynd 7. Viðnámsnið 6.**

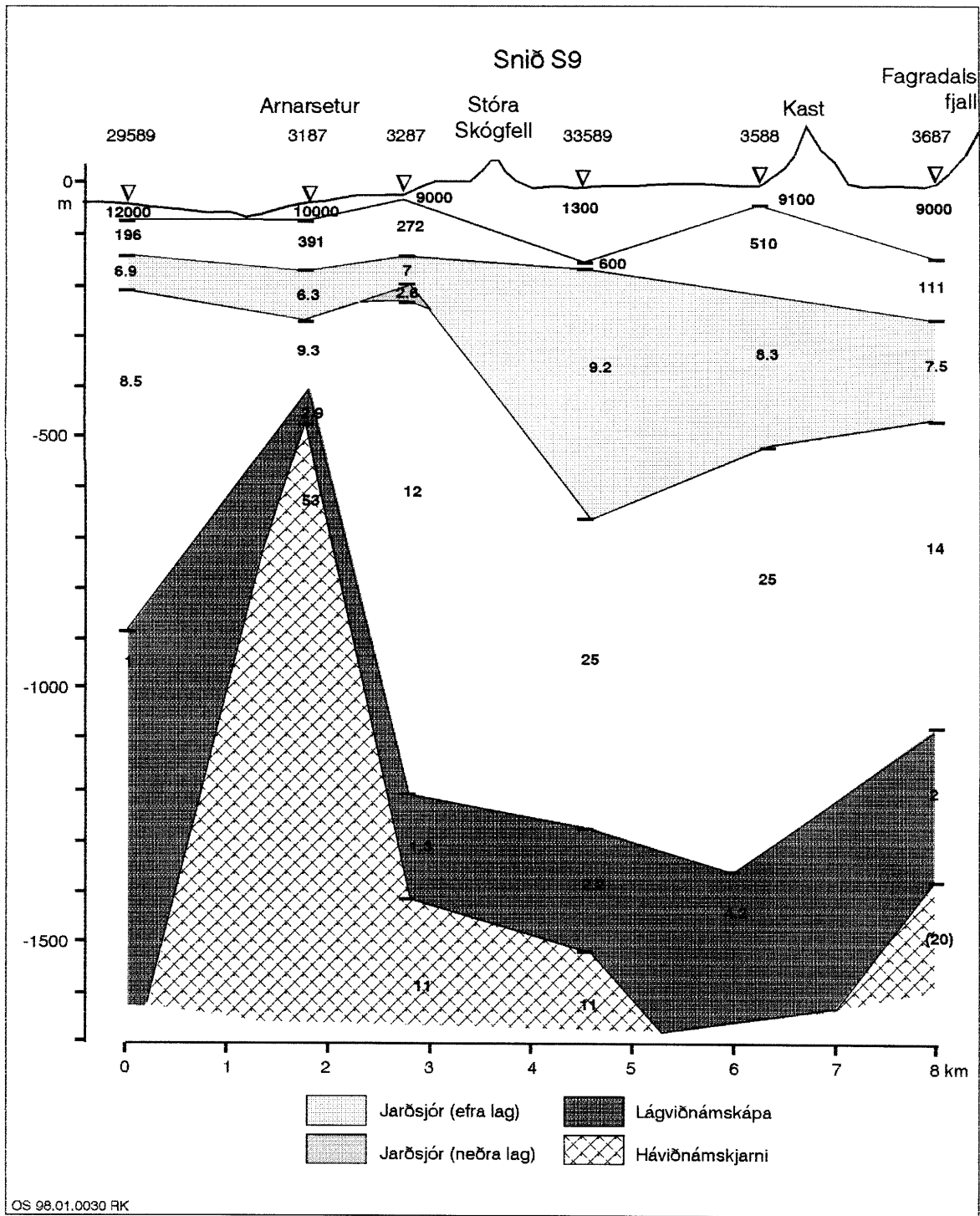




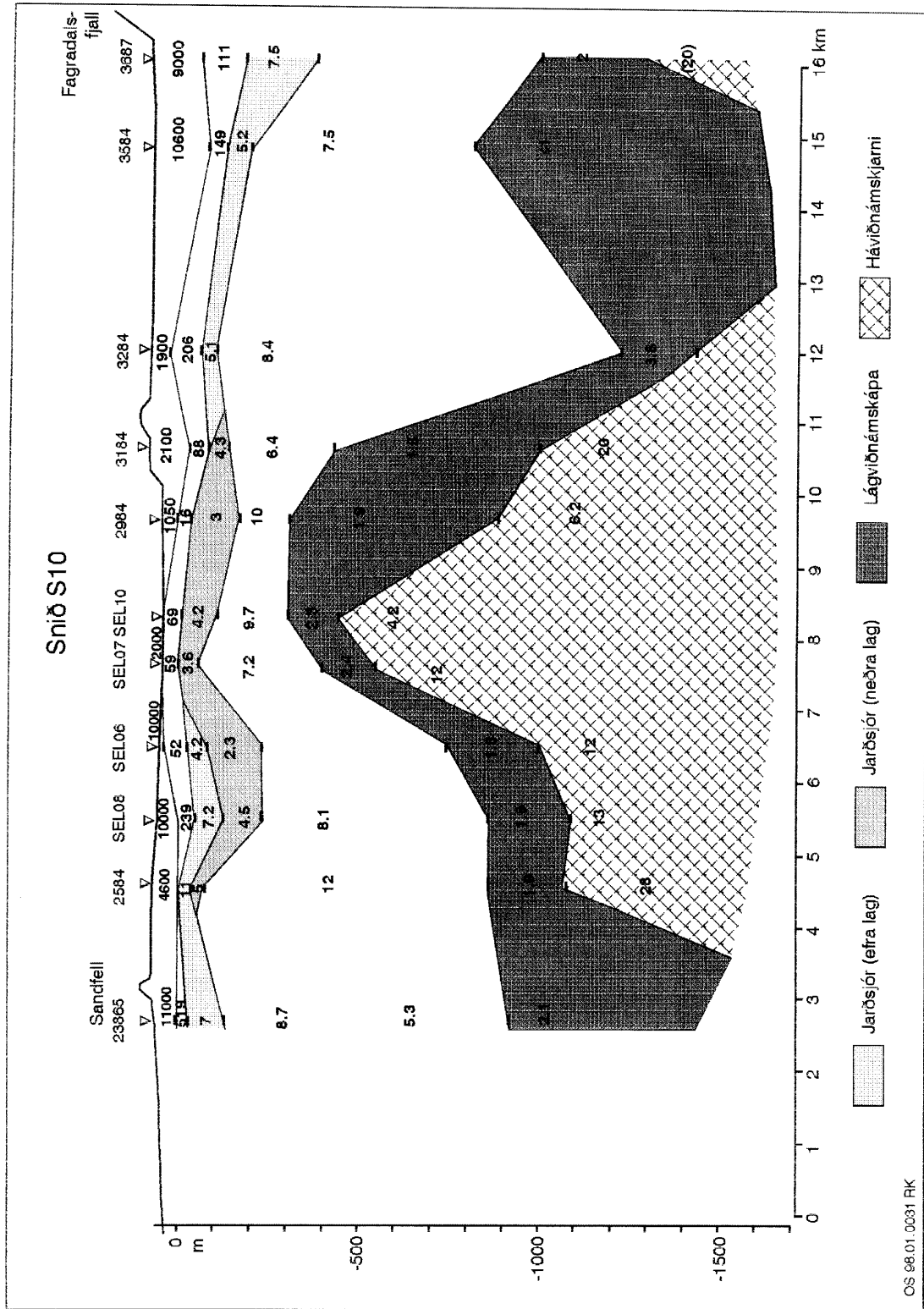
**Mynd 8.** Viðnámsnið 7.



**Mynd 9. Viðnámsnið 8.**



**Mynd 10.** Viðnámsnið 9.



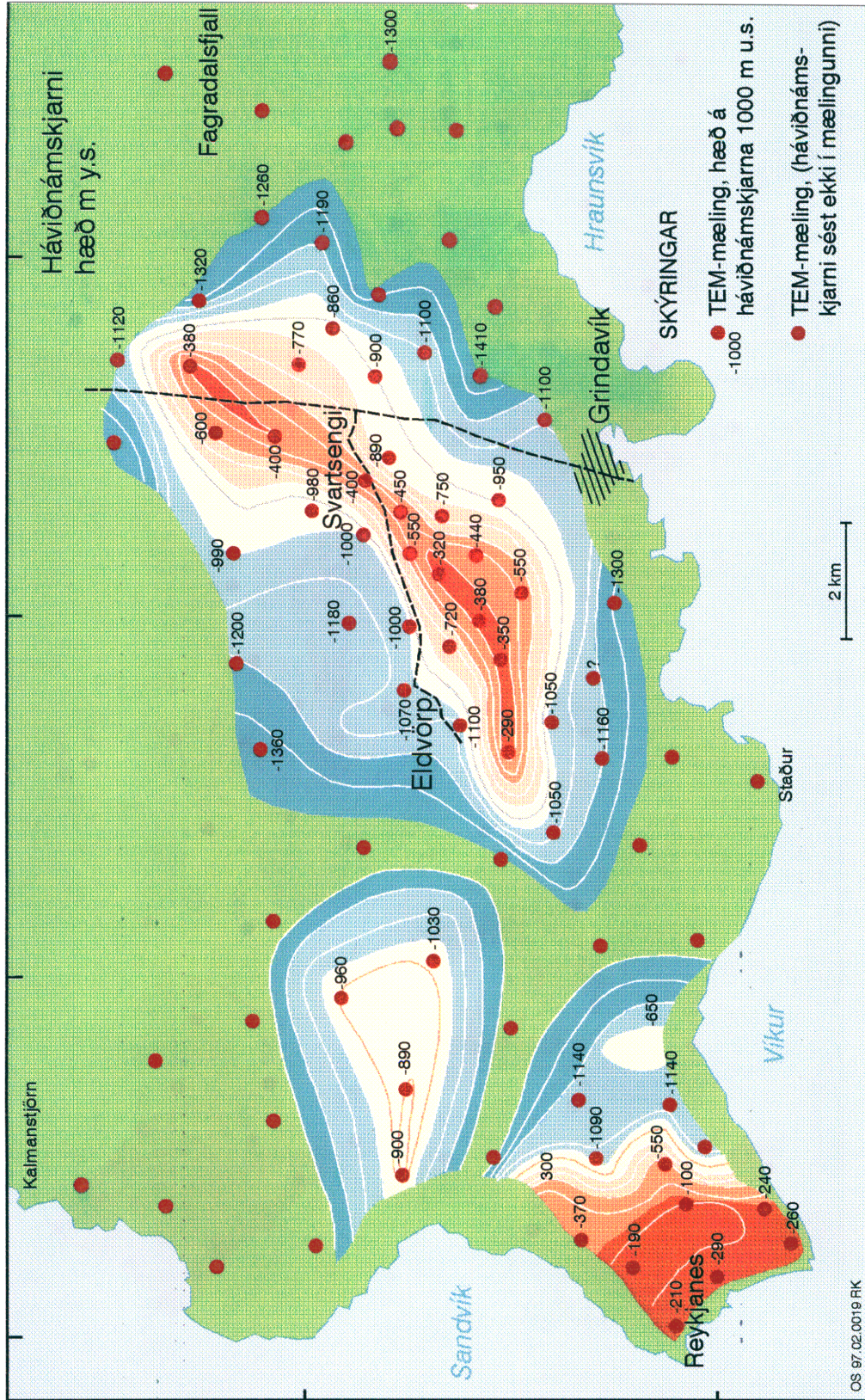
Mynd 11. Viðnámsnið 10.





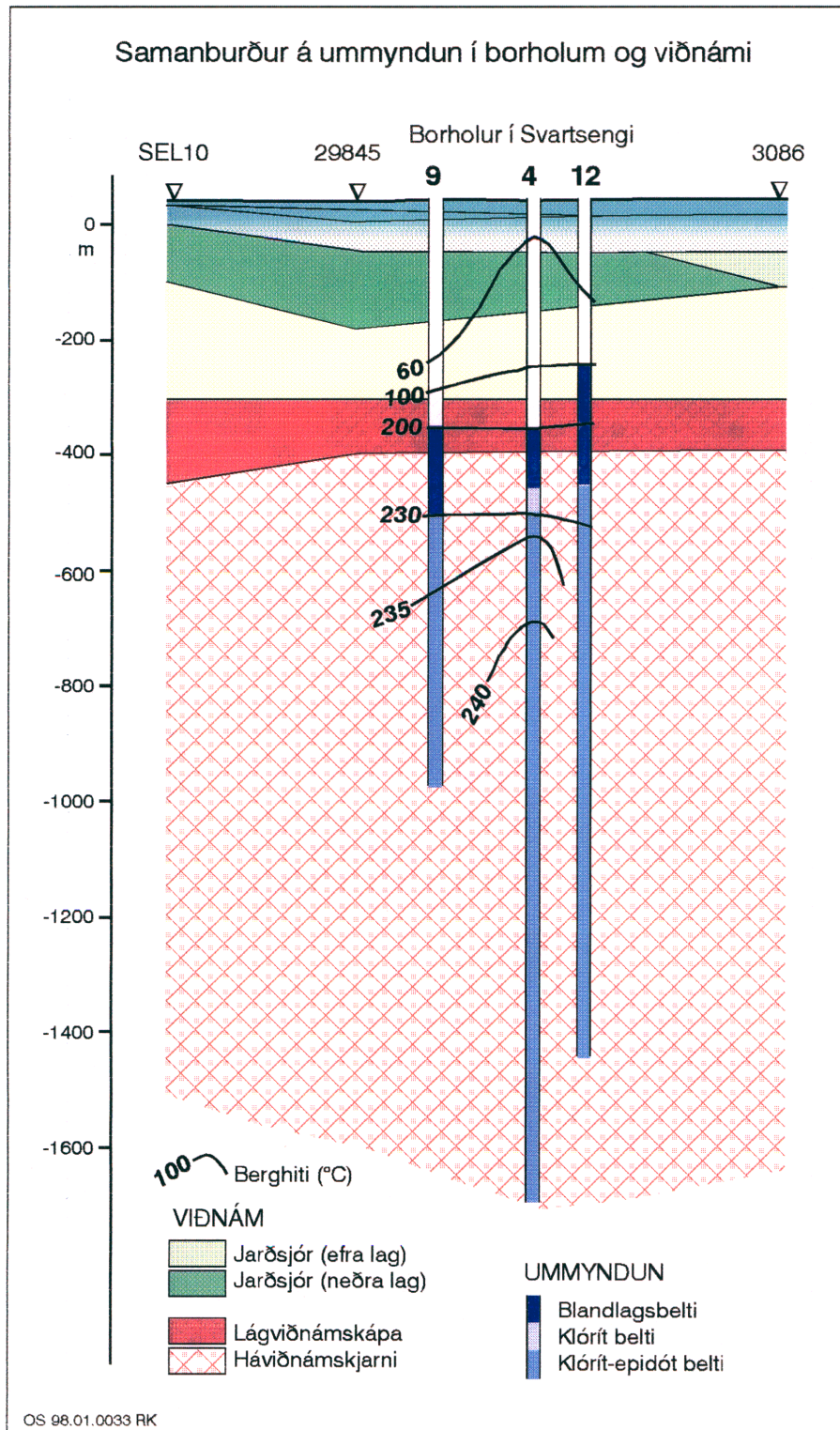






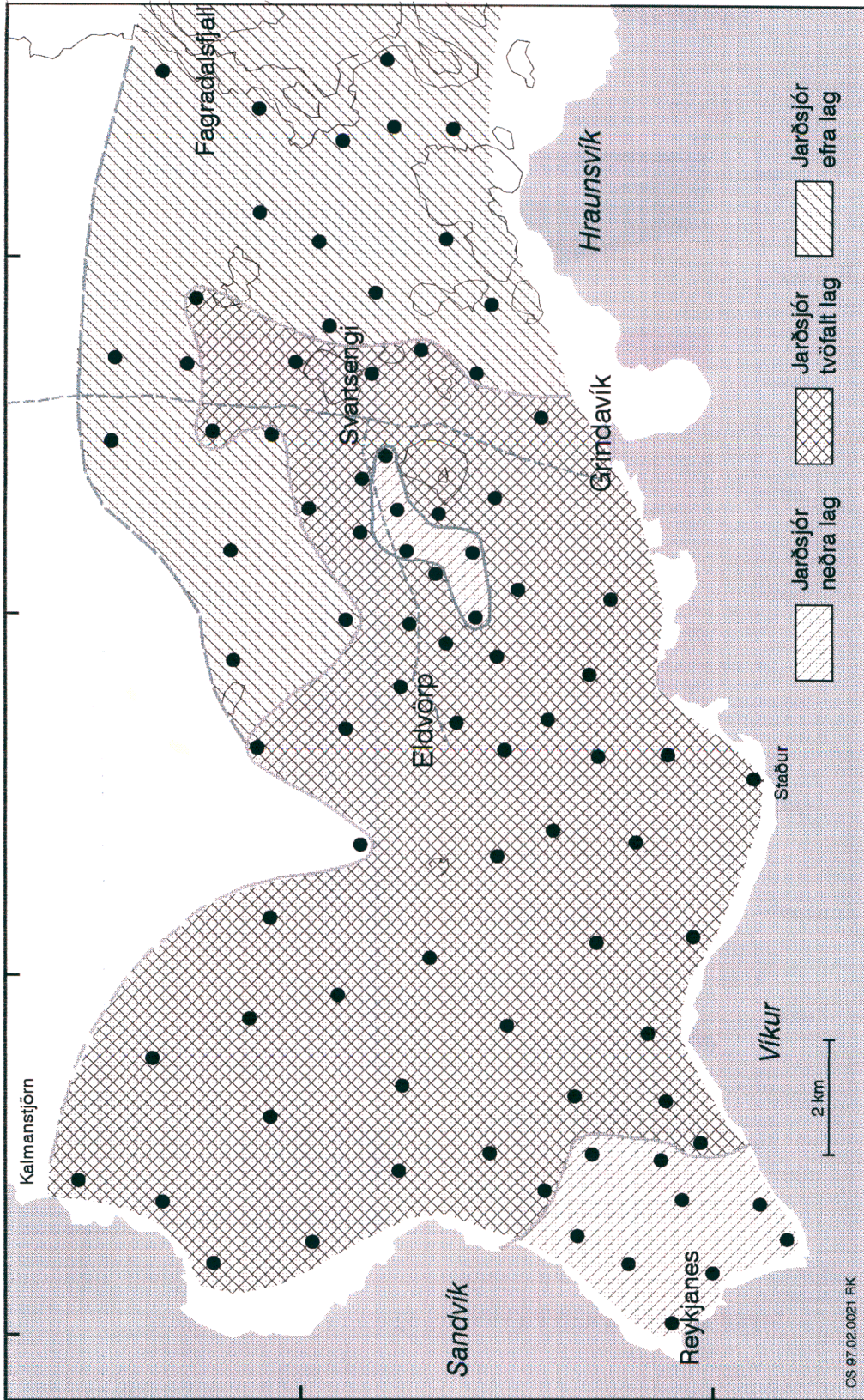
Mynd 14. Hæð á háviðnámskjarna (m u.s.).





**Mynd 15.** Samanburður á viðnámi og ummyndun í borholum..





Mynd 16. Jarðsjór á utanverðum Reykjanesskaga.

## 5. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

- TEM viðnámsmælingarnar sjá þá ummyndun sem berglögin hafa orðið fyrir vegna jarðhitans. Samfelt jarðhitakerfi virðist ná allt frá Eldvörpum í suðvestri um Svartsengi og að Arnarsetri í norðaustri. Snið 11 (mynd 12) liggur nánast eftir háhrygg jarðhitakerfisins frá SV til NA. Inn á sniðið eru settar holur 9 og 12 í Svartsengi og hola ST-01 við Stað í Grindavík og sýnt ummyndunarsnið úr þeim.
- Lágviðnámskápan markar blandlagsbeltið sem að jafnaði þýðir hita á bilinu 150-230° C, ef ummyndun er í jafnvægi við núverandi ummyndun. Í söltum jarðhitakerfum getur samband ummyndunar og hitastigs verið annað eða hliðrað miðað við ferskvatnskerfi, þannig finnast blandlagssteindir við hærri hitastig í söltum kerfum en ferskum (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979). Lágviðnámskápan afmarkar 24 ferkílómetra svæði á 600 metra dýpi, og nær hæst í Eldvörpum í 245 m u.s. Undir borsvæðinu í Svartsengi er hún í um 300 m u.s.

Háviðnámskjarninn markar klórít- og klórít-epídótummyndunina. Ef jafnvægi er á milli hita og ummyndunar er hitastig orðið yfir 230° C í háviðnámskjarnanum. Hann nær hæst upp í Eldvörpum í 290 m u.s. en er um 100 metrum neðar (400 m u.s.) undir borsvæðinu í Svartsengi. Segja má að háviðnámskjarninn marki háhitakerfið.

- Samfelt háhitakerfi í Svartsengi og Eldvörpum er um 30 ferkílómetrar að flatarmáli á 1000 metra dýpi (u.s.). Flatarmál núverandi borsvæðis í Svartsengi er um hálfur ferkílómetri.
- Lágviðnámskápan nær yfir allt rannsóknarsvæðið frá Reykjanesi að Fagradalsfjalli. Hún tengir háhitasvæðin og er á 800-1200 metra dýpi u.s. á milli Reykjanes og Eldvarpa og á 1200-1500 metra dýpi u.s. austan við Svartsengi. Hvort jafnvægi er á milli ummyndunar og hita milli háhitasvæðanna er ekki ljóst né heldur hvort háviðnámskjarni tengist á milli þeirra.

## 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.
- Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991: *Hiti og þrýstingur í jarðhitakerfinu í Svartsengi. Upphafsstand og breytingar vegna vinnslu*. Orkustofnun, OS-91016/JHD-04, 69 s.
- Hjalti Franzson, 1990: *Svartsengi Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess*. Orkustofnun, OS-90050/JHD-08, 41 s.
- 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 og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í KRÖFLU* Orkustofnun OS-96005/JHD-03, 96 s.
- Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius, 1983: *Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjanesskaga 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.
- 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, 41 s.
- Ragna Karlsdóttir, 1997: *TEM-Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjanesskaga.* Orkustofnun, OS-97001, 63 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: 1459-1468.



## ENGLISH SUMMARY

This report holds the results of a resistivity survey in Svartsengi high-temperature field and its vicinity in Reykjanes peninsula. It can be considered as a continuation of a resistivity survey in 1996. (Ragna Karlsdóttir, 1997).

The survey was carried out in 1997 using central loop TEM(Transient Electromagnetic)-soundings in an area extending from the shoreline in south and west to Kalmannstjörn in north and Fagradalsfjall in east.

The aim of the survey was to:

- Delineate the high temperature fields at Svartsengi and Eldvörp and verify that they are in fact connected and can be considered as one and the same field.

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 geothermal 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.

Results show an extended high-temperature field from Eldvörp to Arnarsetur, north of Svartsengi covering an area of 30 square kilometers at 1000 m depth below sea level. The resistivity structure reflects thermal alteration indicating temperatures exceeding 240° C is at 300 meters depth (b.s.l.) in Eldvörp and at 400 meters depth (b.s.l.) in Svartsengi.



## VIÐAUKI 1: Lýsing á TEM-mæliaðferðinni og túlkun mælinga

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 spennusviðs 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

*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 prufustaður því að þar fékkst samanburður við bestu fánlegar niðurstöður með eldri aðferðum. Samanburðurinn leiddi í ljós að TEM-mælingar væru mjög fjósilegur 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 einvíð túlkun TEM-mælinga getur gefið allt að því jafn mikla upplausn og tvívíð túlkun jafnstraumsmælinga. Ástæða þessa er sú að TEM-mælingar eru í miklu meira mæli háðar viðnámskipan beint undir mælistað en Schlumbergermælingar. Auk þess eru svokölluð jafngildisvandamál mun minni í TEM-mælingum en Schlumbergermælingum (Knútur Árnason, óbirt gögn). Jafngildisvandamál felast í því að fyrir lágviðnámslag er oft ekki hægt að ákvarða með vissu viðnámsgildi og þykkt lagsins heldur einungis hlutfall þykktar og viðnáms, þ. e. heildarleidnina. Ennfremur eru TEM-mælingar mun minna næmar fyrir staðbundnum viðnámsóreglum á mælistað (Sernberg o.fl., 1988) en slíkar óreglur geta haft veruleg áhrif á jafnstraumsmælingar (Knútur Árnason, 1984). Af þessum sökum gefa viðnámsnið byggð á einvíðri túlkun TEM-mælinga mun áreiðanlegri mynd en samsvarandi snið byggð á Schlumbergermælingum. Tilraunamælingarnar á Nesjavöllum sumarið 1986 sýndu að einvíð túlkun TEM-mælinga gefur lítið lakari upplausn og tvívíð túlkun á jafnstraumsmælingum á háhitasvæðum (Knútur Árnason, 1987 og 1990).*

*TEM-mælingar hafa þann 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*

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 mælinga**

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,

**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 viðnámslíkөн 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 en 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 flóknari og er enn á rannsóknarstigi. "

**VIÐAUKI 2. Einstakar mælingar og túlkun þeirra**



