



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Háhitasvæðið í Köldukvísjarbotnum

TEM-mælingar 1998

Ragna Karlsdóttir

Unnið fyrir Landsvirkjun

2000

OS-2000/ 060



Skýrsla nr: OS-2000/060	Dags: Október 2000	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Háhitasvæðið í Köldukvíslarbotnum TEM-mælingar 1998	Upplag: 30	
	Fjöldi síðna: 60	
Höfundar: Ragna Karlsdóttir	Verkefnisstjóri: Ragna Karlsdóttir	
Gerð skýrslu / Verkstig: Mælingaskýrsla, frumrannsókn	Verknúmer: 8-630050	
Unnið fyrir: Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Gerð er grein fyrir könnun á stærð jarðhitasvæðisins í Köldukvíslarbotnum með viðnámsmælingum í apríl 1998. Verkið var liður í frumrannsókn á háhitasvæðinu sem gerð var áður en vatni var hleypt á lón Hágöngumiðlunar. Hluti jarðhitasvæðisins er nú undir vatni. Auk viðnámsmælinga var jarðhiti kortlagður og tekin gassýni til ákvörðunar á hitastigi í jarðhitakerfinu. Viðnámsmælingarnar endurspeglar þá háhitaummyndun sem jarðlögin hafa orðið fyrir vegna jarðhitans og geta greint umfang háhitakerfisins niður á rúmlega kílómeters dýpi. Niðurstöður mælinganna sýna að í Köldukvíslarbotnum er víðáttumikið háhitakerfi, sambærilegt að stærð við Kröflukerfið. Gera má ráð fyrir 240°C hita á 200-250 m dýpi í hátoppi jarðhitakerfisins undir vestanverðu Sveðjuhrauni. Verkið er unnið fyrir Landsvirkjun af Rannsóknasviði Orkustofnunar.		
Lykilorð: Háhitasvæði, viðnámsmælingar, eðlisviðnám, viðnámsnið, viðnámskort, Köldukvíslarbotnar, Hágöngumiðlun	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: <i>Ragna Karlsdóttir</i>	
	Yfirfarið af: PI	



ORKUSTOFNUN
Rannsóknasvið

Verknr. 8-630050

Ragna Karlsdóttir

Háhitasvæðið í Köldukvíslarbotnum

TEM-mælingar 1998

Unnið fyrir Landsvirkjun

OS-2000/060

Október 2000

ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ

Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. - Sími 569 6000 - Fax 568 8896

Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0998

Netfang: os@os.is - Veffang: <http://www.os.is>

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	3
2. TEM-mælingar	3
3. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA	4
4. FRAMKVÆMD MÆLINGA	5
5. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA	9
5.1 Viðnámssnið	9
5.2 Jafnviðnámskort	12
6. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGANNA	35
7. LOKAORÐ	36
8. HEIMILDASKRÁ	36
VIÐAUKI 1: Túlkun viðnámsmælinga og viðnámsferlar	39

Tafla 1. Hnit og hæð TEM-mælinga	6
----------------------------------	---

MYNDIR

Mynd 1. Jarðhitakort	7
Mynd 2. Lega viðnámssniða	11
Myndir 3-15. Viðnámssnið NA1-NA6 og SA1-SA7	13-25
Myndir 16-24. Viðnámskort 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100 og 0 m y.s.	26-34

1. INNGANGUR

Í tengslum við gerð miðlunar í Köldukvíslarbotnum var ákveðið að kanna stærð háhitasvæðisins þar með TEM-viðnámsmælingum áður en byrjað yrði fylla í lónið. Mælingar í þessum tilgangi voru gerðar í apríl 1998 en vatni var hleypt í lón Hágöngumiðlunar sumarið eftir og er mælisvæðið nú að mestu komið undir vatn.

Háhitasvæði einkennast af gufu- og/eða leirhverum á yfirborði; þau eru innan gosbeltanna, oftast í tengslum við megineldstöðvar; hitagjafi þeirra eru kólnandi kvikuinnskot og hitastig er hærra en 150-200°C á eins kílómetra dýpi. Við hitann ummyndast bergið og er ummyndunin háð hitanum á hverjum stað. Viðnámsmælingarnar nema mismunandi leiðni í ummyndunarbeltum háhitakerfanna og geta því greint háhitakerfið frá fersku bergi í jarðskorpunni og sagt til um umfang þess niður á 1200-1400 metra dýpi.

Sumarið 1995 var gert jarðhitakort af jarðhitasvæðinu og birt í skýrslu Orkustofnunar (Guðmundur Ómar Friðleifsson og Skúli Víkingsson, 1997). Yfirlitskort úr þeirri skýrslu sést á mynd 1 og sýnir helstu drætti í jarðfræði svæðisins og ummerki um jarðhita á yfirborði. Nákvæmari kort af jarðhitanum eru í fyrrnefndri skýrslu.

2. TEM-mælingar

Áður en vikið verður að mælingunum í Köldukvíslarbotnum er TEM-mæliaðferðin skýrð í stuttu máli. TEM-mælingar hafa rutt sér til rúms sem viðnámsmælingaaðferð til jarðhitaleitar á síðustu árum. Þær eru ódýrari í framkvæmd og gagnasöfnun fljótlegri en með þeirri mælingaaðferð sem áður var notuð.

TEM-mælingar (transient electromagnetic) með straumlykkju eru mælingar þar sem staðbundið rafsegulsvið er framkallað með þar til gerðum tækjabúnaði. 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 voru fyrst reyndar hér á landi sumarið 1986. Nesjavallasvæðið varð fyrir valinu sem reynslustaður því að þar fékkst samanburður við bestu fánlegar niðurstöður með eldri aðferðum. Samanburðurinn leiddi í ljós að TEM-mælingar væru mjög fýsilegur kostur (Knútur Árnason o.fl. 1987).

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.

3. SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS OG JARÐHITA

Ástæða þess að viðnámsmælingum er beitt við jarðhitarannsóknir er sú að berg, mettað heitu vatni, leiðir betur rafstraum en þurrkalt berg. Eðlisviðnám í vatnsmettuðu 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 þessarra 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. $1\Omega\text{m}$ við stofuhita. Eðlisviðnám vatnsmettaðs bergs er hins vegar háð poruhluta og hitastigi. Í efsta kílómetra skorpunnar utan gosbeltanna eru leirsteindir og zeolítar 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 $50\text{-}100^\circ\text{C}$ og upp í 200°C eru smektít og zeolítar ráðandi ummyndunarsteindir. Frá 200°C upp í 230°C eru zeolítar hornfir 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, $10000\text{-}20000\Omega\text{m}$ í yfirborði (ógróið hraun), viðnámslækkun niður í $500\text{-}1000\Omega\text{m}$ við vatnsborð, lágviðnámskápa með $< 10\Omega\text{m}$ utan á háviðnámskjarna með viðnámi allt að því stærðargráðu hærra. Samanburður á eðlisviðnámi og berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu leiddi í ljós að lágviðnámskápan svarar til smektít-zeolítabeltisins við hitastig $50\text{-}200^\circ\text{C}$. Háviðnámskjarninn svarar til klórít- epidótbelteisins við hitastig $>240^\circ\text{C}$. Orsök mismunandi leiðni í ummyndunarbeltinu 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 samsvörun (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

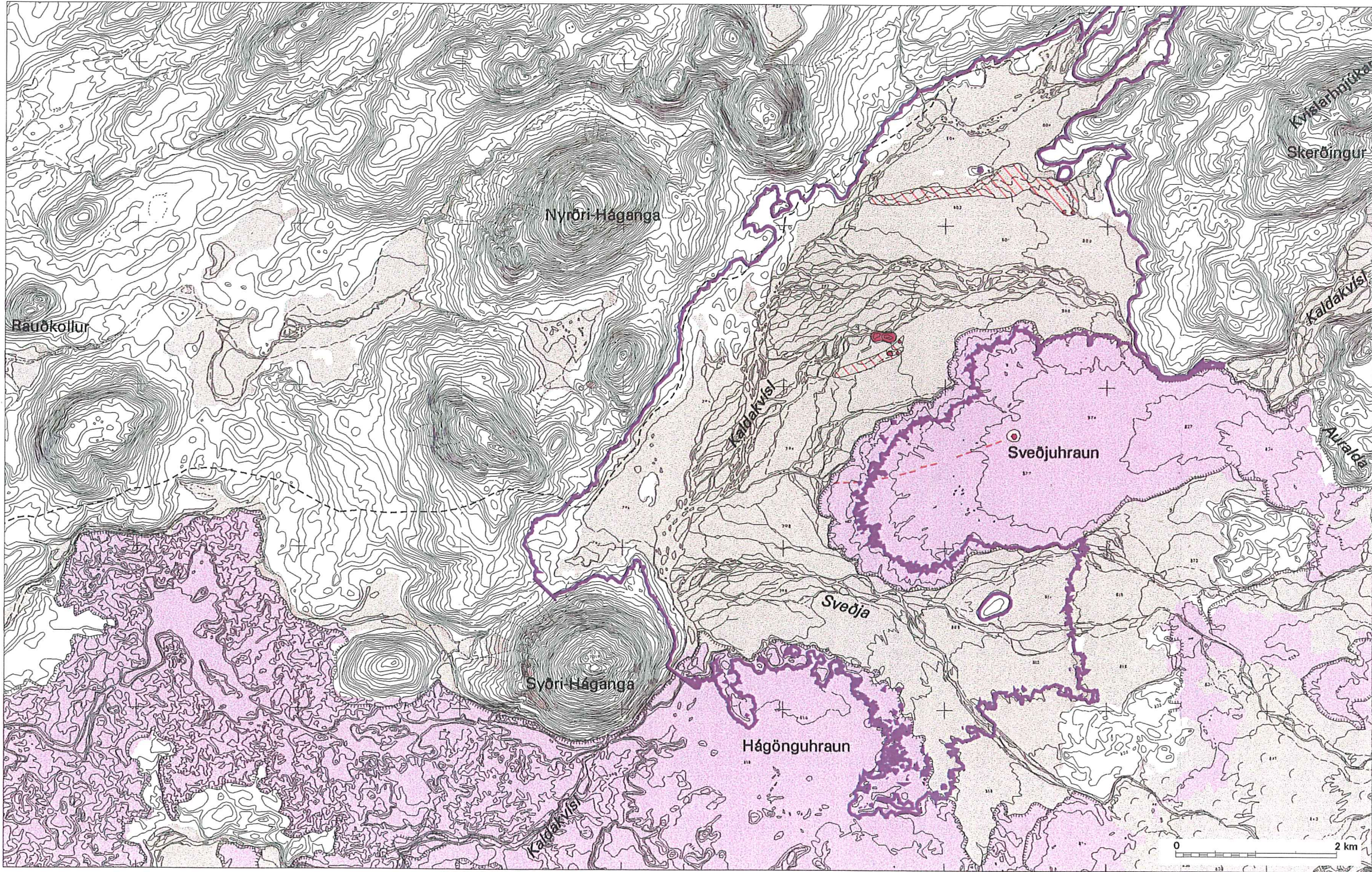
um Schlumbergermælingar að ræða sem mæliaðferð, en eins og vikið er að áður er dýptarskynjun þeirra lítil í söltu umhverfi. TEM-mælingar á Reykjanesi 1996 virðast geta "séð" lagskiptingu allt niður á 1000-1200 metra dýpi í þessu umhverfi. Þær greina lágviðnámskápu og háviðnámskjarna á jarðhitasvæðunum á utanverðum Reykjaneskaga 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 ummyndunarbeltum 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 (Ragna Karlsdóttir, 1997).

4. FRAMKVÆMD MÆLINGA

Mælt var í aprílmánuði 1998. Mælingarnar urðu alls 37 á 10 mælidögum svo afköstin voru 3,7 mælingar á dag að jafnaði, sem telst mjög gott. Hins vegar gerði veðurbliða það að verkum að heimförin reyndist erfið því talsvert var farið að hlána og færi því erfitt. Gögnin eru mjög góð enda fátt sem getur truflað. Hnit mælistöðvanna, svo og hæð þeirra yfir sjó er fært í töflu 1.

Tafla-1. Hnit og hæð TEM-mælinga í Köldukvíslarbotnum 1998.

Mæling	Lengd			Breidd
308613	0630798	E	7161301	N
310638	0631027	E	7163804	N
326634	0632581	E	7163371	N
335615	0633492	E	7161541	N
335670	0633547	E	7166977	N
336584	0633582	E	7158437	N
337646	0633713	E	7164609	N
348659	0634806	E	7165888	N
349572	0634937	E	7157152	N
349629	0634903	E	7162857	N
351599	0635147	E	7159860	N
356634	0635610	E	7163427	N
362642	0636166	E	7164156	N
362696	0636203	E	7169587	N
363584	0636344	E	7158409	N
363671	0636257	E	7167068	N
364614	0636438	E	7161363	N
368648	0636764	E	7164838	N
375657	0637521	E	7165727	N
375684	0637499	E	7168383	N
376641	0637615	E	7164073	N
377617	0637698	E	7161728	N
378599	0637778	E	7159940	N
378628	0637841	E	7162765	N
384663	0638355	E	7166271	N
389628	0638943	E	7162830	N
389671	0638850	E	7167109	N
389699	0638863	E	7169884	N
392647	0639178	E	7164693	N
393614	0639275	E	7161430	N
406656	0640584	E	7165538	N
407626	0640673	E	7162515	N
408600	0640808	E	7159956	N
410690	0641046	E	7168973	N
414672	0641364	E	7167235	N
421636	0642089	E	7163597	N
423612	0642322	E	7161240	N



SKÝRINGAR

JARÐHITI

- Þyrping gufu- og leirhvera
- Kaldar hveraskellur
- Volgt svæði 10°-30°C
- Volgt afrennsli undir hrauni

JARÐLÖG

- Líparft *
- Nútfímhraun *
- Árset *
- Nútfímhraun undir seti *

ANNAD

- Útbreiðsla lóns m. lónhæð 815 m.s.
- Slóð

* Heimild: Elsa G. Vilmundardóttir og Ingibjörg Kaldal 1995:
Hágöngumiðlun. Jarðfræðiathuganir sumarið 1995.
OS-95059/VOD-09 B

HÁGÖNGUMIÐLUN - Jarðhitakort
Guðmundur Ó. Friðleifsson - Orkustofnun JHD-JFR

5. TÚLKUN TEM-MÆLINGANNA

Niðurstöður viðnámsmælinganna eru settar fram sem viðnámsenni og jafnvíðnámskort. Um túlkun viðnámsmælinga er vísað í viðauka.

Lega sniðanna er sýnd á mynd 2. Áður en hverju sniði er lýst fyrir sig er dregið á niðurstöður í grófum dráttum.

- Yfirborðslag, (dökkblátt), með háu, oft tvískiptu viðnámi kemur fram í öllum mælingum. Lag þetta er allt frá því að vera nokkurra tuga metra þykkt yfir sjálfu háhitasvæðinu upp í 200-500 metra þykkt utan þess. Viðnámið er oftast 200-800 Ωm en þó sjást hærri gildi eða allt upp í 1500 Ωm . Efst í sumum mælingunum er þunnt lag með mjög háu viðnámi eða > 2000 Ωm . Yfirborðslagið endurspeglar þurrt ferskt berg í yfirborði.
- Fyrir neðan yfirborðslagið tekur við lag, (ljósblátt), með viðnámi sem oftast er á bilinu 70-130 Ωm . Veruleg lækkunin í viðnámi verður við við grunnvatnsborð þar sem vatnsmettað berg leiðir betur rafstraum en þurrt berg, eins og sagt er hér að framan.
- Viðnámið lækkar síðan með dýpi niður í 25-35 Ωm á 500-1500 metra dýpi utan jarðhitasvæðisins. Þetta lag er lítið grænt á sniðunum.

Jarðhitasvæðið sjálft sker sig úr sem háviðnámskjarni, sem myndar líkt og topp upp undir yfirborð og þakinn er lágviðnámskápu og oft lágviðnámslagi, sem liggur utan á lágviðnámskápunni.

- Lágviðnámskápan þekur jarðhitakerfið. Hún endurspeglar hitaummyndun bergsins við hitastig upp undir 240° C. Viðnámið í lágviðnámskápunni er á bilinu 2-7 Ωm . Hún er að jafnaði þynnst eða 100-200 metra þykk þar sem hitakerfið er næst yfirborði, en þykkar þar sem dýpkar á hana. Lágviðnámskápan er lituð rauð á sniðunum.
- Háviðnámskjarninn endurspeglar háhitaummyndun jarðhitakerfisins við hitastig > 240° C.
- Lágviðnámslag með viðnám 10-20 Ωm liggur oft utan á lágviðnámskápunni og er þetta lága viðnám vegna áhrifa jarðhitans. Þetta lag er merkt gult á sniðunum

5.1 Viðnámsenni

Hér á eftir verður dregið á helstu atriði í hverju viðnámsenni fyrir sig. Snið merkt NA liggja SV-NA og eru öll samsíða og eru um 2 km á milli þeirra. Snið merkt SA liggja NV-SA og eru öll samsíða en þvert á NA sniðin og er fjarlægð á milli þeirra einnig um 2 km (mynd 2).

Snið NA1 (mynd 3) liggur norð-vestast á mælisvæðinu. Það sýnir viðnámskipan, sem ótrufluð er af jarðhita niður á 700-800 metra dýpi, en þar sér í lágviðnámslagið.

Snið NA2 (mynd 4) er líkt og NA1 en þar er lágviðnámslagið á 400-500 metra dýpi og lágviðnámskápan sést á 800 metra dýpi í einni mælingu (363671).

Snið NA3 (mynd 5) sker háhitakerfið. Lágviðnámskápan er næst yfirborði í mælingu 362642 á um 150 metra dýpi (670 m.y.s) og toppur á háviðnámskjarnanum 200 metrum neðar (470 m y.s.). Athyglisvert er að tveir toppar eru á háviðnámskjarnanum, því annar lægri er norð-austar en sá hæsti og er í um 350 m y.s.

Snið NA4 (mynd 6) sker háhitakerfið. Í mælingu 378628 er hæsti toppur lágviðnámskápannar 775 m y.s, en á rúmlega 40 metra dýpi miðað við yfirborð. Háviðnámskjarninn er einnig hæstur hér eða í 600 m y.s. Samkvæmt mælingunum er mæling 378628 því yfir hátoppi jarðhitakerfisins.

Snið NA5 (mynd 7) sker suð-austurjaðar jarðhitakerfisins. Hér er lágviðnámskápan komin niður á 400-600 metra dýpi (hæst í sniðinu í 250 m y.s.) og sér aðeins í háviðnámskjarnann í einni mælingu (393614).

Snið NA6 (mynd 8) er suð-austast á mælisvæðinu. Hér dýpkar enn á lágviðnámskápuna og er hún á um 800 metra dýpi. Háviðnámskjarninn sést ekki en mælingarnar bera vott um viðnámsþækkun neðar enda þótt það sé ekki sýnt hér á sniðinu.

Snið SA1 (mynd 9) liggur suð-vestast á mælisvæðinu, rétt suð-vestan við Syðri Hágöngu. Fyrir ofan 600 metra dýpi er viðnámskipan ótrufluð af jarðhita. Neðan við er 10-20 Ωm lágviðnámslagið og það grillir í lágviðnámskápuna á 1000 metra dýpi.

Snið SA2 (mynd 10) liggur norð-austan við Syðri Hágöngu. Hér er lágviðnámslagið allþykkt og athygli vekur hversu lágt viðnámið er í því syðst í sniðinu, eða 10-12 Ωm.

Snið SA3 (mynd 11) sker utan í sjálft jarðhitakerfið. Lágviðnámskápan er á 600 metra dýpi (rúmlega 200 m y.s.) og háviðnámskjarninn 350 metrum neðar.

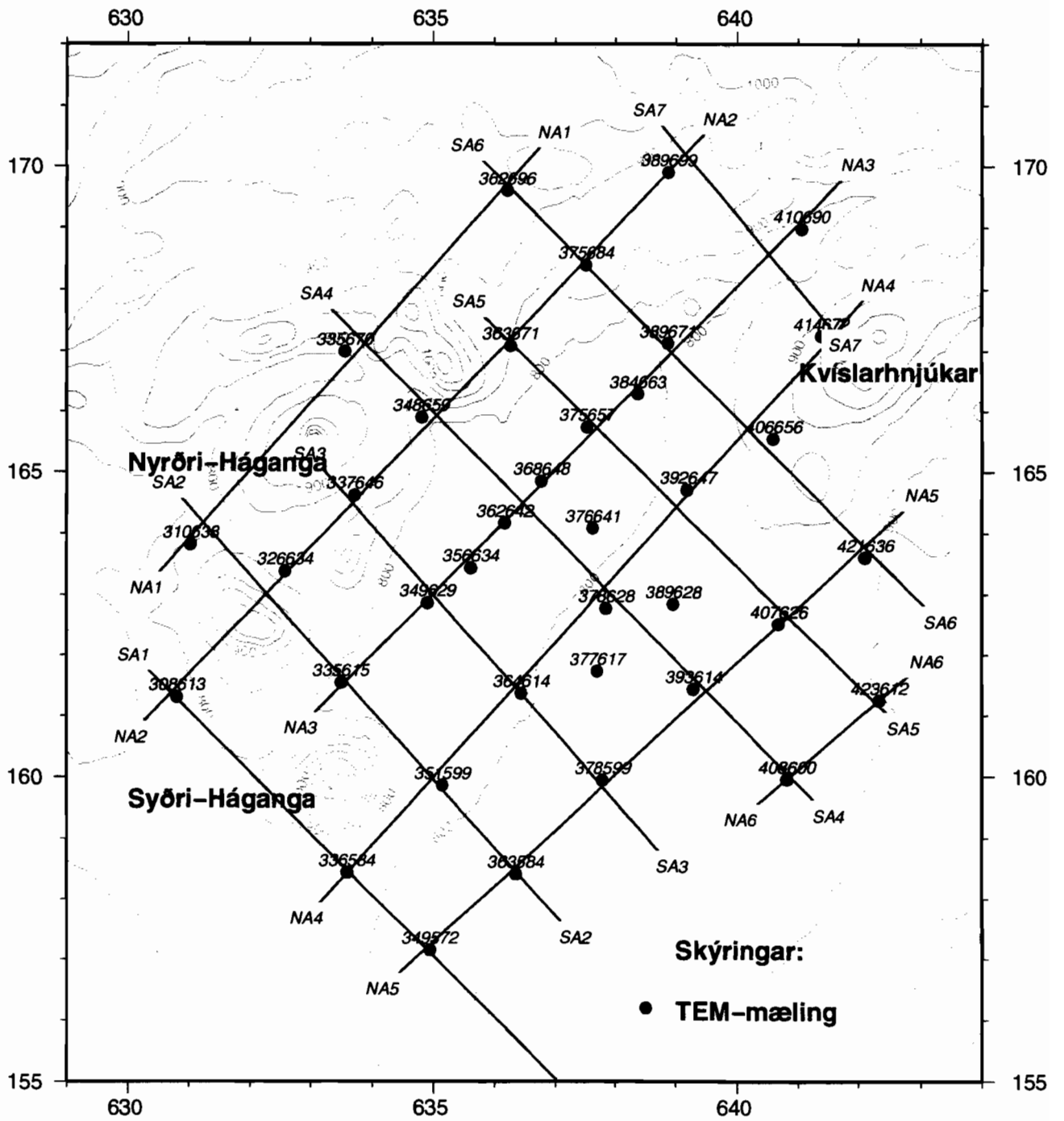
Snið SA4 (mynd 12) sker hæsta hluta jarðhitakerfisins, líkt og snið NA4. Lágviðnámskápan og háviðnámskjarninn hvelfast upp undir yfirborð, en það dýpkar mjög hratt á jarðhitakerfið bæði til norð-vesturs og suð-austurs.

Snið SA5 (mynd 13) sker jarðhitakerfið 400 metrum dýpra en snið SA4. Hér er lágviðnámskápan all miklu þykkari en yfir efsta hluta jarðhitakerfisins.

Snið SA6 (mynd 14) sker lægri topp háviðnámskjarnans, sem minnst er á í umfjöllun um snið NA3.

Snið SA7 (mynd 15) er norð-austasta sniðið, suð-vestan í Skerðingi. Það rétt nartar í háhitakerfið á 800-900 metra dýpi í mælingu 414672.

Eins og sést á sniðunum er háhitakerfið mjög skýrt afmarkað niður á 1000 metra dýpi. En til að sýna betur lögun þess eru niðurstöður mælinganna einnig sýndar á jafnvíðnámskortum.



Mynd 2. Köldukvíslarbotnar. Lega viðnámsniða.

5.2 Jafnviðnámskort

Til frekar glöggvunar á niðurstöðum mælinganna eru sýnd hér jafnviðnámskort, sem hvert sýnir viðnám á ákveðnu dýpi.

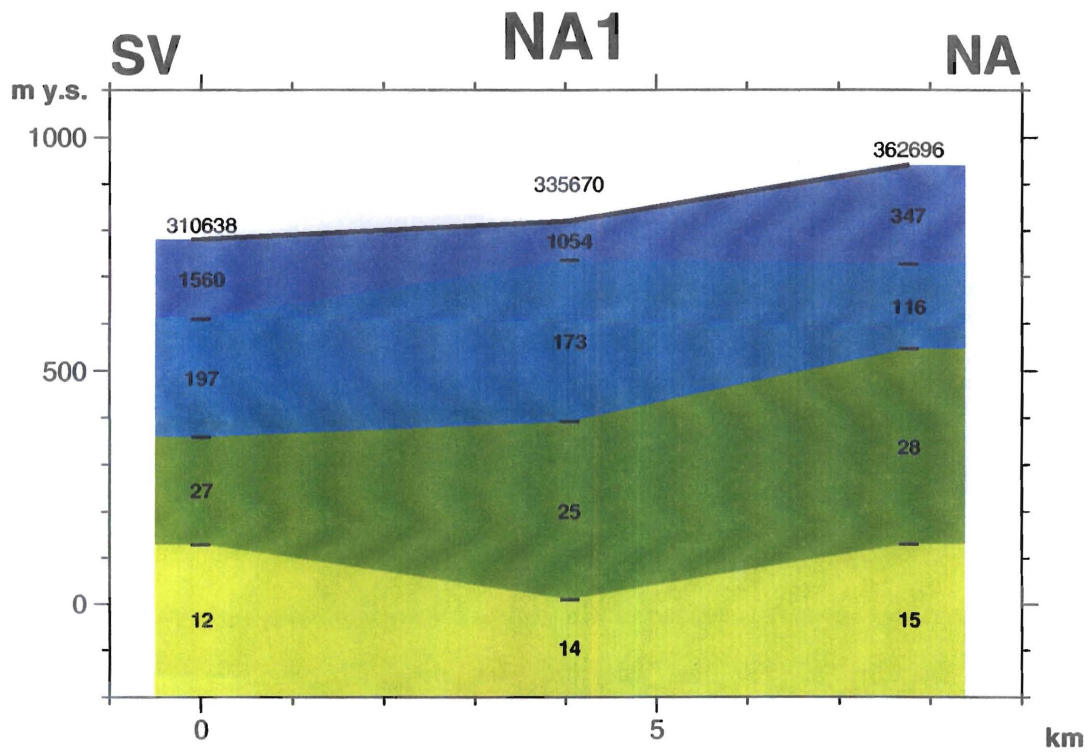
Viðnám 800 metra yfir sjávarmáli (mynd 16) sýnir hátt viðnám (blátt) í yfirborði en hæð landsins á þessum slóðum er 800-900 m.y.s. Um miðbik mælisvæðisins er aflangt (grænt) svæði með NA-SV stefnu með lægra viðnámi. Lægra viðnám í yfirborði þarna sýna áhrif jarðhitavæðisins sem liggur undir.

Viðnám 700 metra yfir sjávarmáli (mynd 17) sýnir merki þess að lágviðnámstopparnir séu tveir. Hér er komið ofan í lágviðnámskápu (rauður litur) þess topps sem sunnar og vestar liggur.

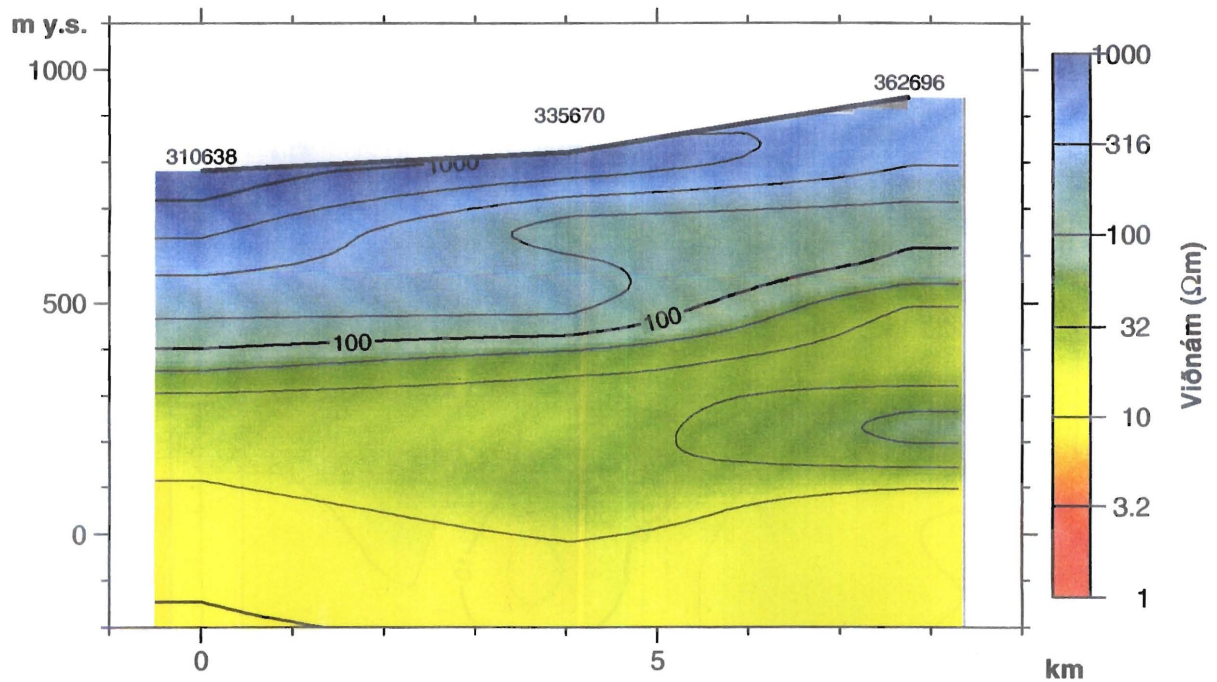
Viðnám 600 metra yfir sjávarmáli (mynd 18) sýnir að greinilega tvo toppa og glyttir vel í háviðnámskjarnann í þeim syðri.

Viðnám 500 metra yfir sjávarmáli (mynd 19) sýnir að jarðhitasvæðið stækkar niður á við og enn eru topparnir tveir, en **Viðnám 400 metra yfir sjávarmáli** (mynd 20) sýnir tengingu lágviðnámskápunnar á milli toppanna.

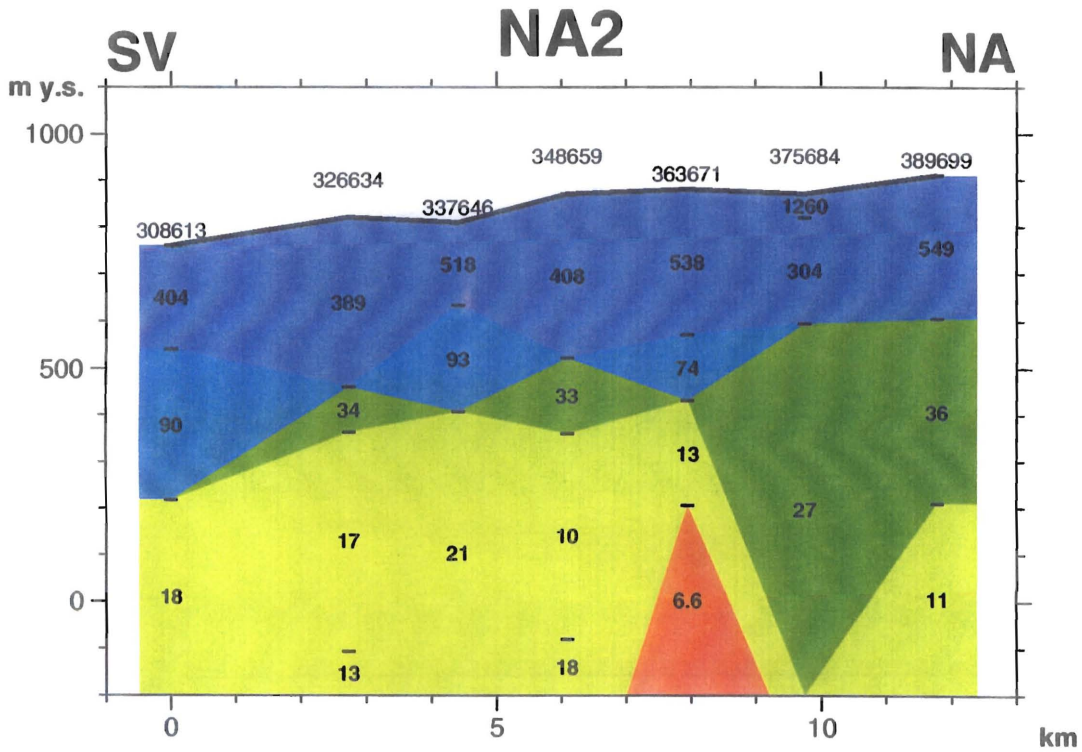
Á næstu kortum, **Viðnám 300, 200 og 100 metra yfir sjávarmáli og við sjávarmál** (myndir 21, 22, 23 og 24) sést að jarðhitakerfið stækkar að flatarmáli niður á við en er vel afmarkað á allar hliðar. Flöturinn, sem afmarkast af lágviðnámskápunni á 900 -1000 metra dýpi frá yfirborði, er nálægt 50 ferkílómetrum að stærð. Ef skyggst er dýpra eru ákveðnar vísbendingar um að svæðið stækki til austurs og norð-austurs. Mörkin virðast hins vegar vera mjög skörp á aðra vegu.



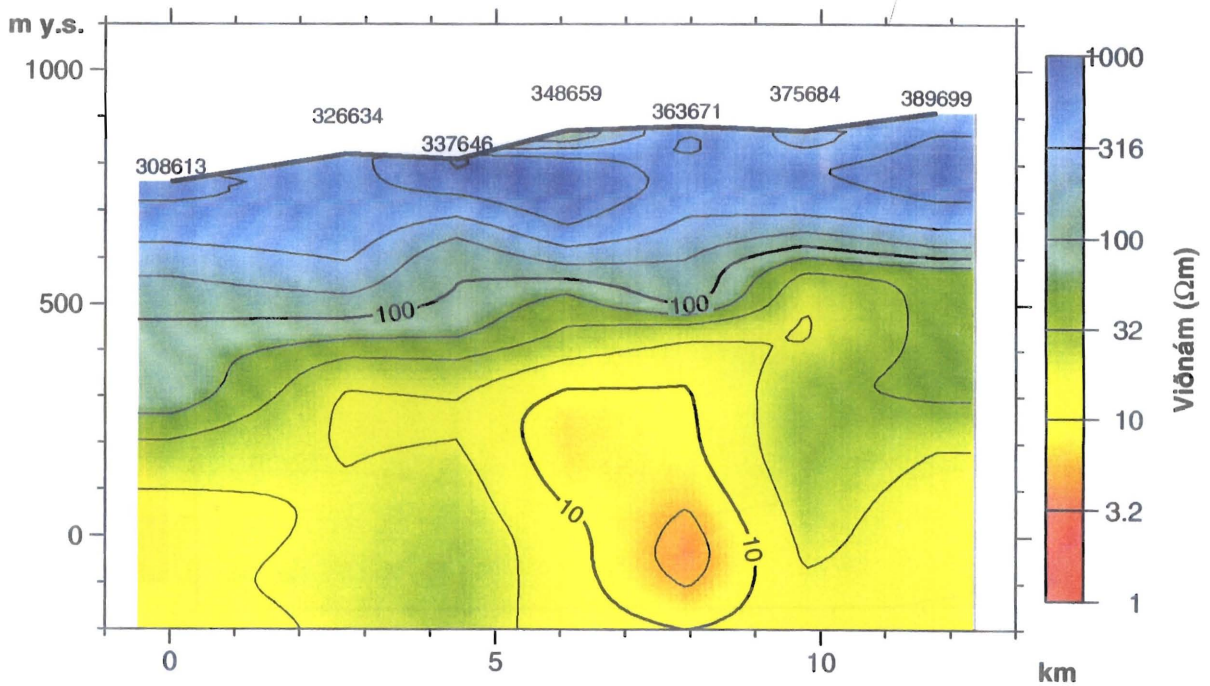
Skýringar :



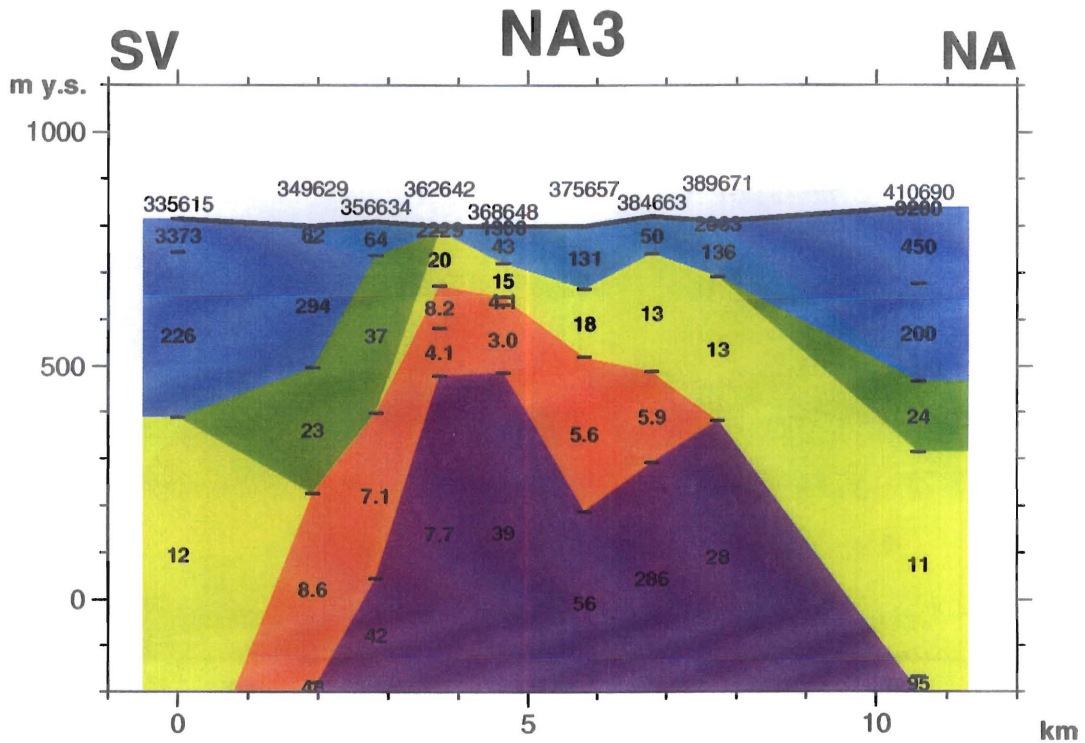
Mynd 3. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið NA1.



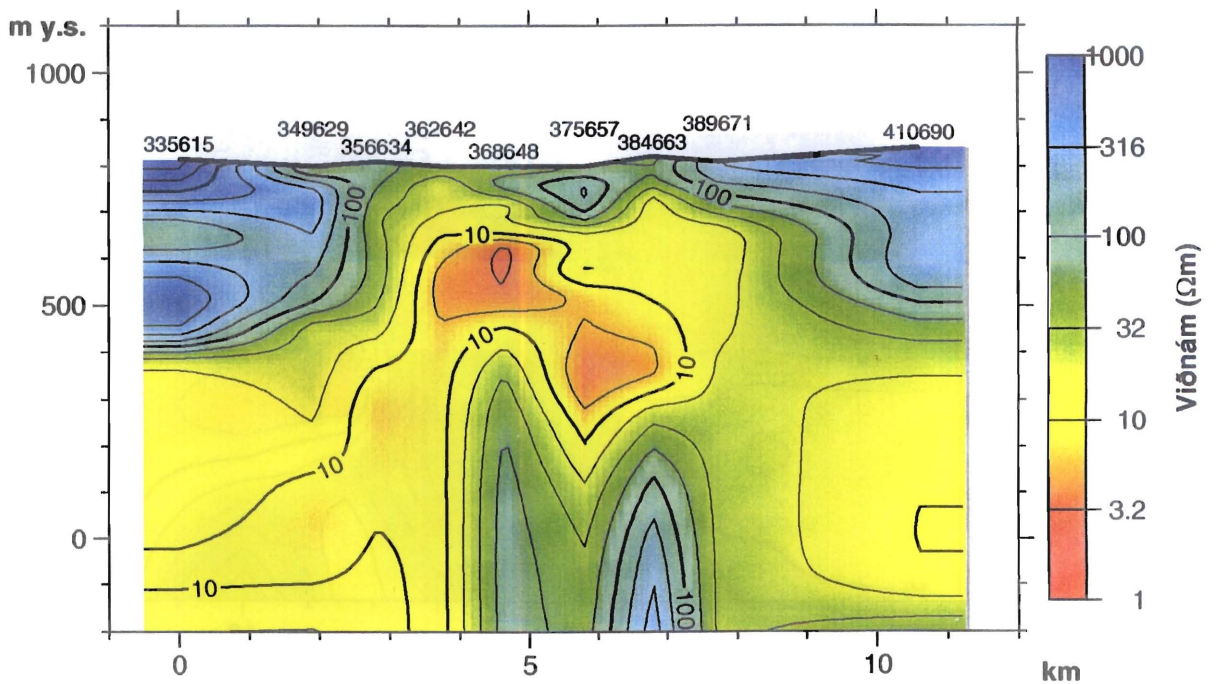
Skýringar :



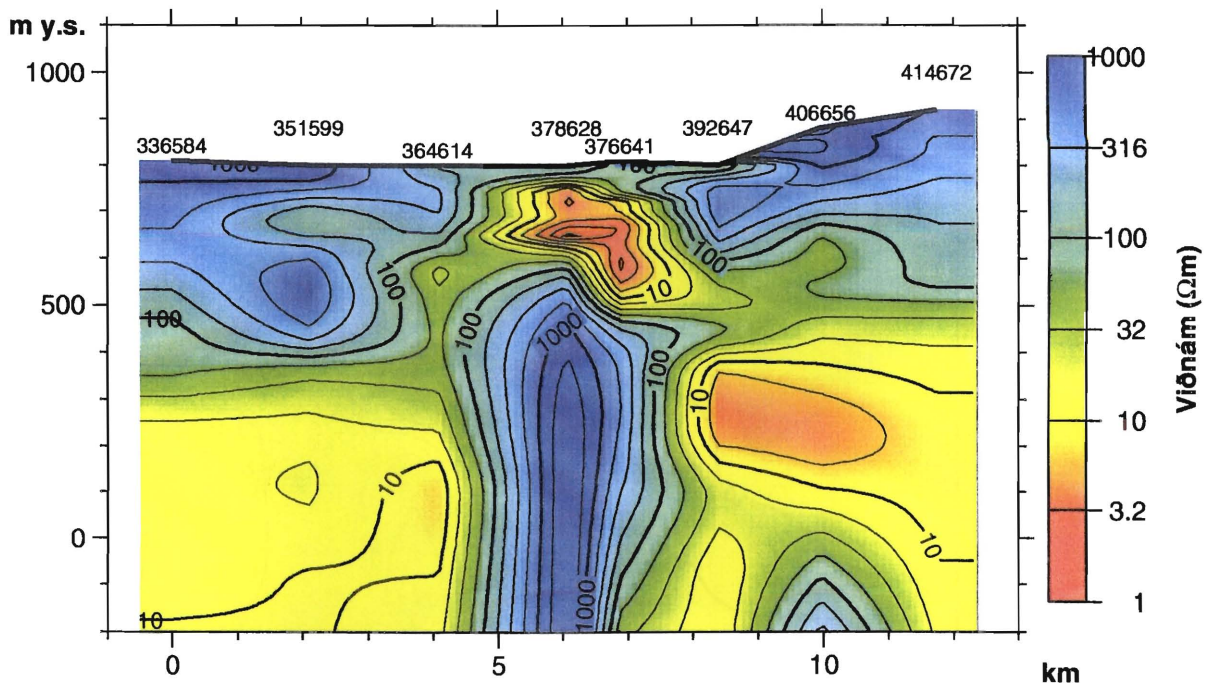
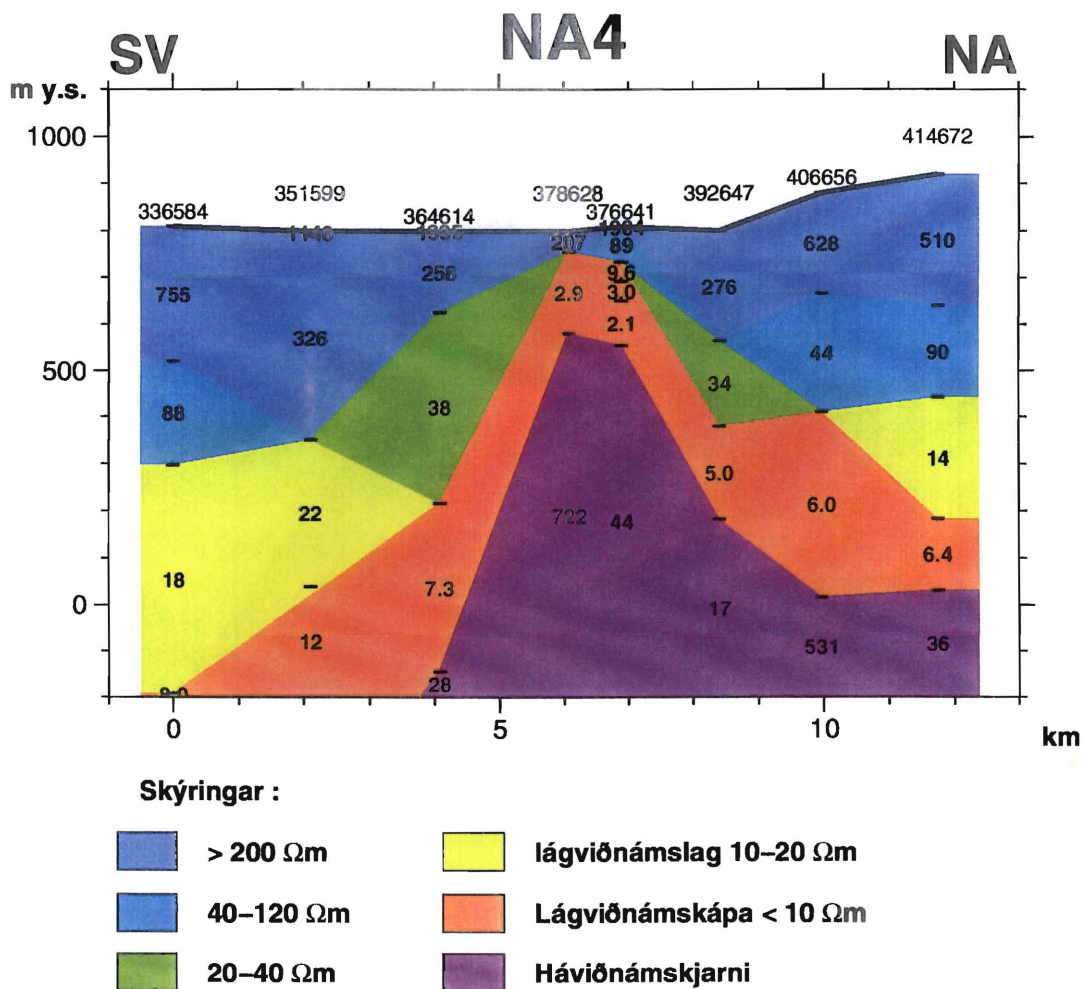
Mynd 4. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið NA2.



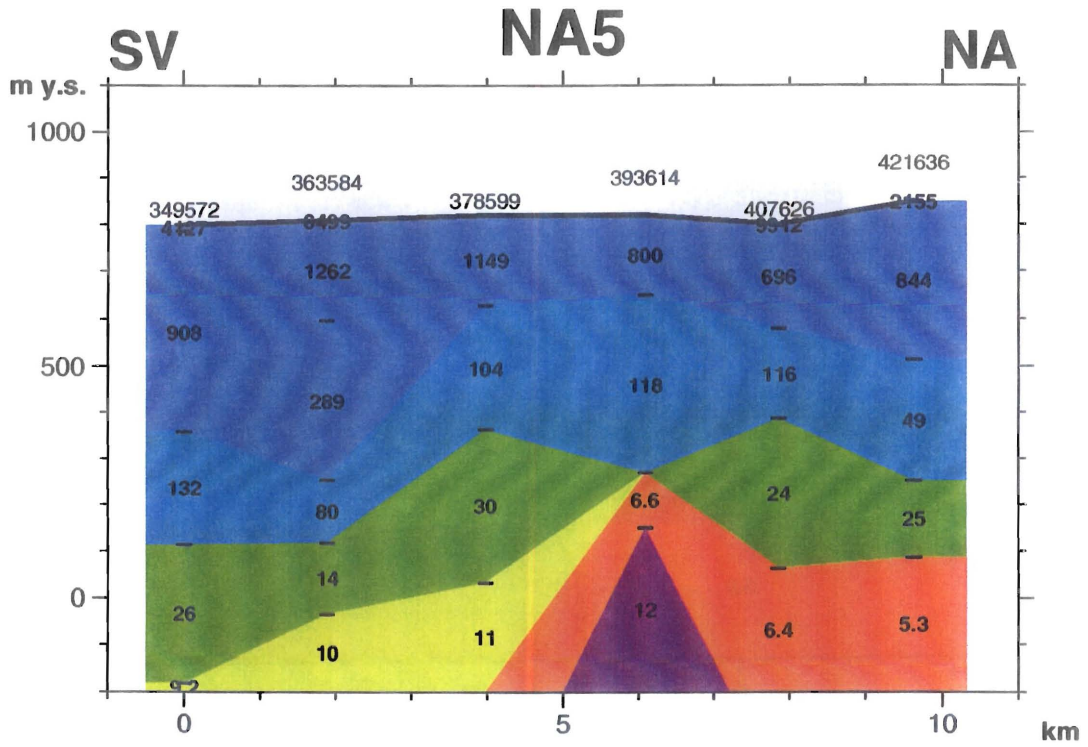
Skýringar :



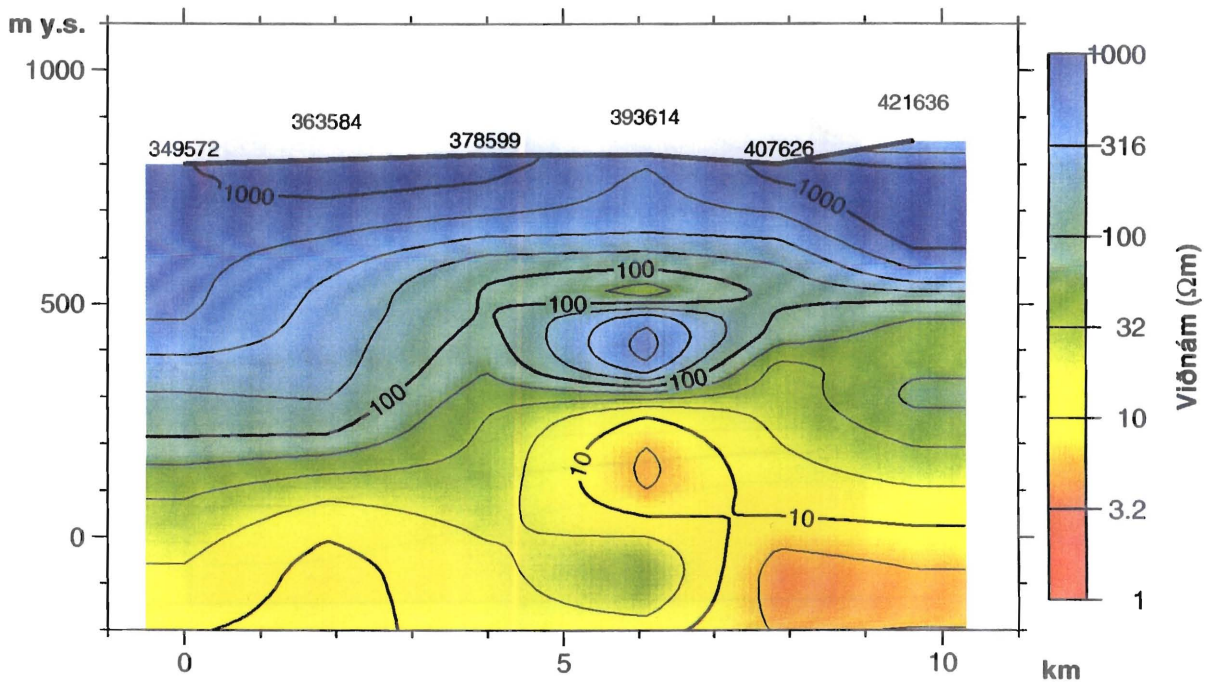
Mynd 5. Köldukvíslarbornar - Viðnámssnið NA3.



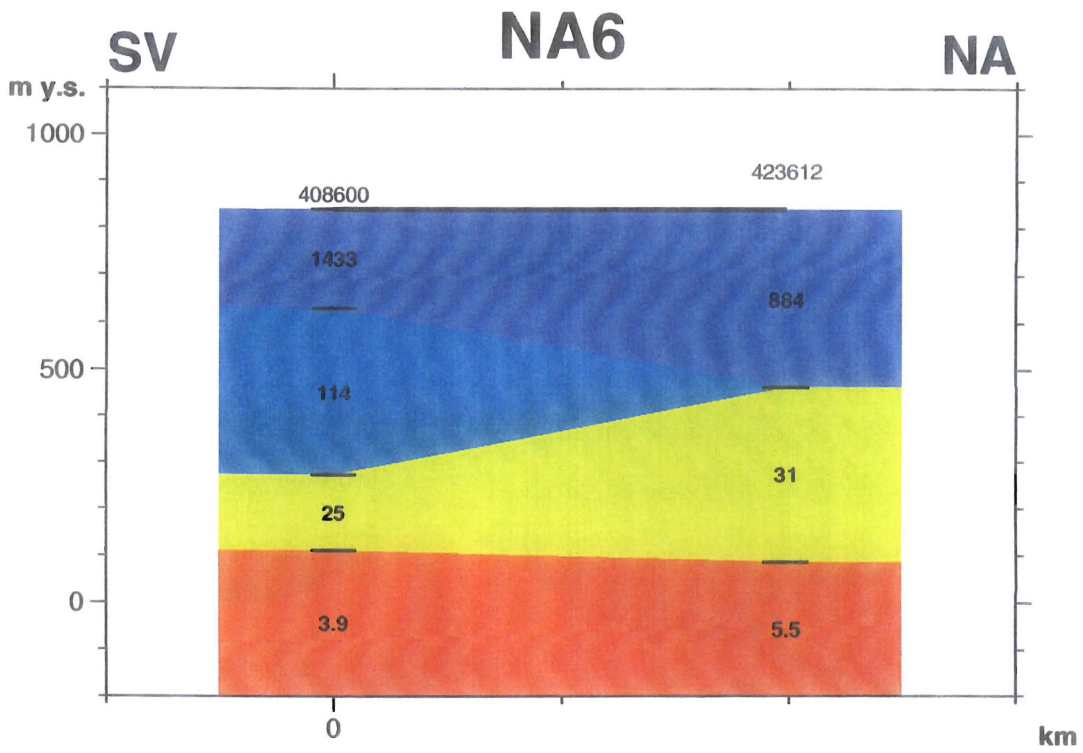
Mynd 6. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið NA4.



Skýringar :

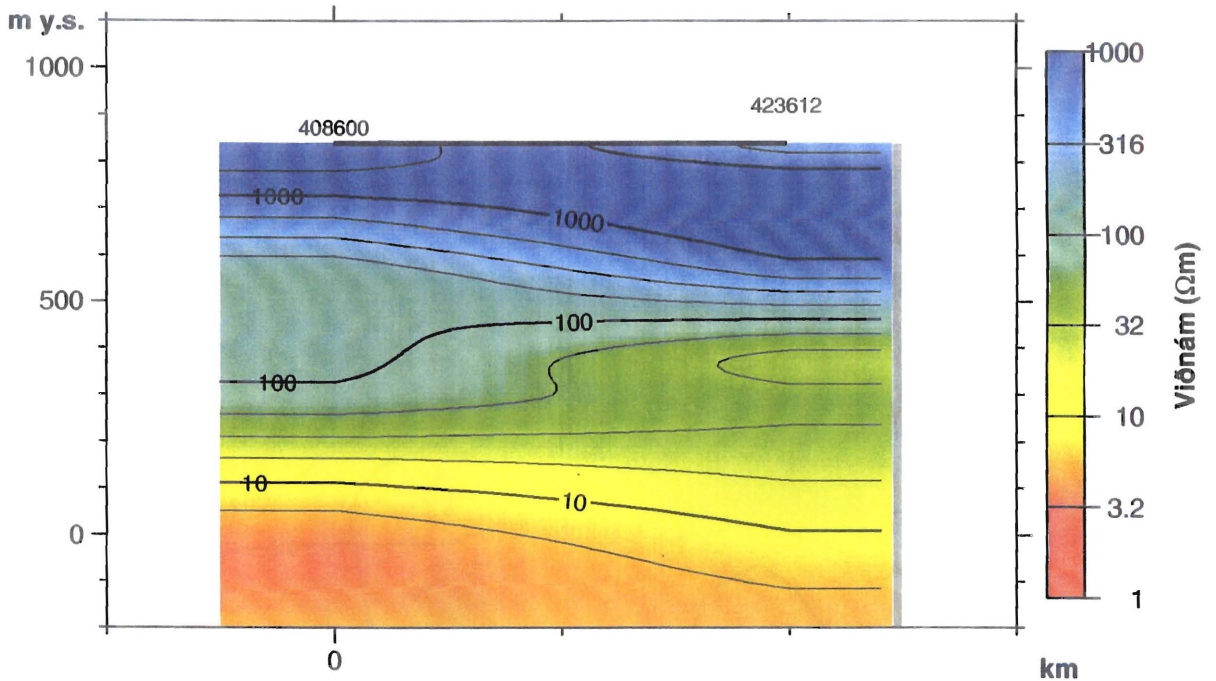


Mynd 7. Köldukvíslarbornar - Viðnámssnið NA5.

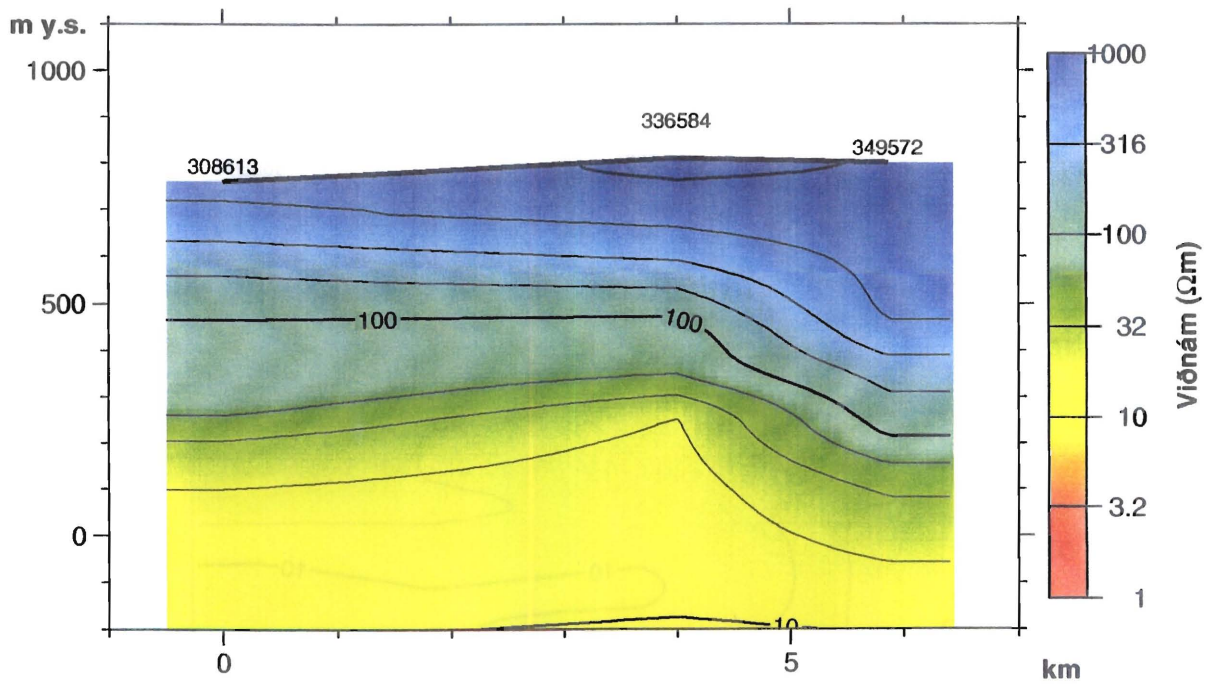
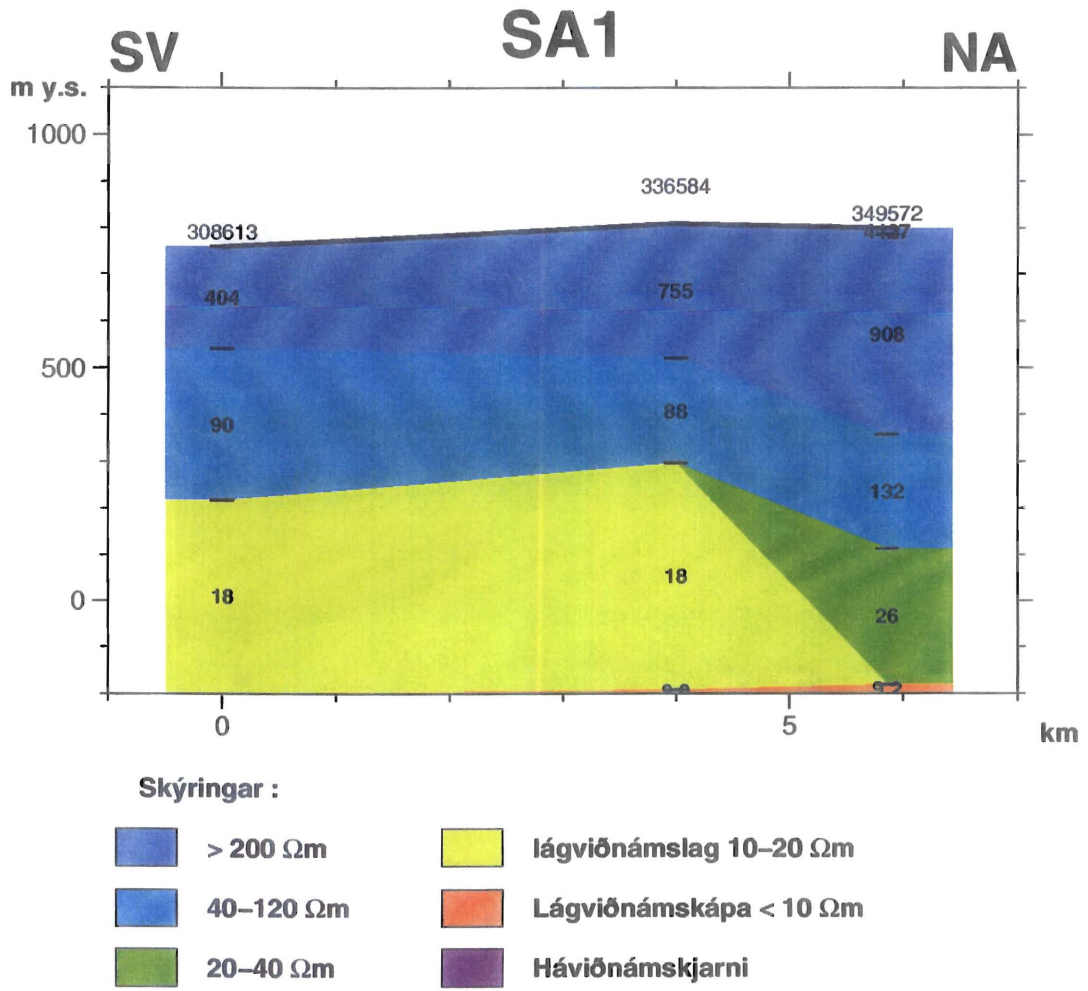


Skýringar :

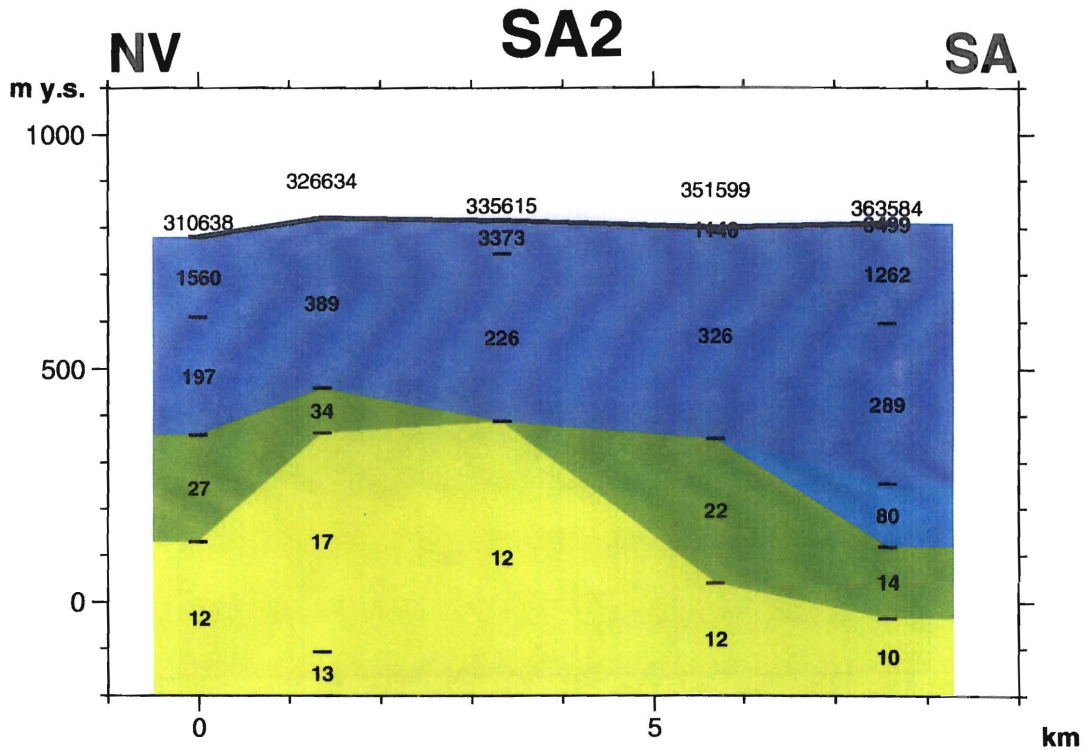
- | | |
|---|--|
|  > 200 Ω m |  lágviðnámslag 10–20 Ω m |
|  40–120 Ω m |  Lágviðnámskápa < 10 Ω m |
|  20–40 Ω m |  Háviðnámskjarni |



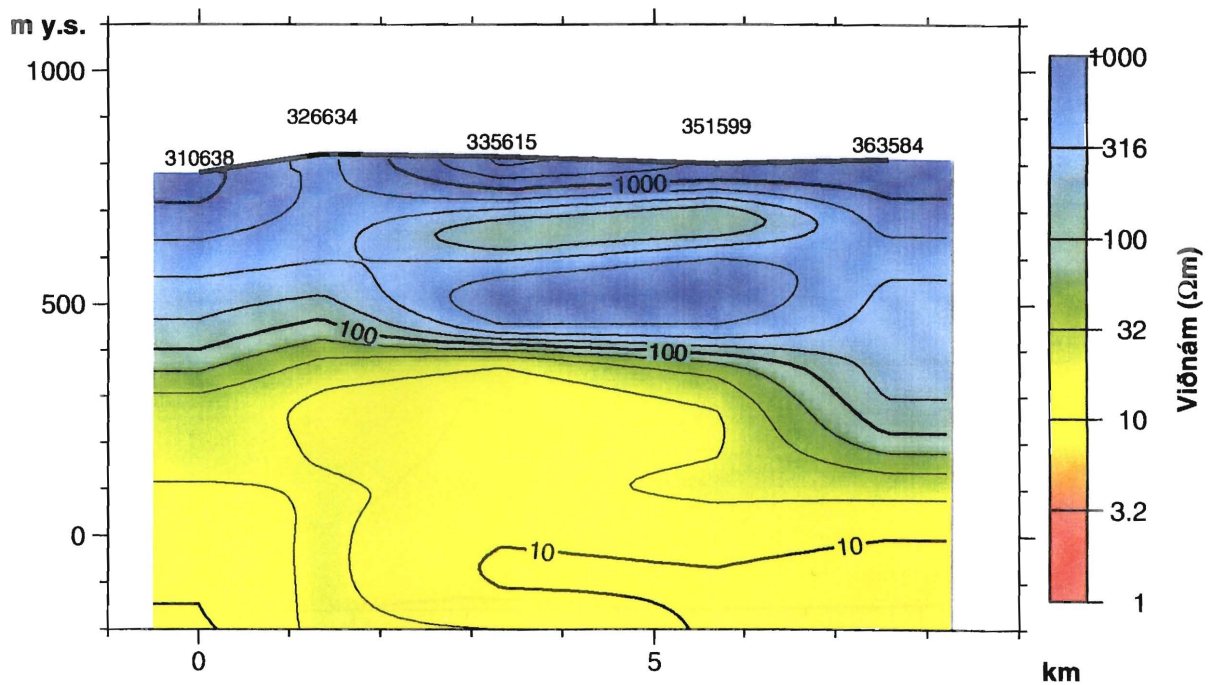
Mynd 8. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið NA6.



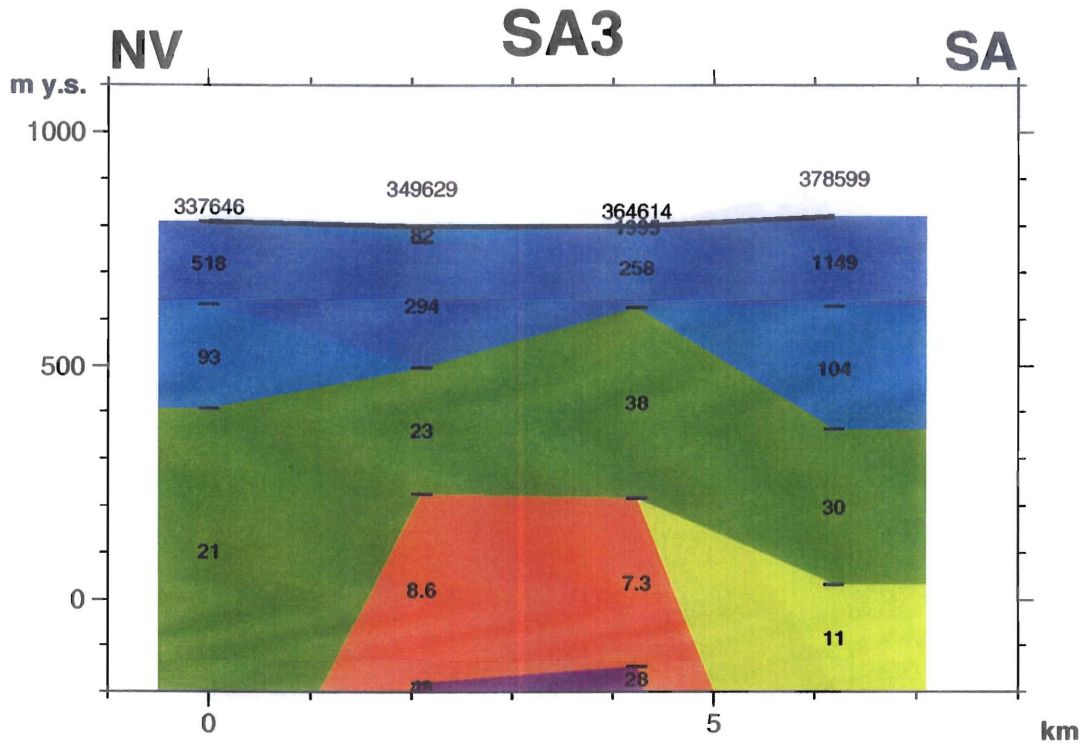
Mynd 9. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið SA1.



- Skýringar :**
- > 200 Ωm
 - 40-120 Ωm
 - 20-40 Ωm
 - Lágviðnámslag 10-20 Ωm
 - Lágviðnámskápa < 10 Ωm
 - Háviðnámskjarni

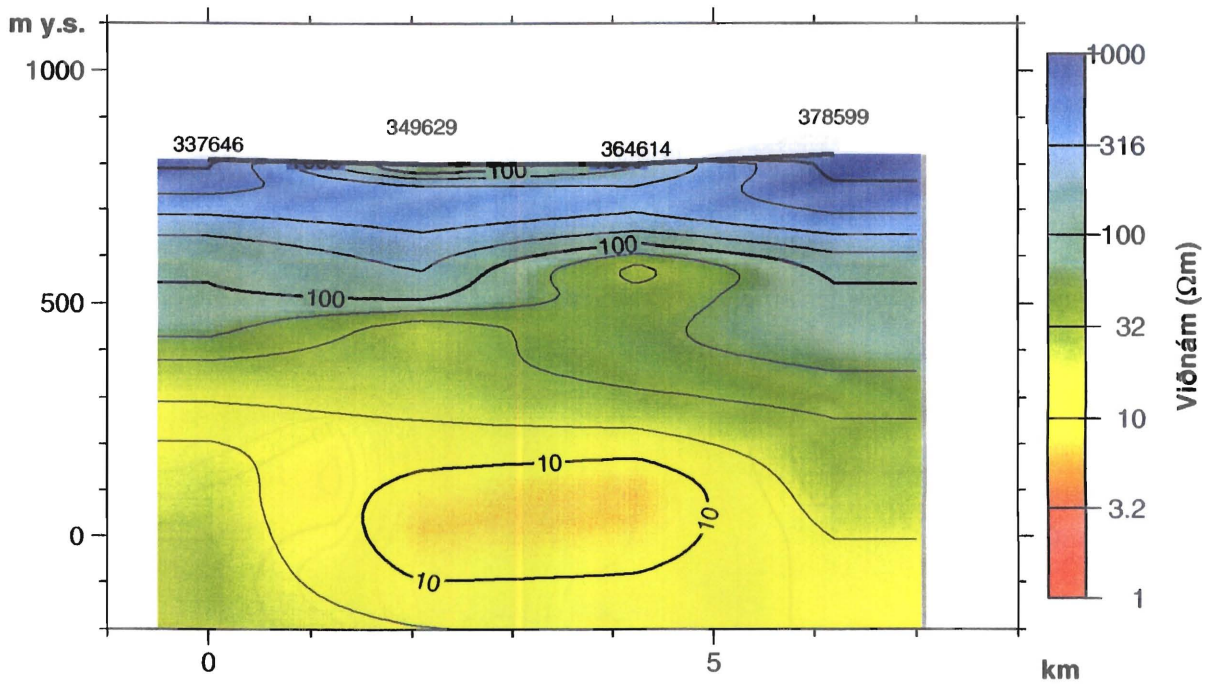


Mynd 10. Köldukvíslarbornar - Viðnámssnið SA2.

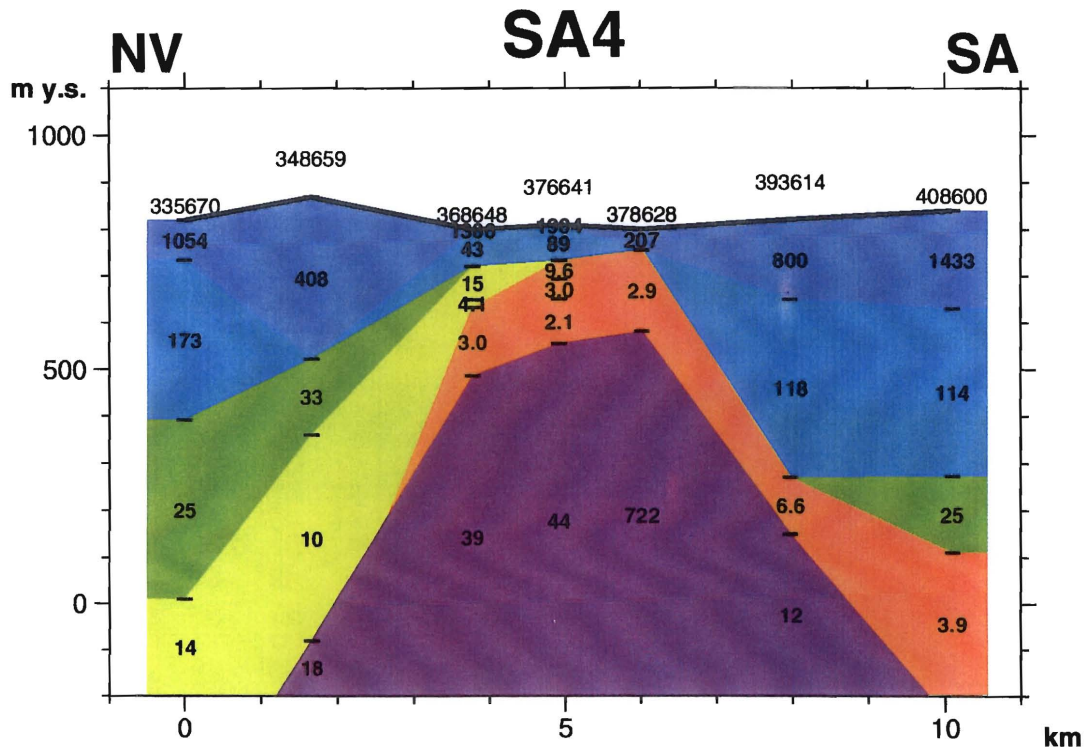


Skýringar :

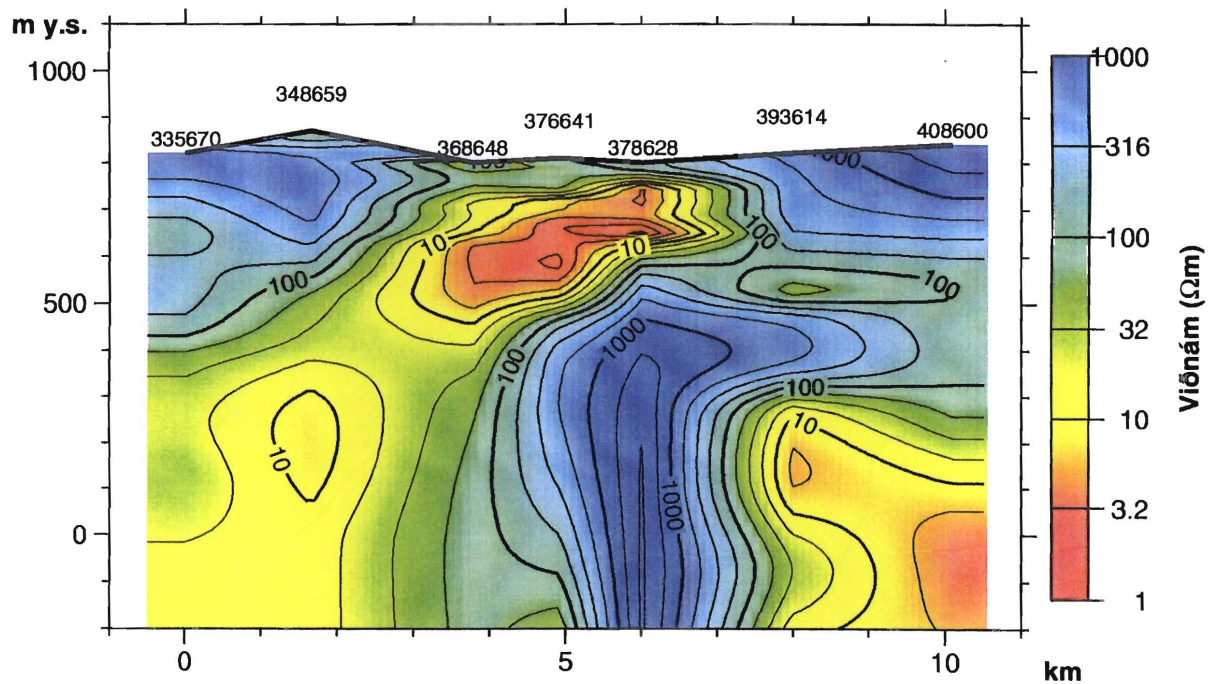
- | | |
|-----------|------------------------|
| > 200 Ωm | lágviðnámslag 10–20 Ωm |
| 40–120 Ωm | Lágviðnámskápa < 10 Ωm |
| 20–40 Ωm | Háviðnámskjarni |



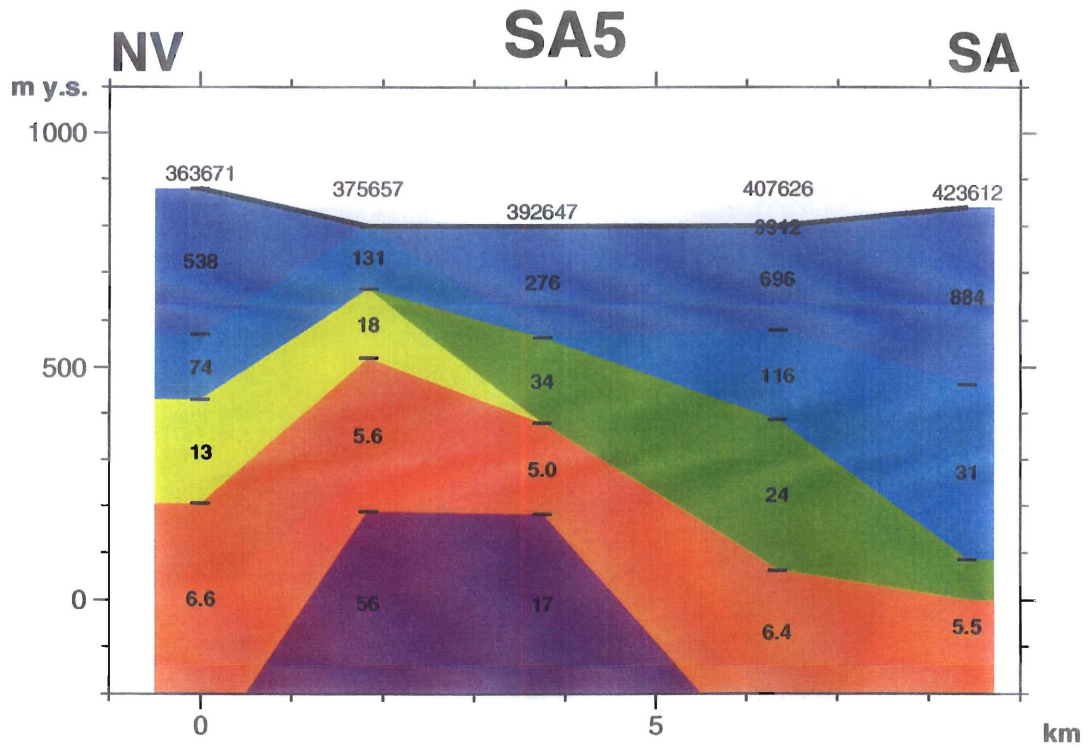
Mynd 11. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið SA3.



Skýringar :

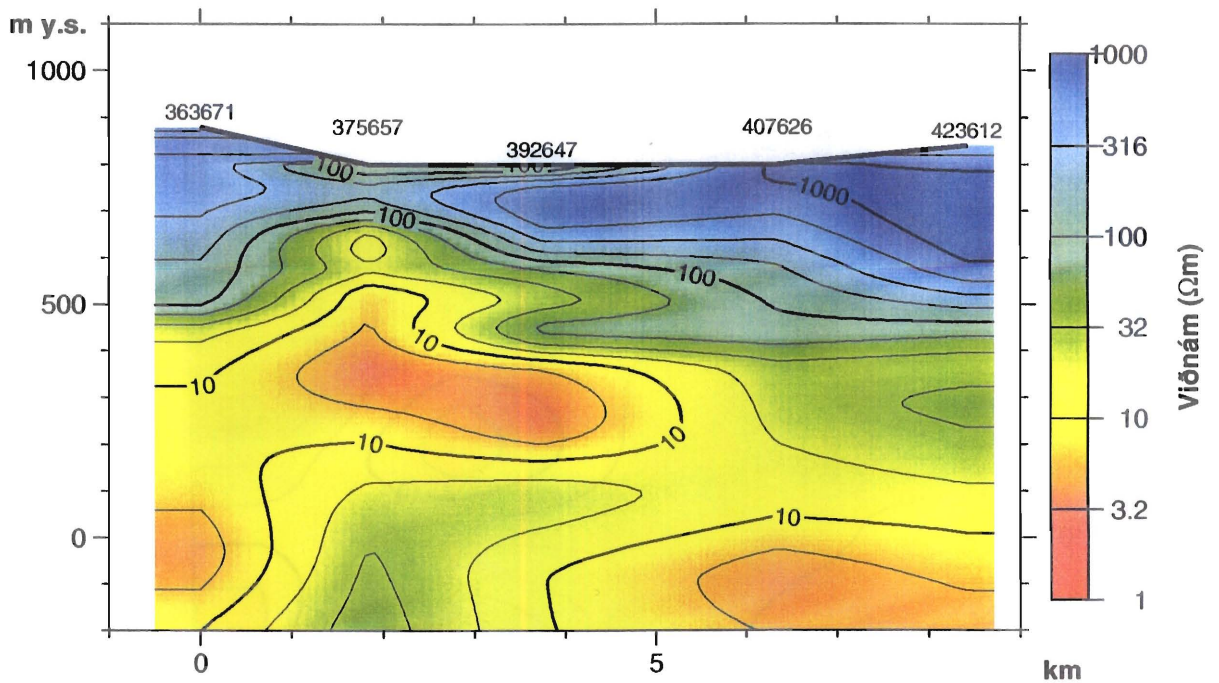


Mynd 12. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið SA4.

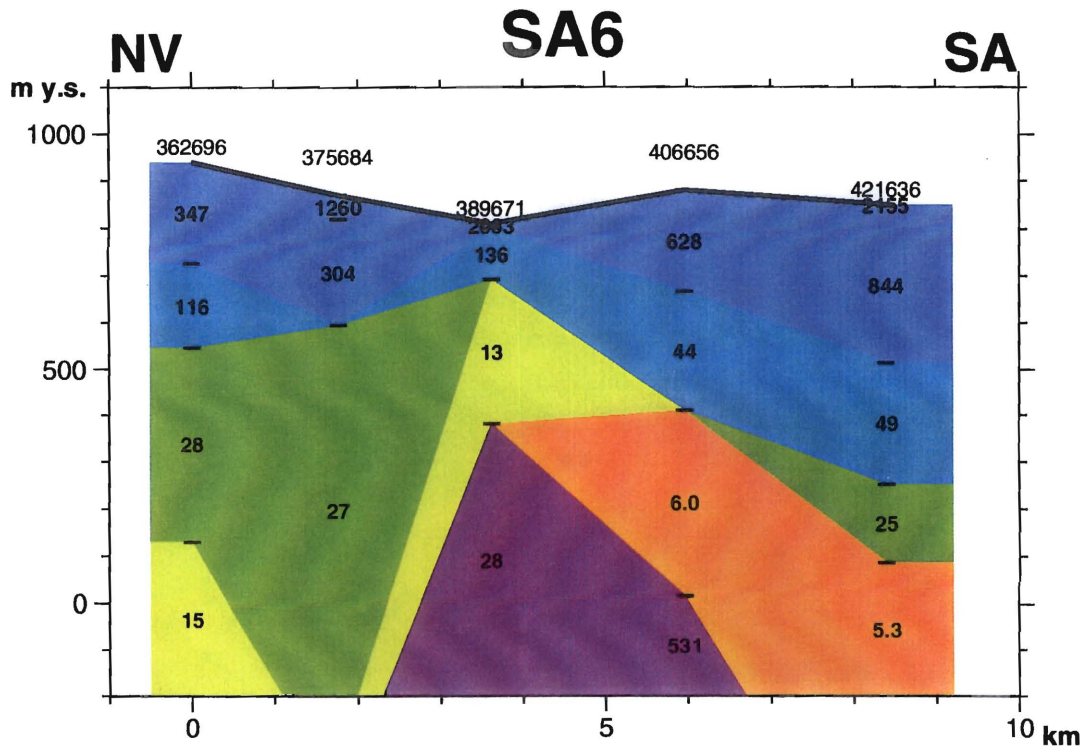


Skýringar :







- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| > 200 Ω m | lágviðnámslag 10–20 Ω m |
| 40–120 Ω m | Lágviðnámskápa < 10 Ω m |
| 20–40 Ω m | Háviðnámskjarni |

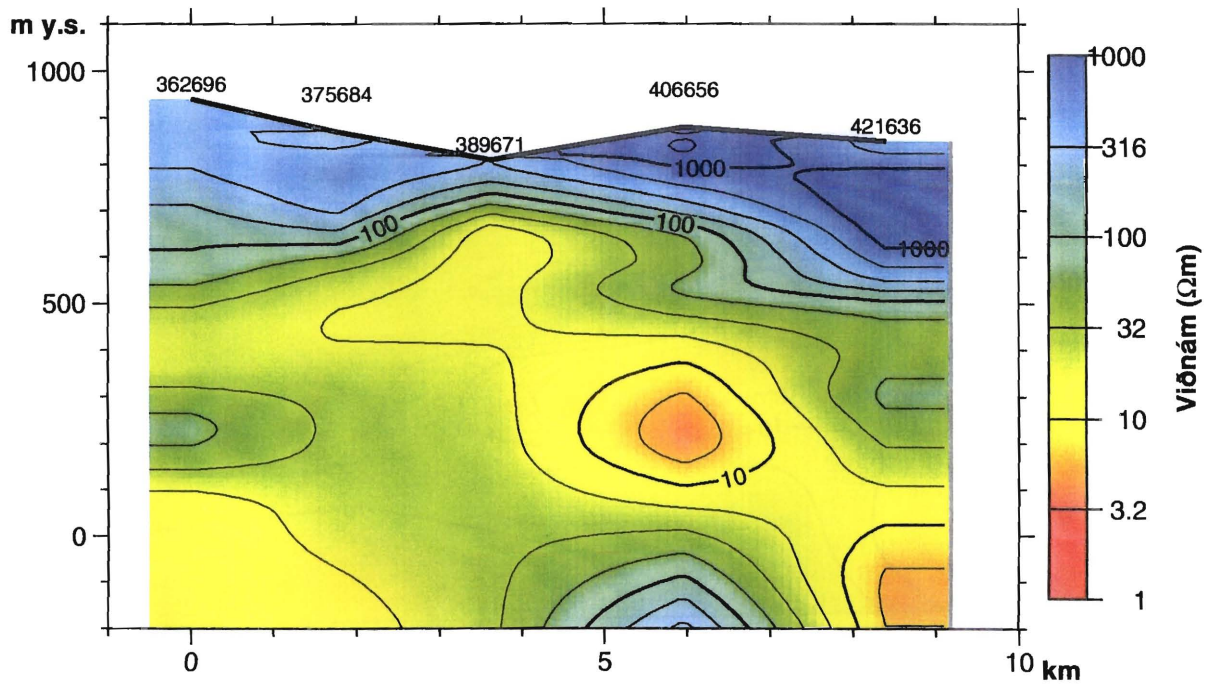


Mynd 13. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið SA5.

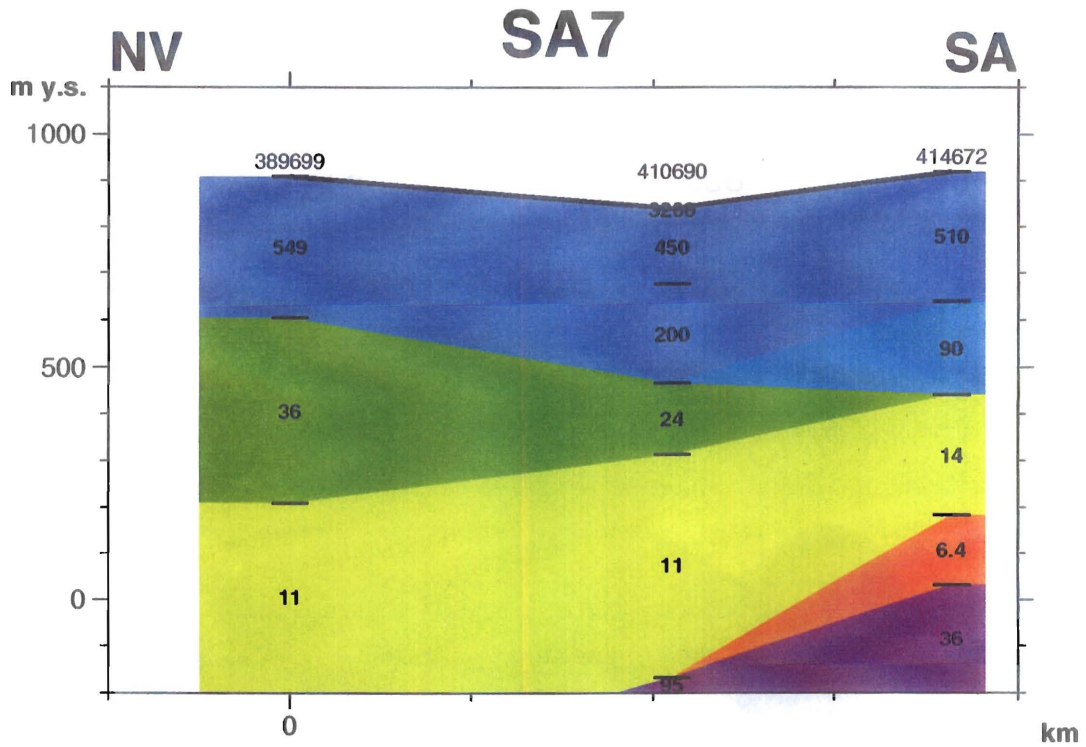


Skýringar :

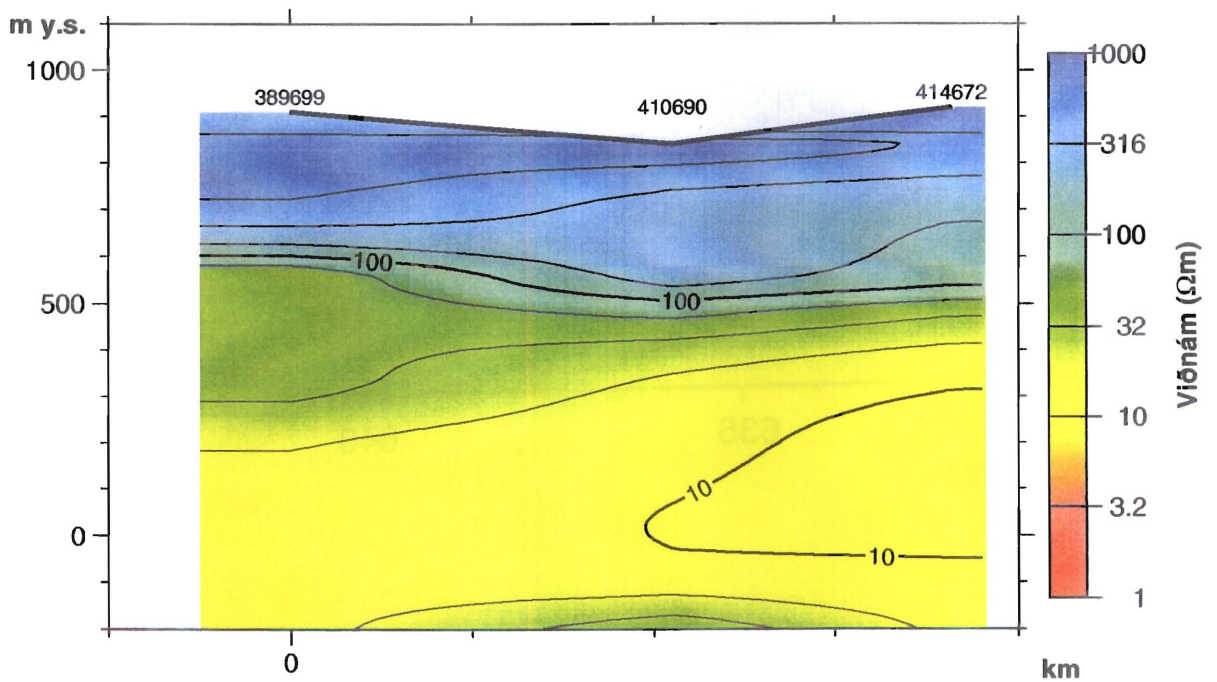
- | | |
|---|--|
|  > 200 Ω m |  Lágviðnámslag 10–20 Ω m |
|  40–120 Ω m |  Lágviðnámskápa < 10 Ω m |
|  20–40 Ω m |  Háviðnámskjarni |



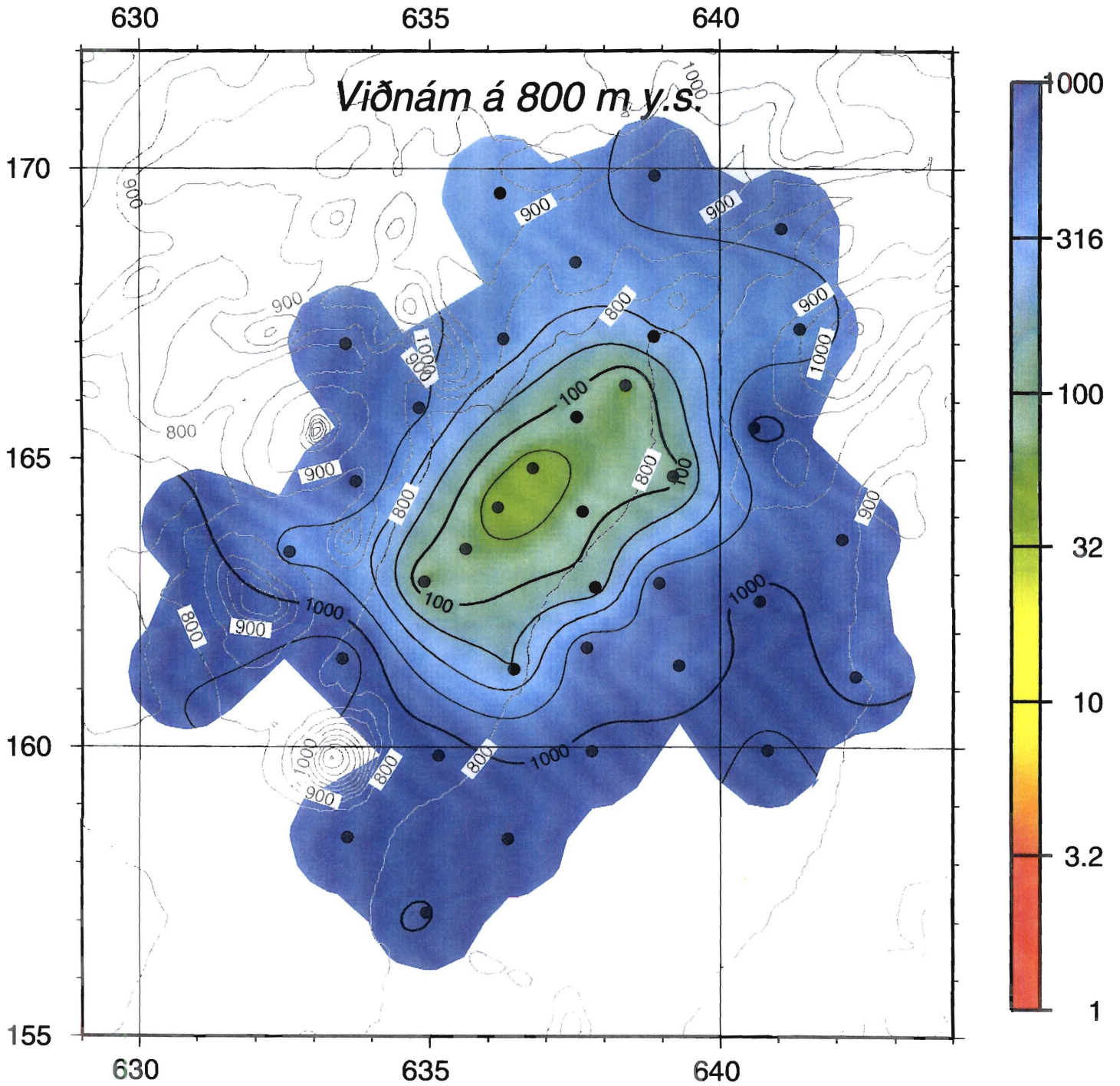
Mynd 14. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið SA6.



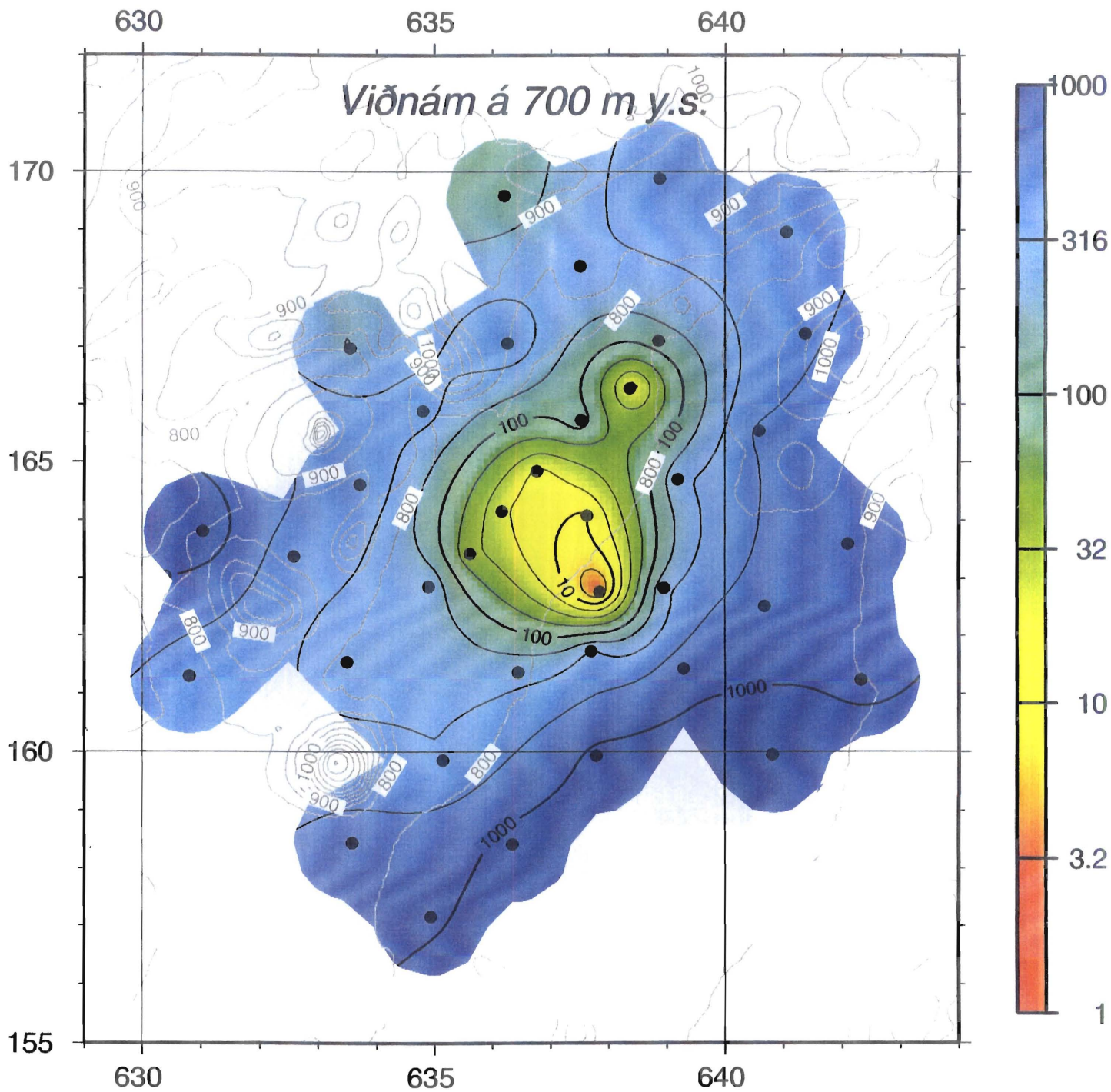
Skýringar :



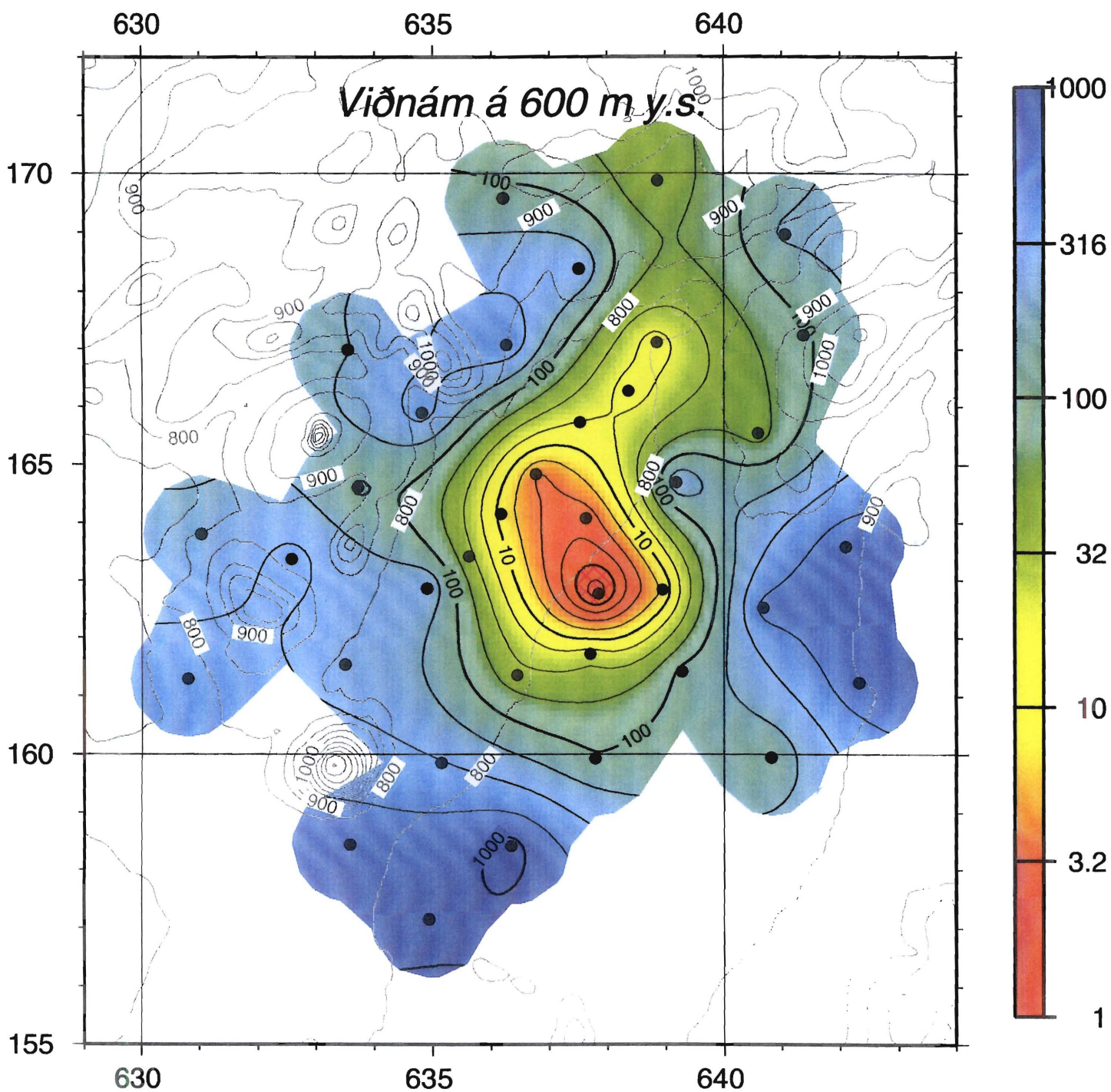
Mynd 15. Köldukvíslarbornar - Viðnámsnið SA7.



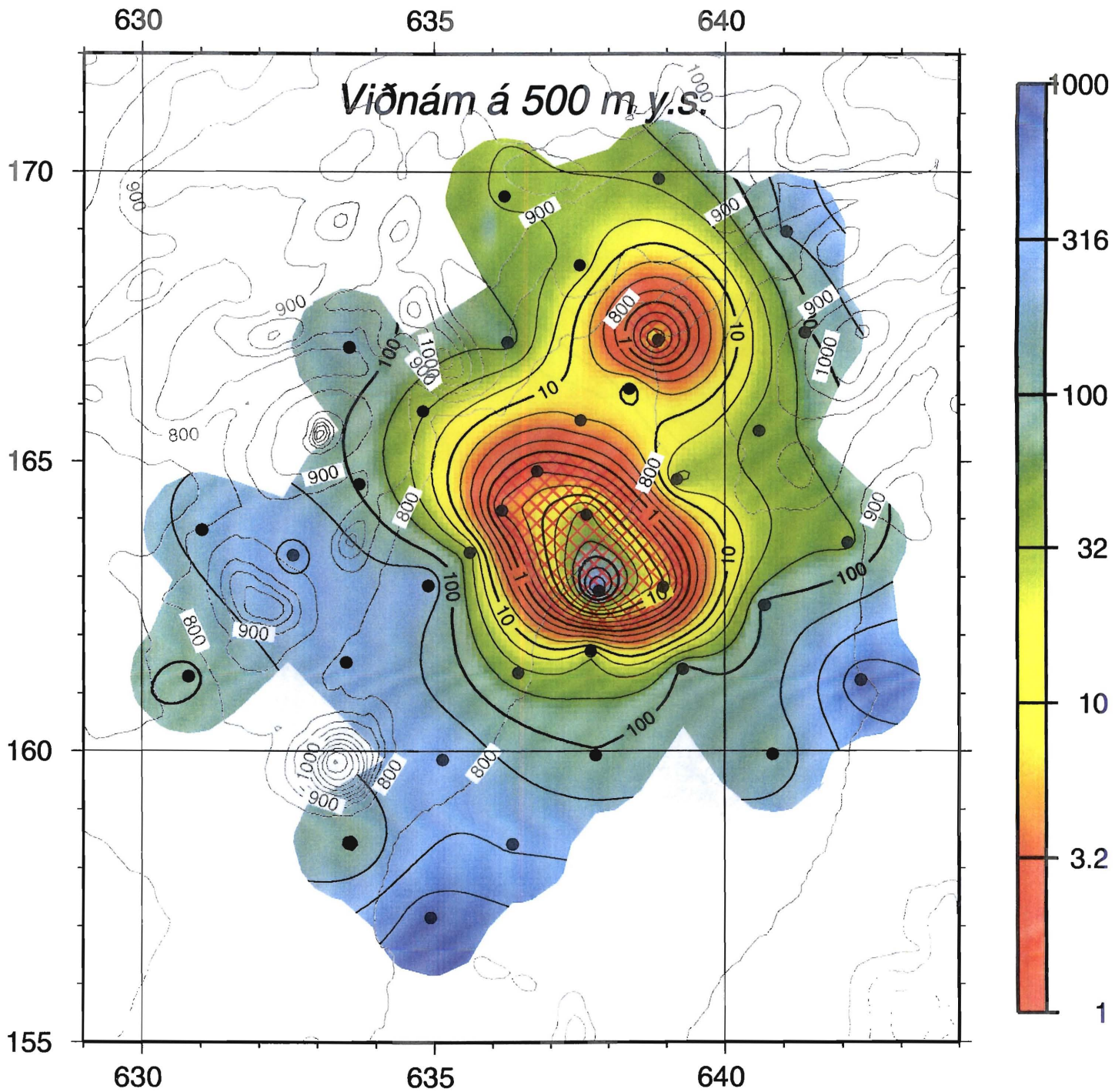
Mynd 16. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 800 m y.s.



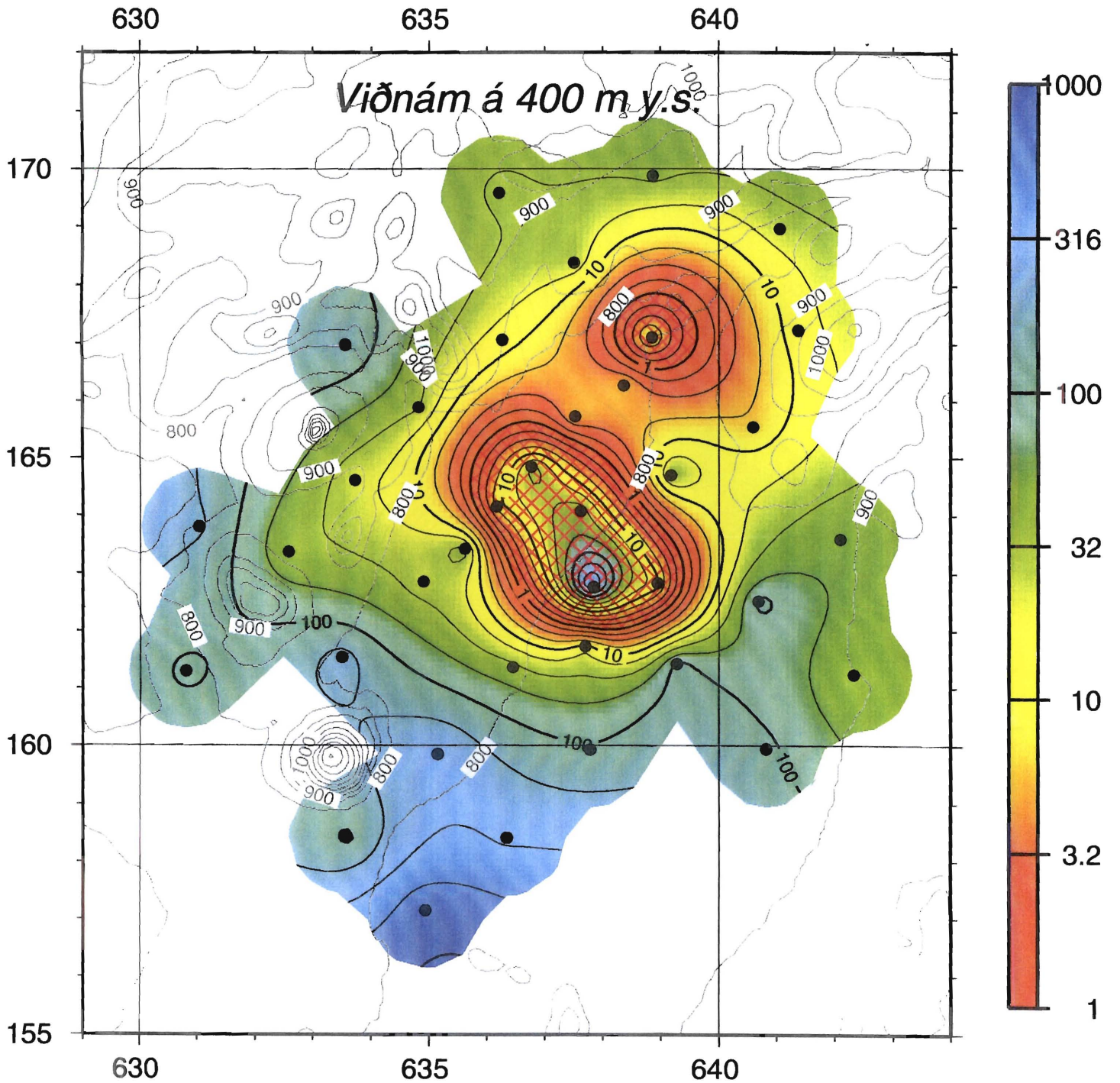
Mynd 17. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 700 m y.s.



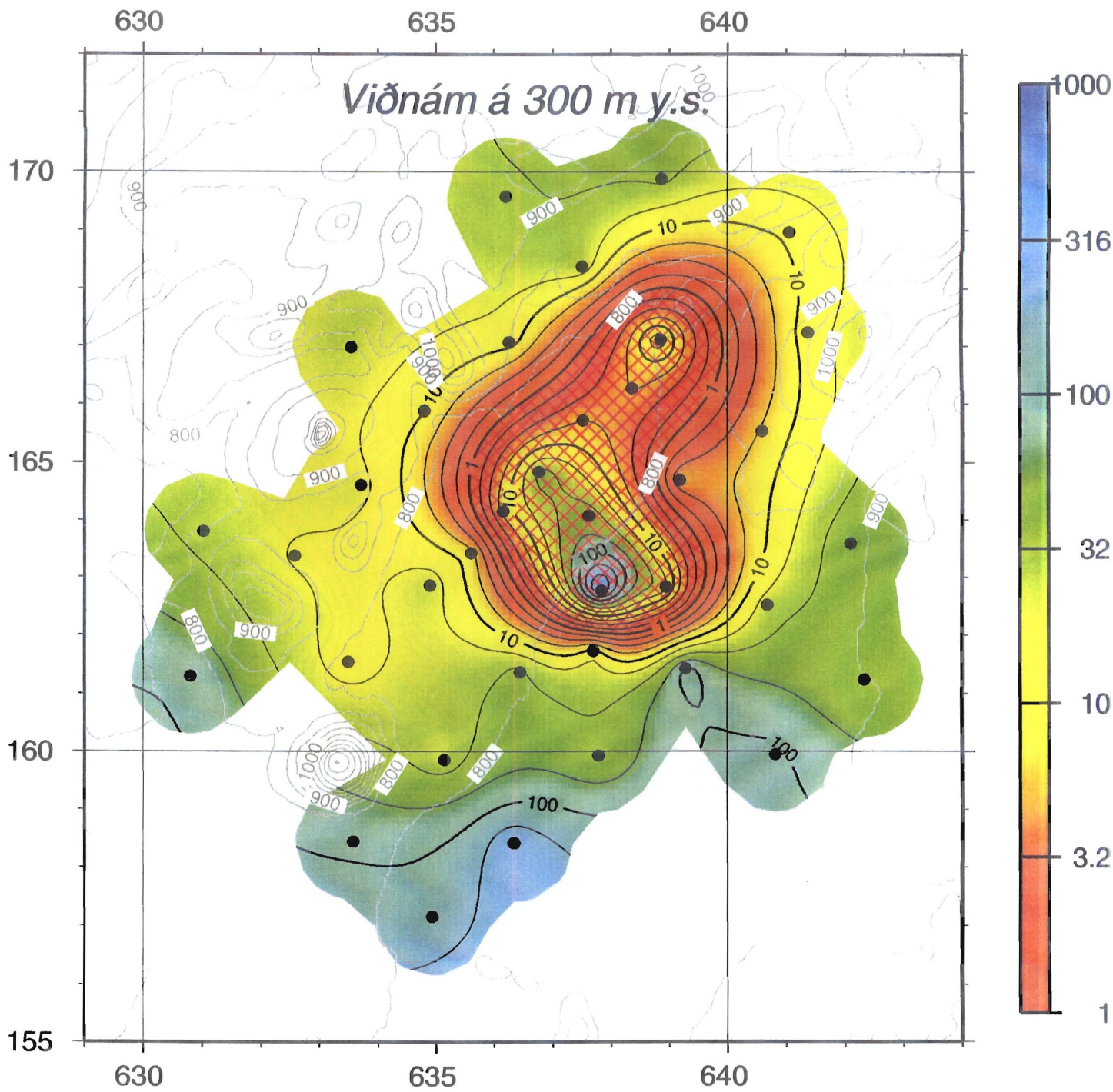
Mynd 18. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 600 m y.s.



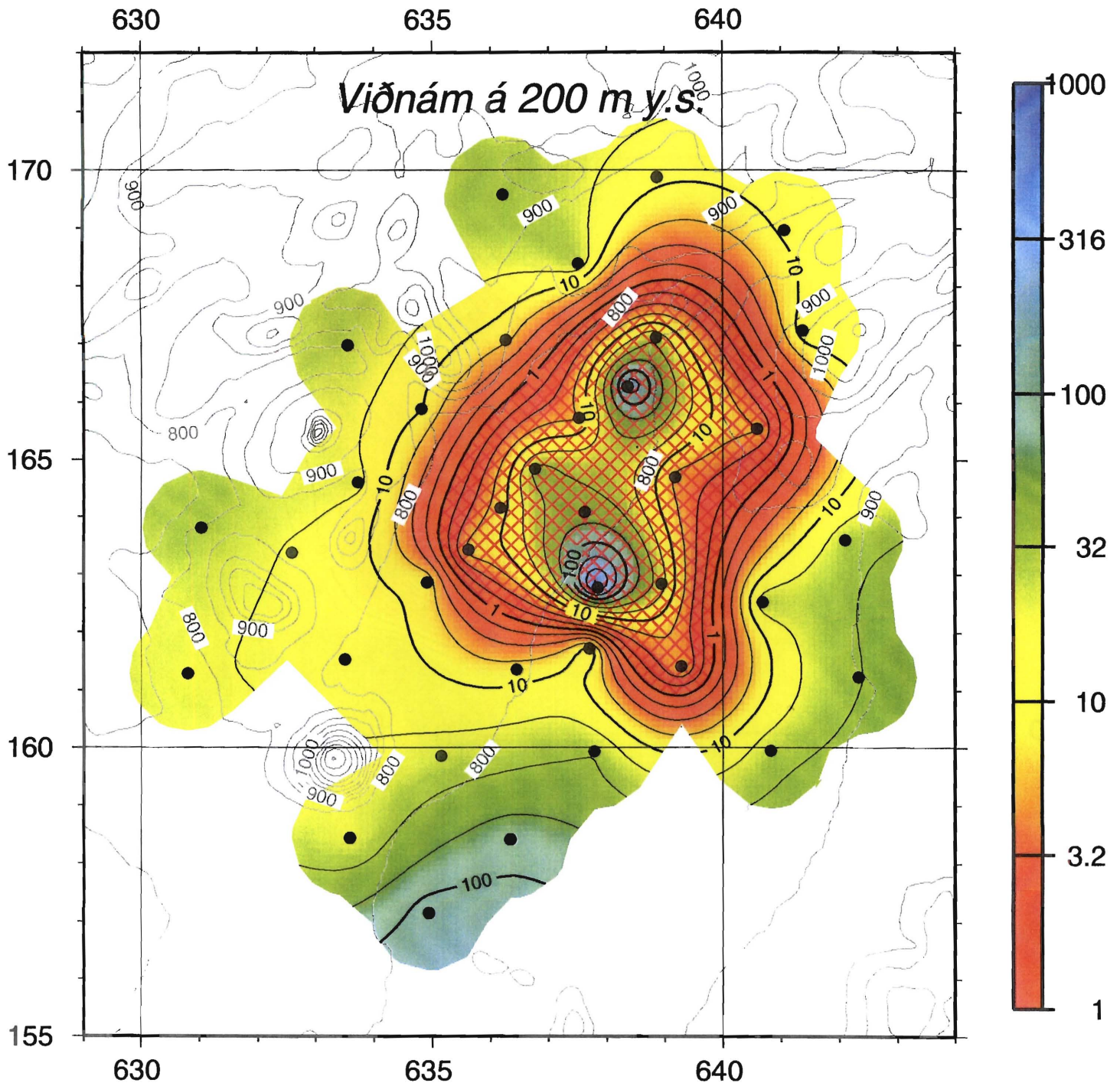
Mynd 19. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 500 m y.s.



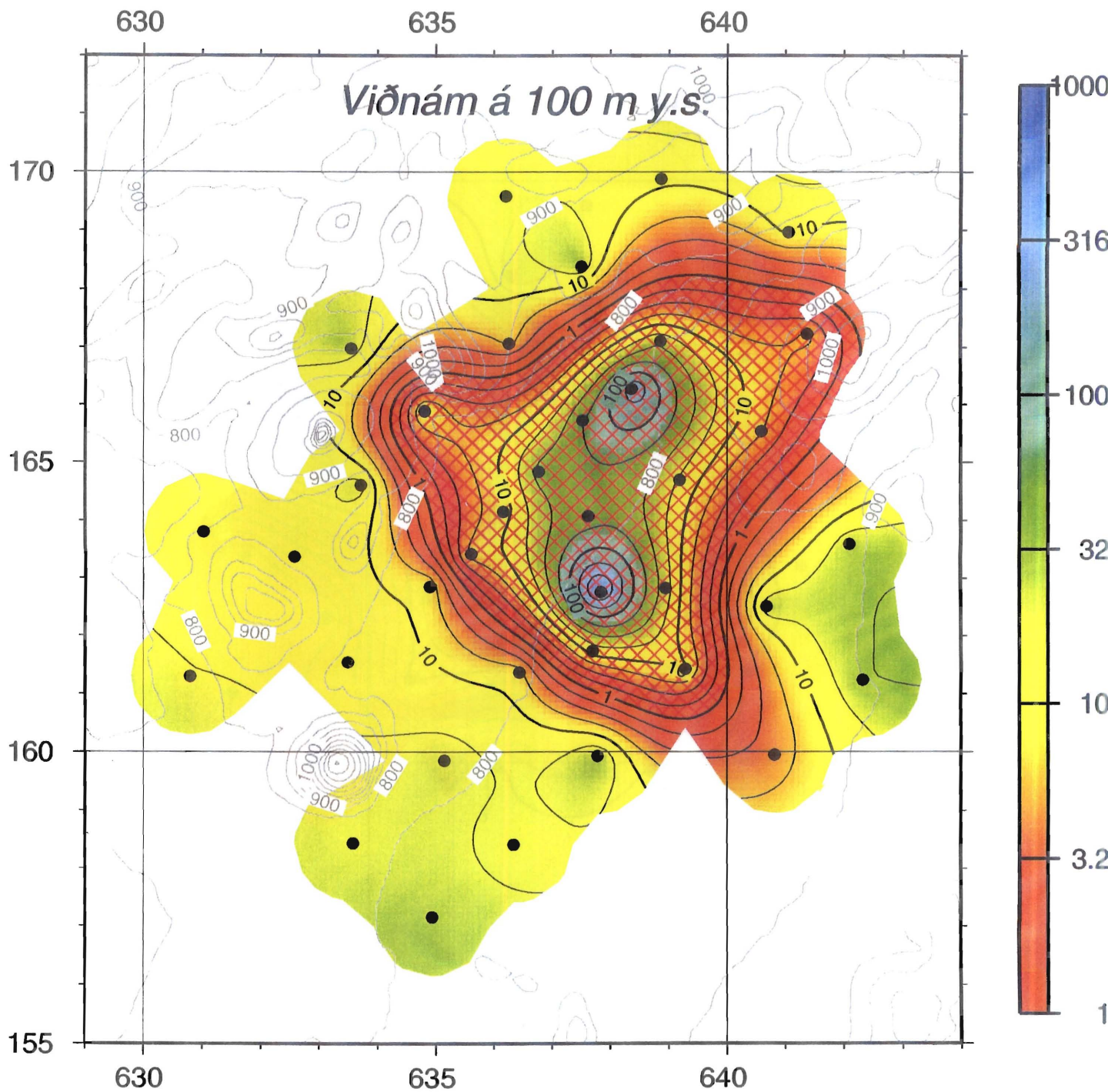
Mynd 20. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 400 m y.s.



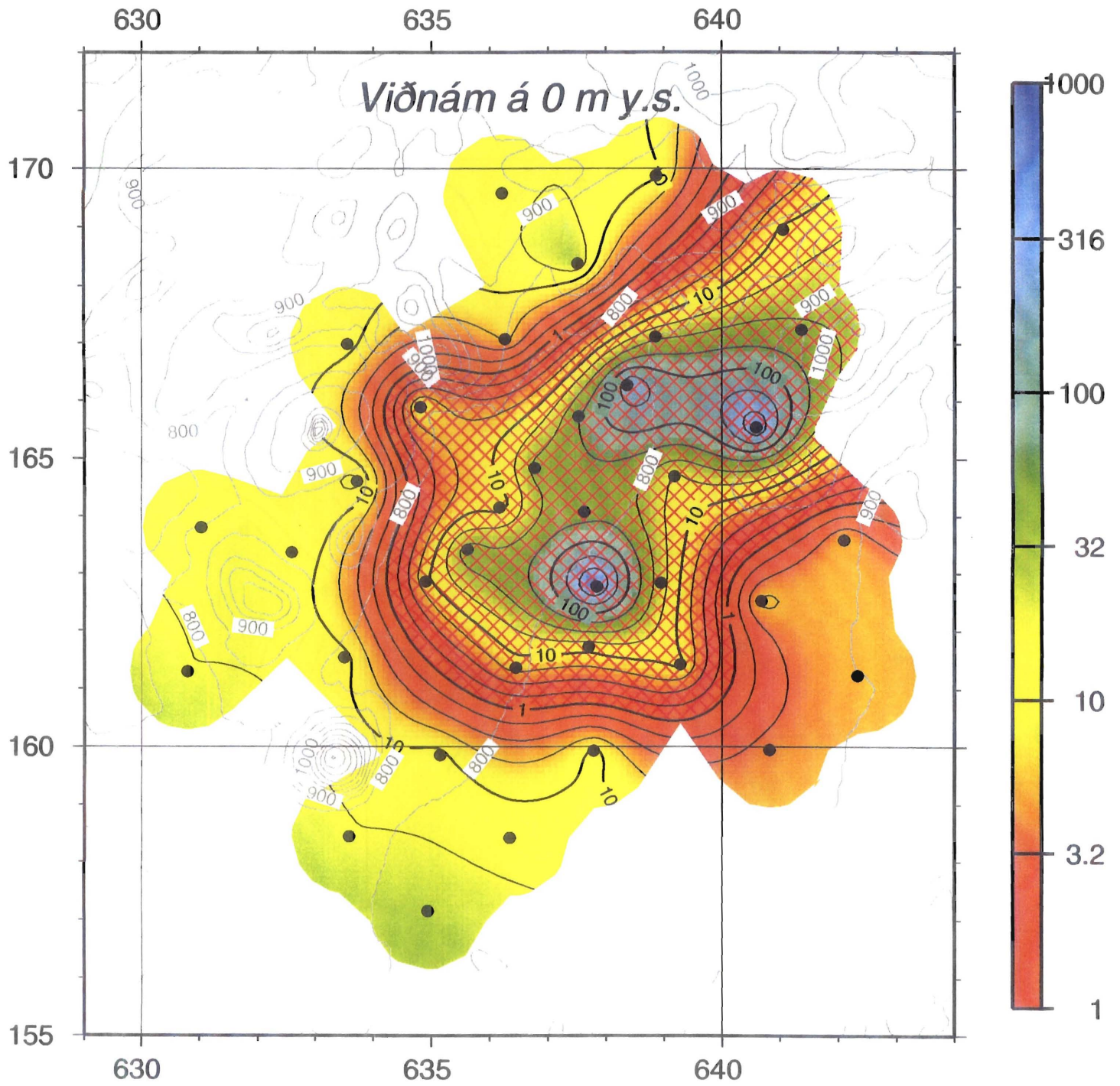
Mynd 21. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 300 m y.s.



Mynd 22. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 200 m y.s.



Mynd 32. Köldukvíslarbornar - Viðnámskort 100 m y.s.



Mynd 24. Köldukvísirbarnar - Viðnámsskort 0 m y.s.

6. NIÐURSTÖÐUR VIÐNÁMSMÆLINGANNA

Viðnámsmælingar í Köldukvíslarbotnum sýna að þar er víðáttumikið háhitakerfi. Viðnámsmælingarnar endurspeglar háhitaummyndunina sem bergið hefur orðið fyrir. Að því tilskyldu að ummyndun bergsins sé í jafnvægi við hitaástand jarðhitakerfisins, endurspeglar lágviðnámskápan hita á bilinu 100-230°C og háviðnámskjarninn hitastig yfir 240°C.

Hátoppur jarðhitakerfisins er undir vestanverðu Sveðjuhrauni, þar sem hraunið hefur runnið yfir jarðhitasvæðið fyrir um 2000 árum en jarðhitinn síðan náð upp úr hrauninu og ummyndað það á allstórum bletti (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl., 1996). Heldur lækkar á topp jarðhitakerfisins til norð vesturs að því svæði þar sem mest ummerki jarðhita eru á yfirborði norð-vestan við enda Sveðjuhrauns. Á þessu svæði (í mælingum 378628 og 376641) er lágviðnámskápan á 70-90 metra dýpi undir yfirborði (720-750 m y.s.) og háviðnámskjarninn er á 200-250 metra dýpi undir yfirborði (550-600 m y.s.) Þarna hvelfist jarðhitakerfið hæst upp undir yfirborð, og mæling 376641 er við mestu ummerki um jarðhita á yfirborði. Í þessum tveimur mælingum er einnig lægst viðnám í lágviðnámskápunni eða (2-3 Ωm). Allt hnígur þetta að því að þarna sé mest virkni, allt frá jarðhitnum norðvestan við Sveðjuhraunið og innundir hraunið vestanvert eins og sést þar sem jarðhitinn nær upp í gegnum hraunið.

Annar lægri toppur er á háviðnámskjarnanum um 3-4 km norðaustan við hátoppinn. Þessi lægri toppur kemur fram í mælingunum 389671 og 384663 en sú síðarnefnda er einmitt við jarðitaummerki í yfirborði. Í mælingunum norðan og norðaustan við þennan topp (375684, 389699 og 410690) "vantar" lágviðnámskápuna eða viðnám í lágviðnámskápunni hækkar í 11-13 Ωm. Þetta geta verið vísbendingar um kælingu á þessu svæði.

Á 900-1000 metra dýpi er sá lárétti flötur, sem afmarkast af ytri mörkum lágviðnámskápunnar, um 50 ferkílómetrar að stærð og háviðnámskjarninn um 28 ferkílómetrar. Til viðmiðunar má geta þess, að þetta umfang er sambærilegt við viðnámsmynd af Kröflukerfinu á samsvarandi dýpi. Hvort afkastageta þessa svæðis er í samræmi við afkastageta Kröflukerfisins verður fyrst ákarað að loknum rannsóknarborunum til athugunar á hitaástandi og þrýstingi í jarðhitakerfinu.

Lágt viðnám suð-vestan við jarðhitakerfið bendir til afrennslis til suð-vesturs í sprungustefnu. Ekki er því ólíklegt að finna megi heitt vatn, sem nýta mætti til húshitunar í sprungum við Syðri Hágöngu.

7. LOKAORÐ

Áður en vatni var hleypt í lón Hágöngumiðlunar var gerð frumrannsókn á háhitasvæðinu í Köldukvíslarbotnum, en meginhluti þess er nú undir vatni.

- Jarðhiti á yfirborði var kortlagður í mælikvarðanum 1:500 með GPS-staðsetningar-tækni (Guðmundur Ómar Friðleifsson og Skúli Víkingsson, 1997).
- Tekin voru gassýni til ákvörðunar á hitastigi í jarðhitakerfinu (Guðmundur Ómar Friðleifsson ofl., 1996).
- Viðnámsmælingum (TEM) var beitt til að kanna stærð jarðhitakerfisins (þessi skýrsla)

Þessi frumrannsókn sýnir að undir lóni Hágöngumiðlunar leynist **viðáttumikið háhitakerfi, að umfangi á stærð við Kröflukerfið**. Öll ummerki um jarðhita á yfirborði eru nú undir vatni nema blettur í Sveðjuhrauni vestanverðu. Gashitamælar benda til þess að hitinn í jarðhitakerfinu sé **290-300°C**. Samkvæmt viðnámsmælingunum má gera ráð fyrir að 200-250 metrar séu á 240°C hita undir vesturenda Sveðjuhrauns.

Ef til kæmi framhald rannsókna á háhitasvæðinu er næsta skref að bora rannsóknarholu til að kanna hitaástand jarðhitakerfisins. Henni yrði valinn staður norð-vestan við jarðhitann í Sveðjuhrauni ofan í hátopp jarðhitakerfisins.

8. HEIMILDASKRÁ

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.

Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson og Jón Örn Bjarnason, 1996: *Jarðhiti í Köldukvíslarbotnum*. Orkustofnun, OS-96014/JHD-04, 32 s.

Guðmundur Ómar Friðleifsson og Skúli Víkingsson, 1997: *HÁGÖNGUMIÐLUN, Kortlagning jarðhita í Köldukvíslarbotnum*. Orkustofnun OS-97061, 19 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 ElectroMagnatic Soundings in Geothermal and Ground Water Exploration, A Step Forward*. Geothermal Resource Council TRANSACTIONS, Vol. 14, Part II: 845-851.

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.

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, 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.

VIÐAUKI 1

Túlkun viðnámsmælinga og viðnámsferlar

Almennt

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.

Þær reyndust mun ódýrari og fljótlegrí 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 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, 1995). 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 einvíðri 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 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 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.

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 lokalíkan, sem gefur reiknaðan sýndarviðnámsferil sem fellur að þeim mælda og hefur fæst viðnámslög.

Að lokinni frumtúlkun mælinganna eru teiknuð viðnámssnið 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 láréttu stefnu. Tvívíð túlkun er mun tímafrekari 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 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.

