

Kerlingarfjöll

TEM- og MT-mælingar 2008



Ragna Karlsdóttir
Hjálmar Eysteinnsson
Arnar Már Vilhjálmsson

Unnið fyrir Orkustofnun

ÍSOR-2010/001

ÍSLENSKAR ORKURANNSÓKNIR

Reykjavík: Orkuáæður, Grensásvegi 9, 108 Rvk. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1699
Akureyri: Rangárvöllum, P.O. Box 30, 602 Ak. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1599
isor@isor.is – www.isor.is



Kerlingarfjöll

TEM- og MT-mælingar 2008

Ragna Karlsdóttir
Hjálmar Eysteinnsson
Arnar Már Vilhjálmsson

Unnið fyrir Orkustofnun

ÍSOR 2010/001

Desember 2010

Myndin á kápu skýrslunnar er tekin í Efri-Hveradölum (ljósm. Ragna Karlsdóttir).

Skýrsla nr. ÍSOR-2010/001	Dags. Desember 2010	Dreifing <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill Kerlingarfjöll TEM- og MT-mælingar 2008	Upplag 7	Fjöldi síðna 87
	Verkefnisstjóri Ragna Karlsdóttir	
Höfundar Ragna Karlsdóttir, Hjálmar Eysteinnsson og Arnar Már Vilhjálmsson	Verknúmer 540116	
Unnið fyrir Orkustofnun		
Samvinnuaðilar		
Útdráttur <p>Sumarið 2004 hófst rannsókn á viðnámi í jörðu í Kerlingarfjöllum með TEM-mælingum og var henni haldið áfram veturinn 2005. Í þessum áföngum náðist að þekja svæðið norðan við Kerlingarfjöll og allt að Neðri-Hveradölum og Keis til suðurs. Sumarið 2008 var verkefninu haldið áfram og reynt að þekja það stórt svæði að líklegt væri að það næðist að afmarka stærð þess. Auk TEM-mælinganna var bætt við nokkrum MT-mælingum sem skynja viðnám niður á meira dýpi en TEM-mælingarnar.</p> <p>Niðurstöðurnar sýna samskonar viðnámsgerð og er í háhitakerfum á Íslandi og einkennist af lágviðnámskápu yfir háhitakerfinu og undirliggjandi háviðnámskjarna sem endurspeglar háhitakerfið. MT-mælingarnar, sem aðeins mynda eitt norður-suður snið, sýna að undir Kerlingarfjöllum er djúpstætt lágviðnámslag á 10–15 km dýpi. Miðað við hefðbundnar aðferðir við að meta stærð háhitakerfis, þ.e. flatarmál háviðnámskjarnans á 800–1000 m dýpi, er stærð jarðhitakerfisins í Kerlingarfjöllum nálægt 30 km².</p>		
Lykilorð Háhitakerfi, lágviðnámskápa, háviðnámskjarni, djúpstætt lágviðnám, afrennsli	ISBN-númer	Undirskrift verkefnisstjóra 
	Yfirfarið af ÓGF, RK	

Efnisyfirlit

1	Inngangur.....	7
2	Jarðhitinn í Kerlingarfjöllum.....	7
3	Viðnám í bergi.....	9
4	TEM- og MT-mælingar 2008.....	9
5	TEM-mælingar	12
5.1	Viðnámskort	12
5.2	Viðnámsnið	20
6	MT-mælingar.....	34
6.1	Framkvæmd MT-mælinga.....	34
6.2	MT-mælingar og túlkun þeirra	34
6.3	Viðnámsnið MT-mælinganna.....	41
6.4	Athugasemdir varðandi samtúlkun MT- og TEM-mælinga	43
7	Samandregnar niðurstöður	44
8	Heimildir.....	45
	Viðauki Mæliferlar og túlkun þeirra	46
	TEM	47
	MT-1	60
	MT-2	64
	MT-3 Samtúlkun MT- og TEM-gagna	74

Myndir

Mynd 1.	<i>Neðri-Hveradalir</i>	7
Mynd 2.	<i>Helstu nöfn og kennileiti í Kerlingarfjöllum.....</i>	8
Mynd 3.	<i>Mælingar í Kerlingarfjöllum.....</i>	10
Mynd 4.	<i>Staðsetning TEM- og MT-mælinga.....</i>	11
Mynd 5.	<i>Viðnám í 1100 m y.s.....</i>	13
Mynd 6.	<i>Viðnám í 1000 m y.s.....</i>	14
Mynd 7.	<i>Viðnám í 950 m y.s.....</i>	14
Mynd 8.	<i>Viðnám í 900 m y.s.....</i>	15
Mynd 9.	<i>Viðnám í 850 m y.s.....</i>	15
Mynd 10.	<i>Viðnám í 800 m y.s.....</i>	16
Mynd 11.	<i>Viðnám í 750 m y.s.....</i>	16
Mynd 12.	<i>Viðnám í 700 m y.s.....</i>	17
Mynd 13.	<i>Viðnám í 600 m y.s.....</i>	17
Mynd 14.	<i>Viðnám í 500 m y.s.....</i>	18

Mynd 15. Viðnám í 400 m y.s....	18
Mynd 16. Viðnám í 300 m y.s....	19
Mynd 17. Viðnám í 200 m y.s....	19
Mynd 18. Lega viðnámssniða.....	20
Mynd 19. Viðnámssnið AV750.....	23
Mynd 20. Viðnámssnið AV740.....	23
Mynd 21. Viðnámssnið AV730.....	24
Mynd 22. Viðnámssnið AV720.....	24
Mynd 23. Viðnámssnið AV710.....	25
Mynd 24. Viðnámssnið AV700.....	25
Mynd 25. Viðnámssnið AV690.....	26
Mynd 26. Viðnámssnið AV680.....	26
Mynd 27. Viðnámssnið AV670.....	27
Mynd 28. Viðnámssnið AV660.....	27
Mynd 29. Viðnámssnið AV630.....	28
Mynd 30. Viðnámssnið NS576.....	28
Mynd 31. Viðnámssnið NS579.....	29
Mynd 32. Viðnámssnið NS580.....	29
Mynd 33. Viðnámssnið NS581.....	30
Mynd 34. Viðnámssnið NS582.....	30
Mynd 35. Viðnámssnið NS583.....	31
Mynd 36. Viðnámssnið NS584.....	31
Mynd 37. Viðnámssnið NS586.....	32
Mynd 38. Viðnámssnið NS587.....	32
Mynd 39. Viðnámssnið NS589.....	33
Mynd 40. Viðnámssnið NS590.....	33
Mynd 41. Sýndarviðnám og fasi fyrir mælistöðvar 006 og 009.	35
Mynd 42. Höfuðásstefna mælinga 006 og 009.....	36
Mynd 43. Raffræðileg strikstefna út frá lóðréttu þætti segulsviðsins.	37
Mynd 44. Raffræðileg strikstefna ákvörðuð út frá impedansinum með hliðsjón af stefnunni á kvarðaðri út frá stefnunni á mynd 43.	37
Mynd 45. Spanörvar fyrir allar mælistöðvar - lóðréttur þáttur segulsviðs mældur	38
Mynd 46. Spanörvar fyrri sveiflutíma 0,1 sek.	39
Mynd 47. Túlkun mælingar 006.....	40
Mynd 48. Óháð túlkun TEM- og MT-gagnanna.	41
Mynd 49. Samsett viðnámssnið úr einvíðum túlkunum mælinganna á SN-línunni þvert yfir Kerlingarfjöllin.....	42

1 Inngangur

Sumarið 2004 hófst rannsókn á viðnámi í jörðu í Kerlingarfjölum og var haldið áfram veturinn 2005. Beitt var svonefndum TEM-mælingum (Transient Electric Magnetic). Í þessum áföngum náðist að þekja svæðið norðan við Kerlingarfjöll og allt að Neðri-Hveradölum og Keis til suðurs. Niðurstöður þeirra mælinga, sem voru 71 talsins, voru birtar í skýrslu ÍSOR (Ragna Karlsdóttir og Arnar Már Vilhjálmsson, 2006). Sumarið 2008 var verkefninu haldið áfram og reynt að þekja það stórt svæði að líklegt væri að það næðist að afmarka stærð þess. Auk TEM-mælinganna var bætt við nokkrum MT-mælingum (Magneto Telluric) sem skynja viðnám niður á meira dýpi en hinar. Ragna Karlsdóttir og Arnar Már Vilhjálmsson unnu að úrvinnslu TEM-mælinganna frá 2006, Ragna sá um úrvinnslu TEM-mælinganna 2008 og Hjálmar Eysteinnsson sá um úrvinnslu MT-mælinganna.

Viðnámsmælingum er beitt til þess að afmarka stærð háhitakerfa í efstu 1000 m undir yfirborði. Rannsóknin var gerð að tilhlutan Orkustofnunar. Jarðfræðileg könnun og kortlagning jarðhitasvæðisins var gerð að undirlagi Orkustofnunar sumarið 2004, svo og athugun á efnainnihaldi vatnsins. Niðurstöður þeirrar rannsóknar eru birtar í skýrslu ÍSOR (Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005).

2 Jarðhitinn í Kerlingarfjölum

Í fyrrgreindri skýrslu ÍSOR (Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005) er ágæt samantekt um fyrri rannsóknir í Kerlingarfjölum. Þar segir að samkvæmt hefð sé yfirborðs-jarðhitnum skipt í þrjú svæði: Neðri-Hveradali, Efri-Hveradali og Hverabotn. Þar að auki er vitað um allstórt svæði suðaustan til í Kerlingarfjölum, kennt við Kisubotna og Bríkargil, þar sem mikið er um jarðhitaummyndun.



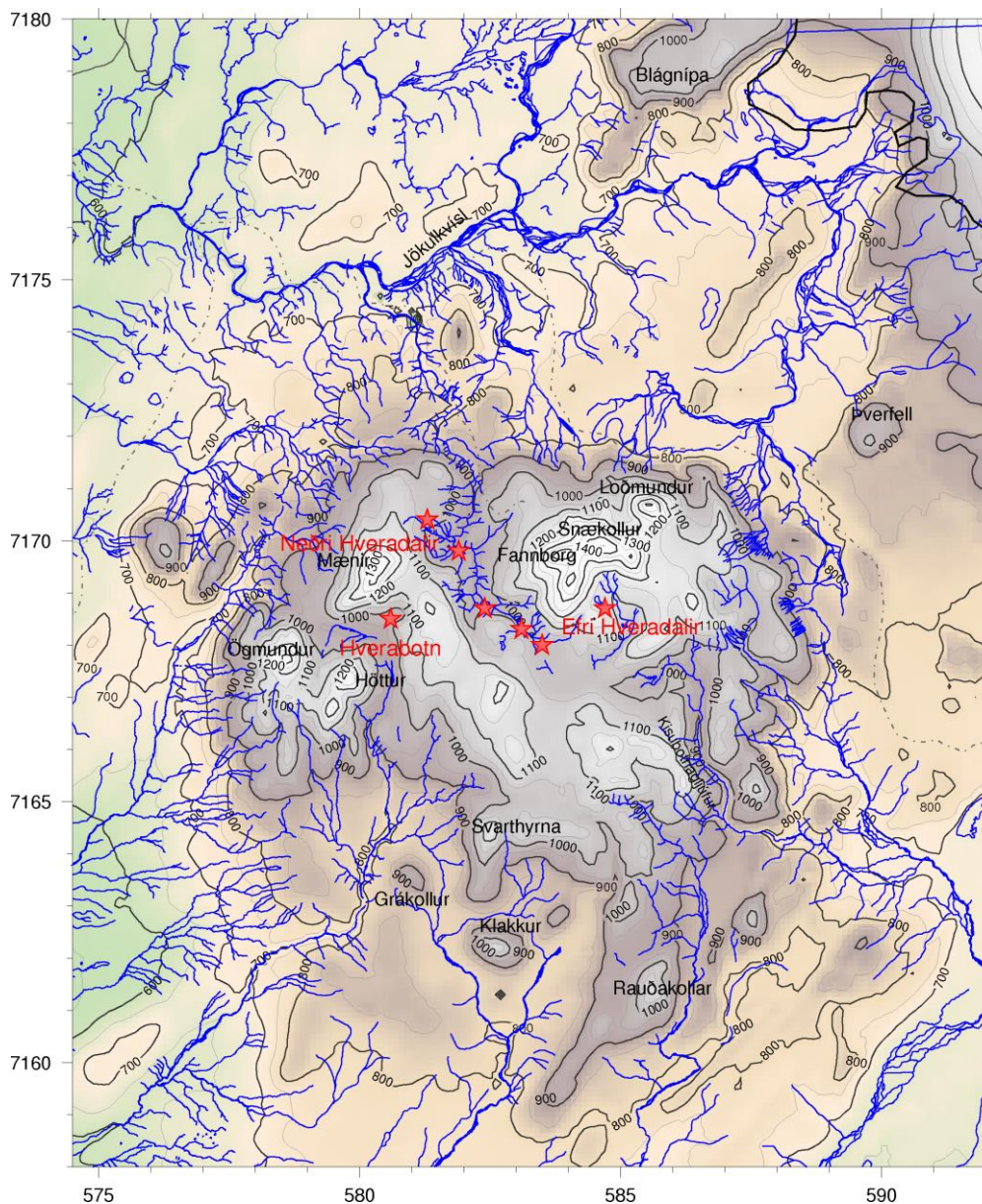
Mynd 1. Neðri-Hveradalir. (Ljós. Ragna Karlsdóttir.)

Neðri-Hveradalir greinast í Vesturdali, Miðdali (Fannardal) og Austurdali. Svæðið er allt sundurskorið af djúpum giljum (dölum). Gufu- og leirhverir eru áberandi með litlu sem engu frárennsli vatns. Hverirnir eru í 900–1040 m hæð y.s.

Efri-Hveradalir skilja sig frá þeim neðri með dálitlum líparíthálsi sem gengur suður úr Hverahnúk. Svæðið er suður af Snækolli. Hverirnir eru í 1020–1150 m hæð y.s. og eru þarna þeir hverir er hæst liggja í Kerlingarfjöllum.

Hverabotn er lítið svæði suðaustan í Mæni við öskjubrotið. Þarna eru margir og mjög kraftmiklir hverir og liggja þeir í 950–1000 m hæð y.s. (sjá mynd 2).

Svæðin í suðausturhluta Kerlingarfjalla, sem kennd eru við Kisubotna og Bríkargil, hafa ekki verið könnuð (Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005).



Mynd 2. Helstu nöfn og kennileiti í Kerlingarfjöllum. Helstu jarðhitastaðir eru merktir með rauðu.

3 Viðnám í bergi

Helstu áhrifavaldar í viðnámi bergs eru vökvainihald bergsins, selta og hiti vökvans, svo og ummyndun bergsins. Í stuttu máli er því háttað þannig að vatnsmettað berg leiðir rafstraum betur en þurrt berg og rafleiðnin eykst með hækkandi hita. Heit vatnskerfi skera sig úr umhverfinu vegna þess að rafleiðni (viðnám) tiltekinn leirsteinda (lag-silikata eins og smektít) á sprunguflötum bergsins er mjög hitaháð. Rafleiðni bergsins er óverulega háð seltu vökvans í berginu nema hún sé mjög há og nálgist seltu sjávar (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 2005).

TEM-viðnámsmælingar sýna vel ummyndun bergs í háhitakerfum, einkum í ferskvatnskerfum, niður á um 1 km dýpi í kerfinu. Hefðbundin viðnámsmynd af háhitakerfi sýnir lágviðnámskápu umlykja háviðnámskjarna í miðju jarðhitakerfisins. Viðnámsmælingarnar endurspeglar ummyndun bergsins við hita og er hún stærsti áhrifavaldur í viðnámsmynd háhitakerfa. Við hitastig frá um það bil 100°C að 200°C eru zeólítar og smektít ráðandi steindir. Smektít er leirsteind sem hefur þann eiginleika að leiða rafmagn vel og leiðnin vex hratt með hita. Þetta er ástæða góðrar leiðni og þar með lágs viðnáms í lágviðnámskápunni. Þegar hitastig hækkar upp fyrir 200°C hverfur smektít og klórít verður ráðandi þegar komið er upp fyrir 230°C. Klórít er hins vegar ekki jafnvel leiðandi og smektít og veldur því að viðnámið hækkar fyrir ofan 240°C (Knútur Árnason o.fl., 2000). Viðnámið endurspeglar þannig hitaummyndun bergsins og segir til um hæsta hita sem ríkir eða ríkt hefur í kerfinu. Viðnámsmælingarnar sjá ummyndunina en geta hins vegar ekki sagt til um hvort kólnun hefur orðið í kerfinu eftir að ummyndunin myndaðist.

4 TEM- og MT-mælingar 2008

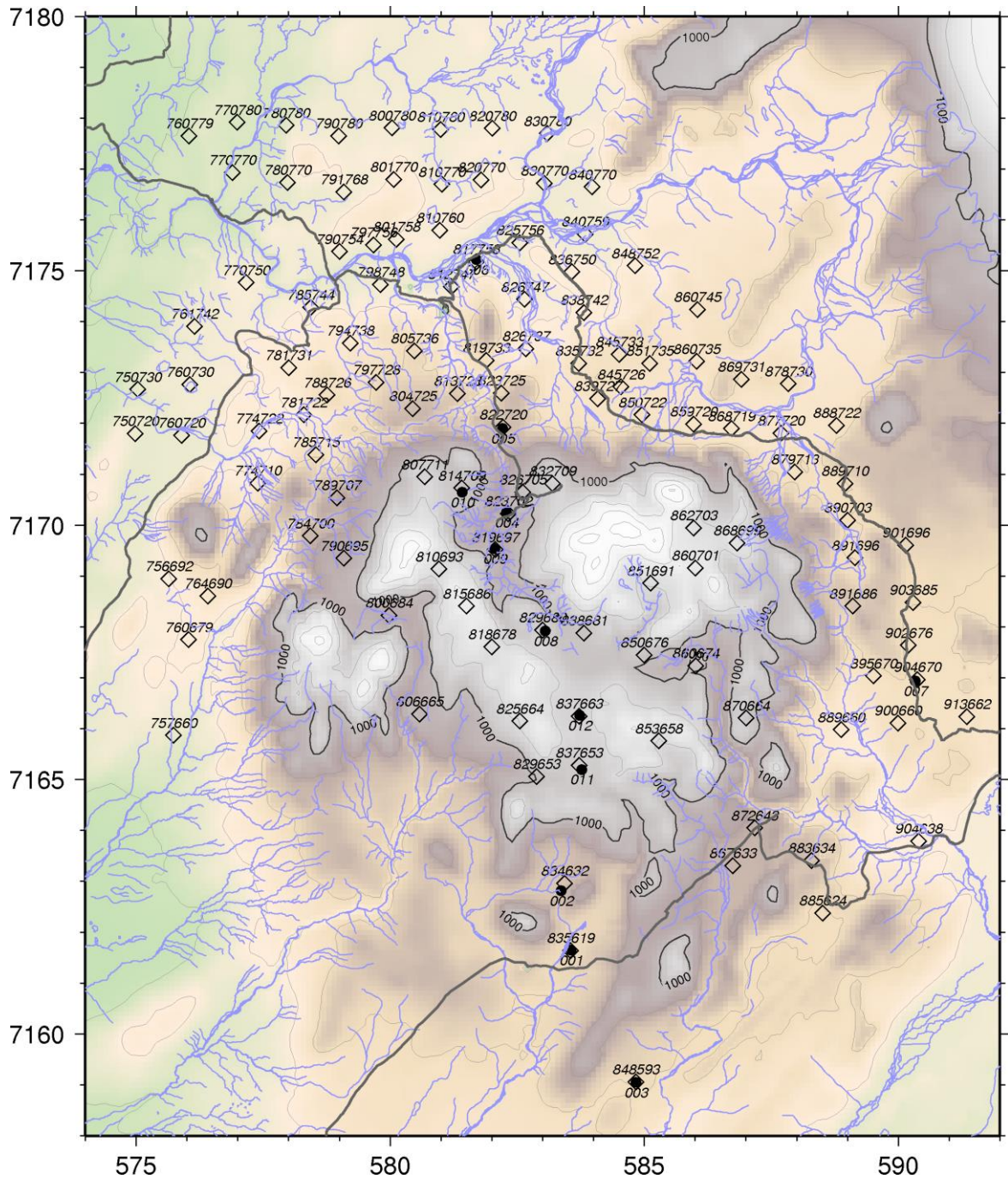
Eins og sagt var áður var mælt, í fyrsta áfanga, við og í nágrenni Neðri-Hveradala eins og við var komið, svo og svæðið norður af Kerlingarfjöllum. Kerlingarfjöllin sjálf eru mjög erfitt svæði til mælinga þar sem þau eru sundurskorin af djúpum giljum og dölum, ekki síst vegna jarðhitans. Ógerlegt var að komast að mörgum áhugaverðum stöðum, jafnvel á snjósleða. Sumarið 2008 var mælt austan og sunnan við fjöllin og notuð sexhjól til að koma tækjum við. Við mælingar á sjálfu hálendi Kerlingarfjalla var notuð þyrlla til að koma tækjum og mannskap að við mælingarnar. Alls urðu TEM-mælingarnar 46 að þessu sinni, sem gerir alls 117 mælingar í Kerlingarfjöllum. Sniði MT-mælinga með 12 mælingum var einnig bætt við sumarið 2008.



Mynd 3. Mælingar í Kerlingarfjöllum. Tækin flutt með hjálp þyrilu. (Ljósmynd. Hjálmar Eysteinnsson.)

Mælingarnar eru túlkaðar og settar fram með forritum sem hönnuð eru af sérfræðingum hjá ÍSOR, þeim Knúti Árnasyni og Hjálvari Eysteinessyni. Hver viðnámsmæling er túlkuð einvítt með marglaga líkani (occam inversion) þar sem forritið gerir ráð fyrir mörgum (20–40) láréttum lögum undir mælistað og velur viðnám í þau til að svara mæliferli. Mælingarnar eru síðan bornar saman og settar fram sem heildstæð mynd. Niðurstöður TEM-mælinganna eru sýndar í viðnámssniðum í gegnum mælisvæðið svo og á jafnviðnámskortum sem sýna viðnám í láréttum fleti með 100 m millibili allt niður á 800–1000 m dýpi. Niðurstöður MT-mælinganna eru sýndar sem viðnámssnið niður á annars vegar 3 km og hins vegar 40 km dýpi.

Mæliferlar og túlkun þeirra er birt í viðauka.



Mynd 4. Staðsetning TEM- (tíglar) og MT- (fylltir hringir) mælinga. Hæðarlínur eru sýndar á 100 m millibili og vegir/slóðar með breiðum, gráum ferlum. Ásar eru UTM-hnit í km.

5 TEM-mælingar

Venja er að setja niðurstöður TEM-viðnámsmælinganna fram sem annars vegar viðnámskort og hins vegar viðnámsnið.

5.1 Viðnámskort

Viðnámskort af svæðinu eru sýnd sem jafnviðnám, þ.e. viðnám á föstu dýpi. Þetta er sýnt á mörgum kortum með ákveðnu dýptarbili allt niður á um 1 km dýpi undir yfirborði. Land í Efri-Hveradölum nær upp í 1100–1200 m yfir sjó og eru kortin sýnd með 50–100 m millibili eftir þörfum til þess að sjá sem best lögun á toppi háhitakerfisins.

Viðnám í 1100 m y.s. (mynd 5) nær aðeins yfir svæðið rétt suður og vestur af Snækolli og Fannborg og mælingarnar sýna hátt viðnám í yfirborði. Á næsta korti (mynd 6), sem er 50 m neðar, sést í hæstu toppa jarðhitakerfisins þar sem grillir í lágviðnámskápuna sunnan við Snækoll annars vegar og suðvestan við Fannborg hins vegar.

Á kortinu **viðnám í 950 m y.s.** (mynd 7) tengist lágviðnámskápan og aðeins sést í háviðnámskjarnann í mælingunni sunnan við Snækoll. Þessi tenging er ákveðnari 50 m neðar (mynd 8). **Viðnám í 850 m y.s.** (mynd 9) sýnir svo verulega stækkun háviðnámskjarnans, sem hér nær yfir hátopp Kerlingarfjalla, og er mjög greinilegur undir Efri- og Neðri-Hveradölum.

Lítill breyting er svo á næstu viðnámskortum, sem sýna **viðnám í 800 og 750 m y.s.** (myndir 10 og 11), en á mynd 12, sem sýnir **viðnám í 700 m y.s.**, stækkar háviðnámskjarninn til vesturs og suðvesturs. Hann er þó ekki kominn í ljós undir Hverabotni. Á þessu dýpi sést líkt og vik inn í háviðnámskjarnann suð-suðvestur af Fannborg. Þetta sést á næstu kortum og raunar eins djúpt og mælingarnar skynja. Mælingin sem veldur þessu, 829680, ber öll merki jaðars, þ.e. hún sýnir lágviðnámskápuna niður á 800–1000 m dýpi. Þessi mæling er á milli svæðanna sem kennd eru við annars vegar Efri-Hveradali og hins vegar Neðri-Hveradali og gæti bent til einhverskonar skila á milli svæðanna.

Á mynd 13, sem sýnir **viðnám í 600 m y.s.**, stækkar háviðnámskjarninn enn til vesturs og umlykur hátopp fjallanna ofan 1000–1100 m hæðarlínu. Hér sést í háviðnámskjarna undir Hverabotni. Á þessu dýpi er athyglisvert að lágt viðnám teygir sig til norðausturs í átt að Þverfelli. 100 m neðar, á kortinu sem sýnir **viðnám í 500 m y.s.** (mynd 14), teygir lágviðnámið sig enn lengra í átt að Þverfelli og hér sést í topp á háviðnámskjarna um það bil mitt á milli Loðmundar og Þverfells.

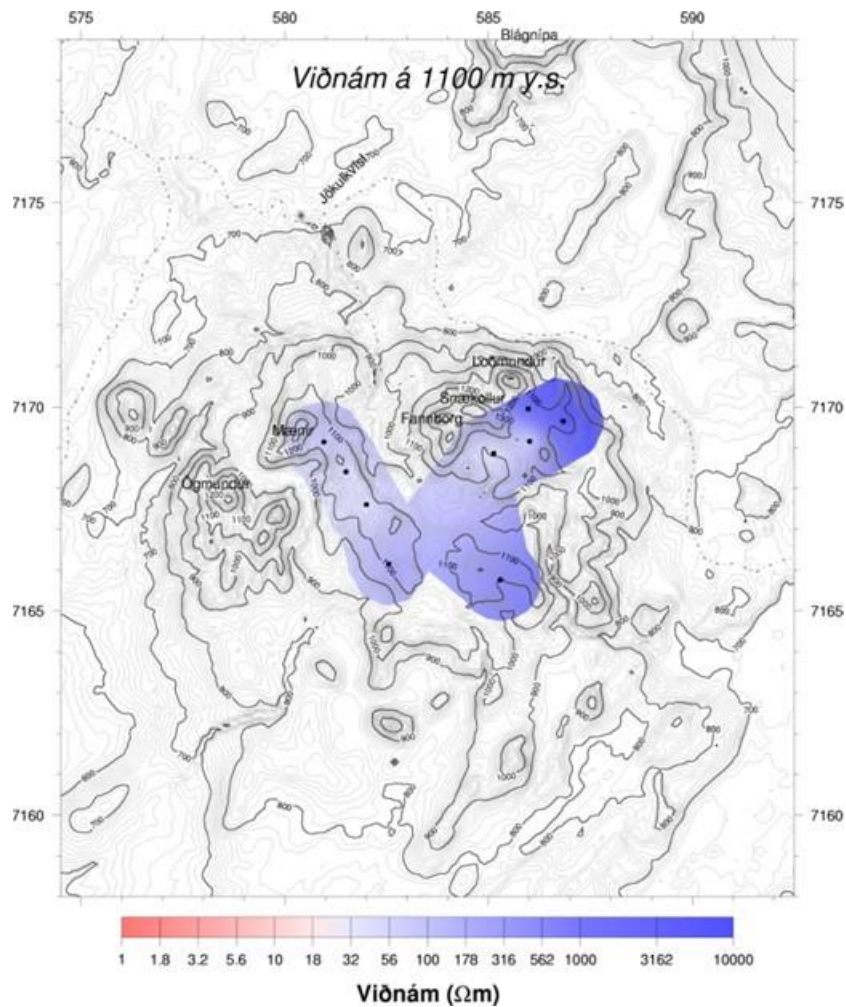
Á kortunum sem sýna **viðnám í 400, 300 og 200 m y.s.** (myndir 15, 16 og 17) eru helstar þær breytingar að svæðið til norðausturs að Þverfelli stækkar og háviðnámskjarninn þar sameinast kjarnanum undir Kerlingarfjöllum.

Á síðasta kortinu (mynd 17), sem sýnir **viðnám í 200 m y.s.**, sést viðnám á um 800–900 m dýpi í sjálfu jarðhitakerfinu undir Kerlingarfjöllum og í um 600 m undir yfirborði lands umhverfis fjöllin. Í Kerlingarfjöllum nær háviðnámskjarninn hæst undir Efri-Hveradölum í tæplega 1000 m hæð y.s. en undir Neðri-Hveradölum er háviðnámskjarninn um það bil 100 m lægri. Á milli þessara toppa er eins og vik eða lágviðnám. Þetta leiðir getum að því að kerfin séu aðskilin að einhverju leyti þannig að eitt kerfi sé undir Neðri-Hveradölum og Hverabotni og annað undir Efri-Hveradölum. Sá hluti háviðnámskjarnans

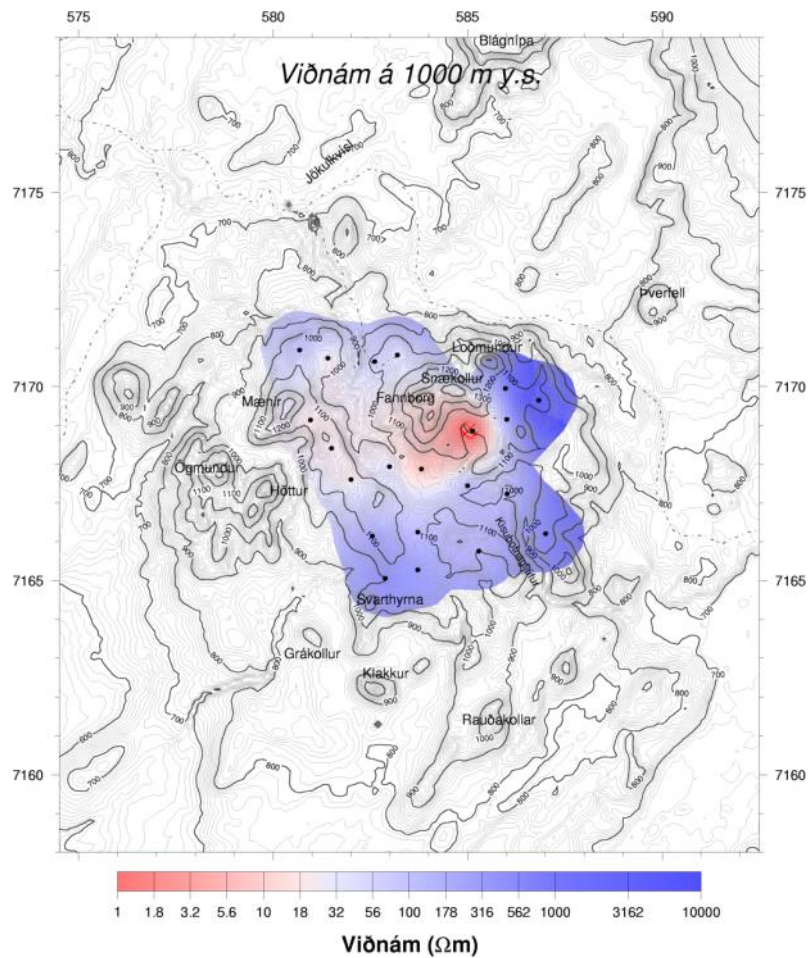
sem teygir sig til norðausturs í átt að Þverfelli nær upp í um 500 m y.s. Engin merki eru um jarðhitavirkni á yfirborði þarna og því erfitt að segja til um hvort þarna sé heitt kerfi eða köld, gömul ummyndun eftir hita sem einu sinni var.

Í Hofsjökli er megineldstöð og vísast að henni fylgi jarðhitakerfi. Þverfellssvæðið gæti verið tenging yfir í jarðhitakerfi í Hofsjökli en víða má sjá jarðhitaummerki í jöðrum Hofsjökuls.

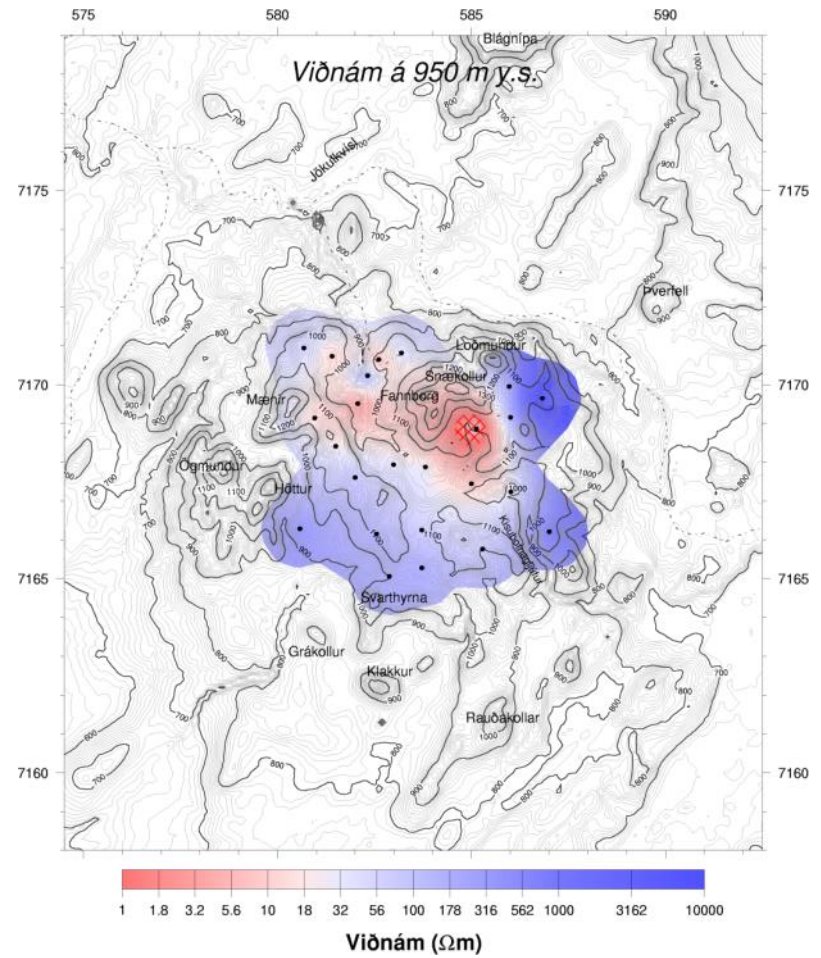
Gjarnan er talað um „stærð“ jarðhitakerfa og er þá miðað við það flatarmál sem umlykur háviðnámskjarnann á 800–1000 m dýpi í kerfinu. Sé slegið á slíkt mat fyrir Kerlingarfjöll þykir rétt að undanskilja svæðið í átt að Þverfelli og kemur þá út að stærðin sé nálægt 30 m².



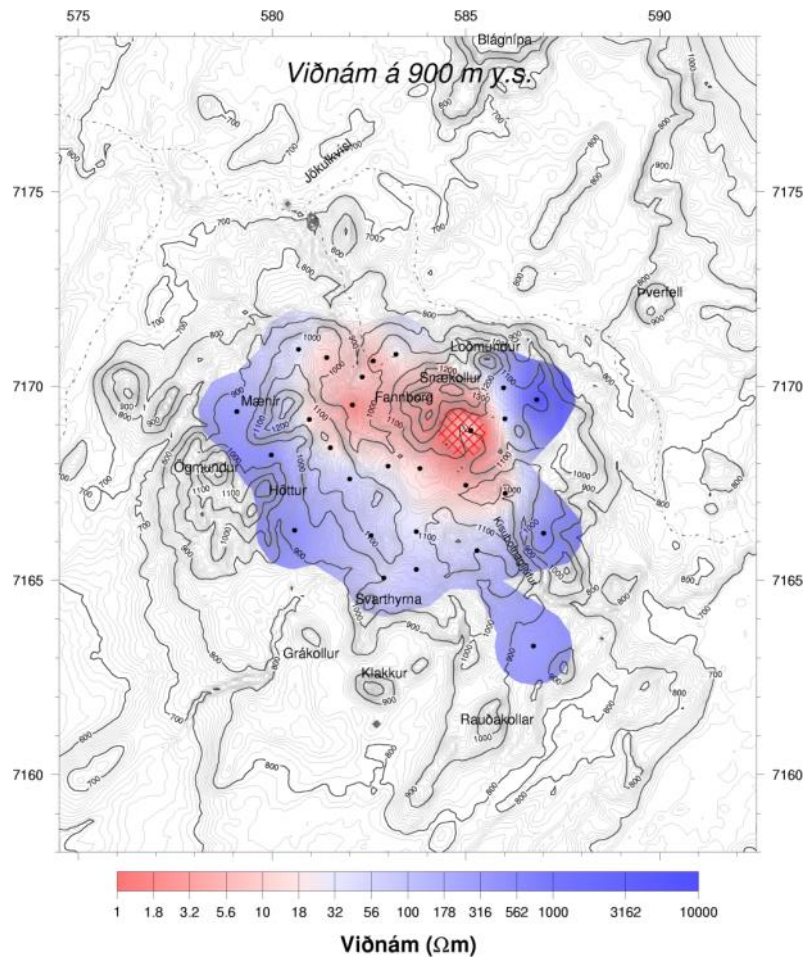
Mynd 5. Viðnám í 1100 m y.s.



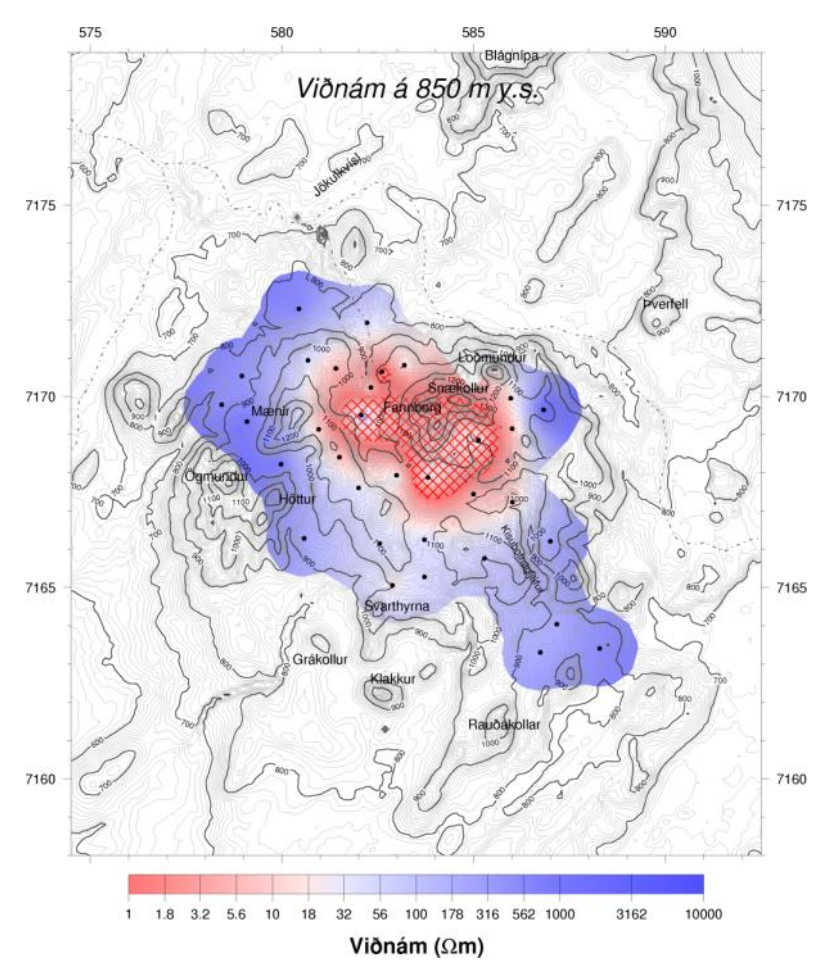
Mynd 6. Viðnám í 1000 m y.s.



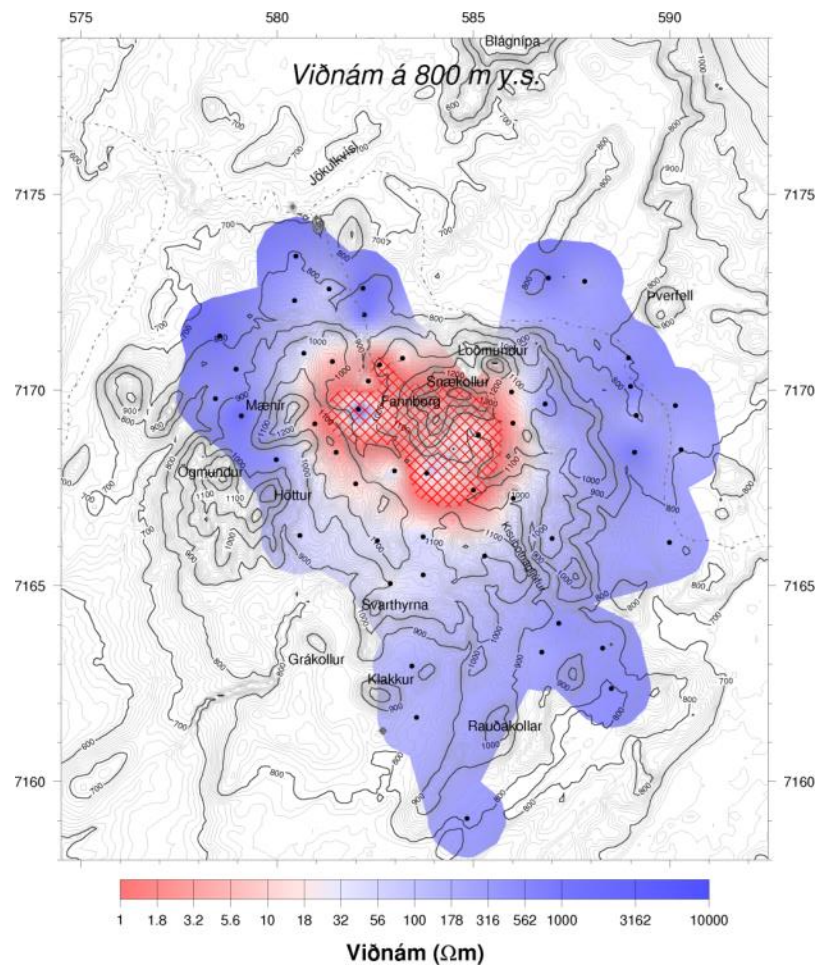
Mynd 7. Viðnám í 950 m y.s.



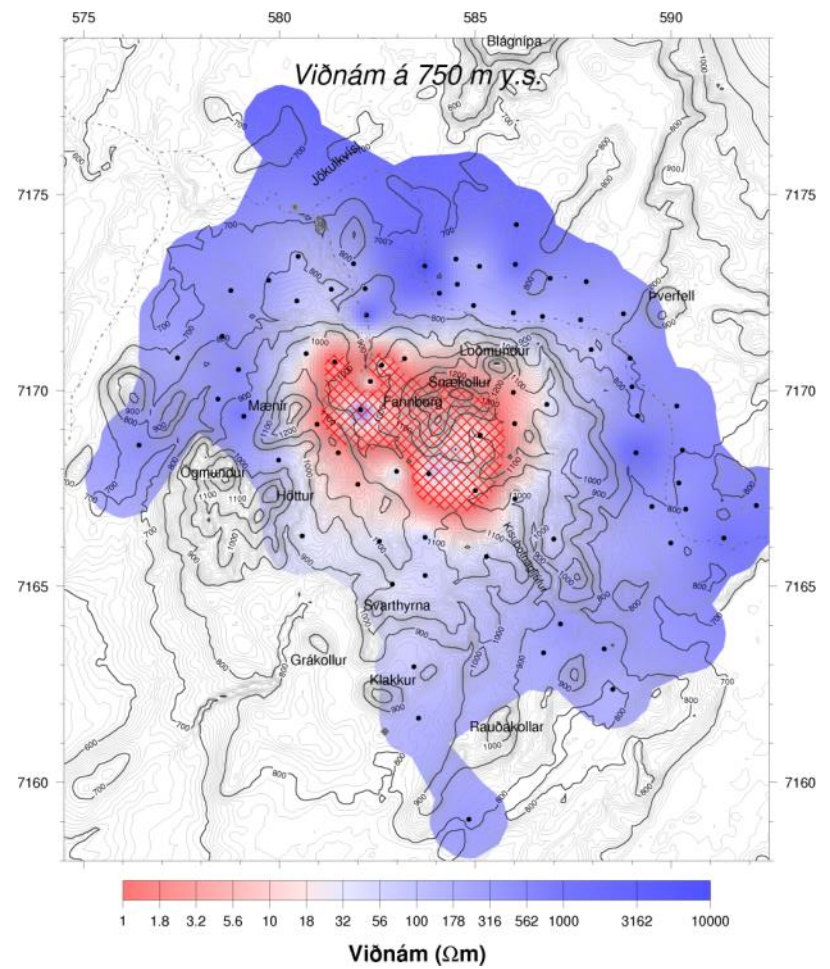
Mynd 8. Viðnám í 900 m y.s.



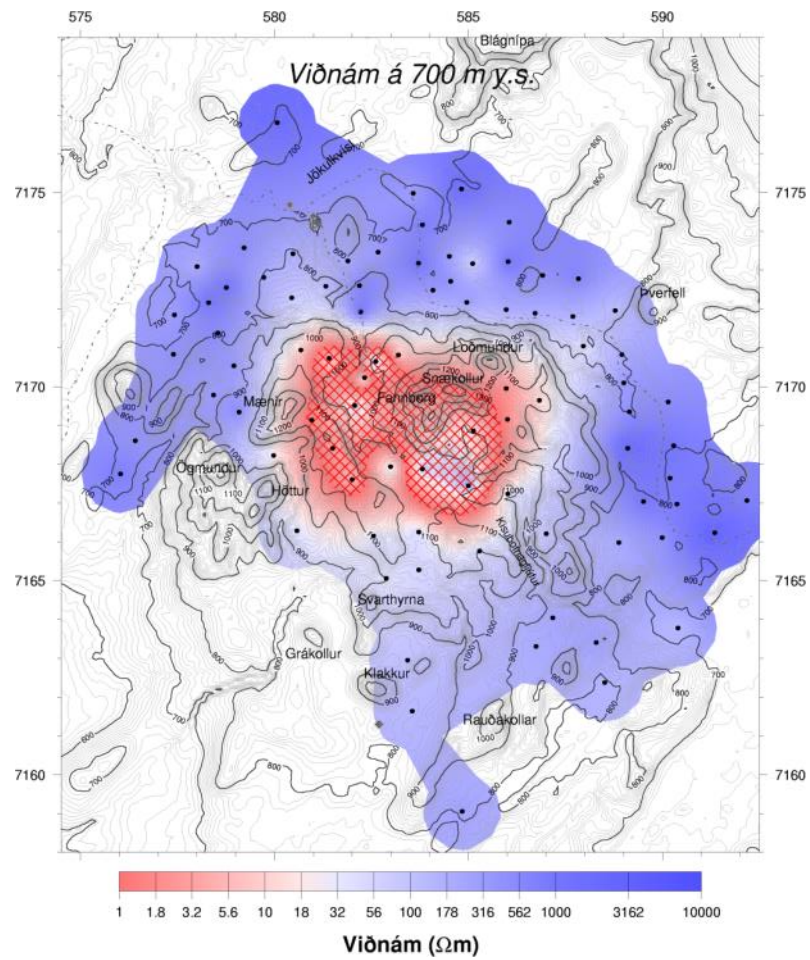
Mynd 9. Viðnám í 850 m y.s.



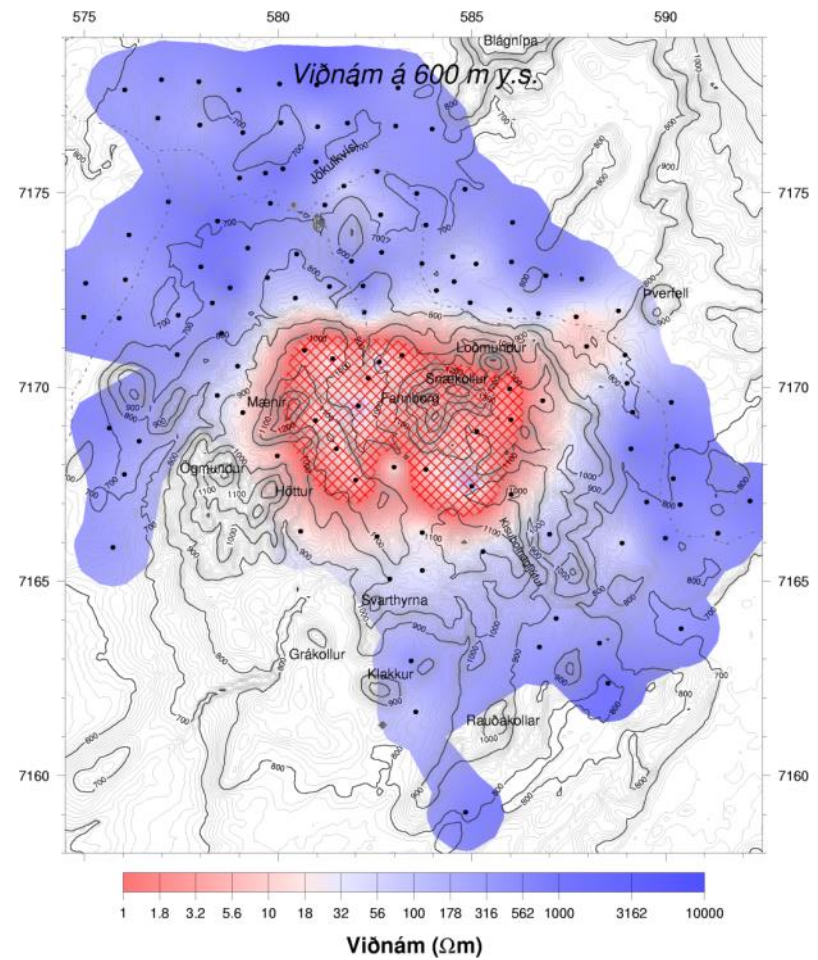
Mynd 10. Viðnám í 800 m y.s.



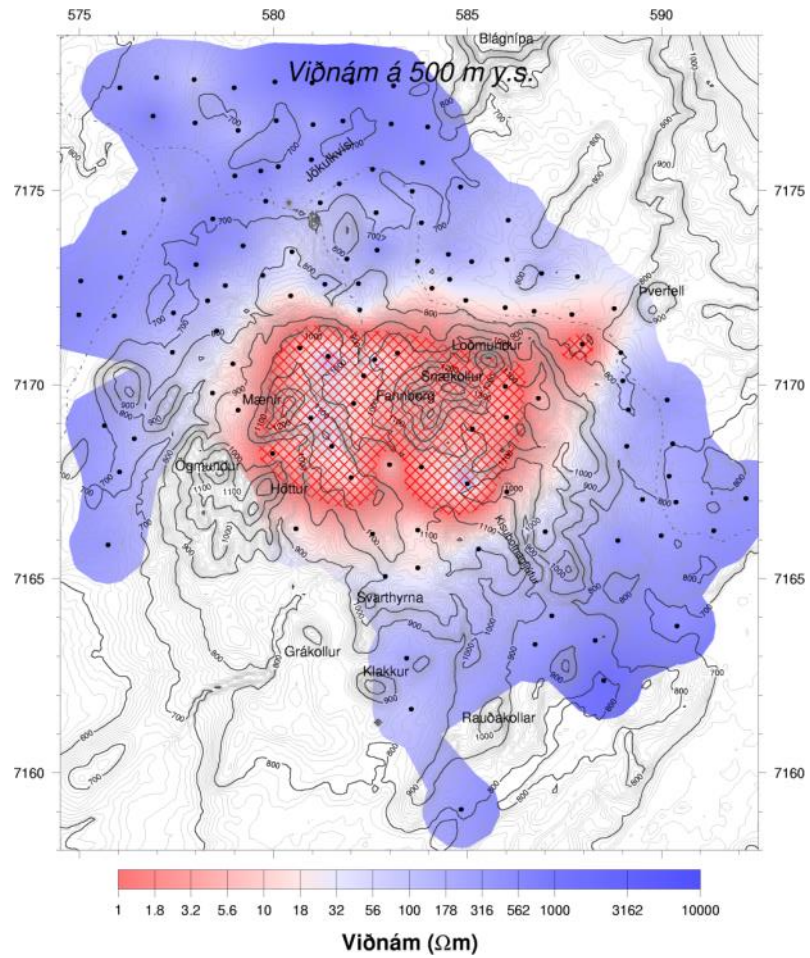
Mynd 11. Viðnám í 750 m y.s.



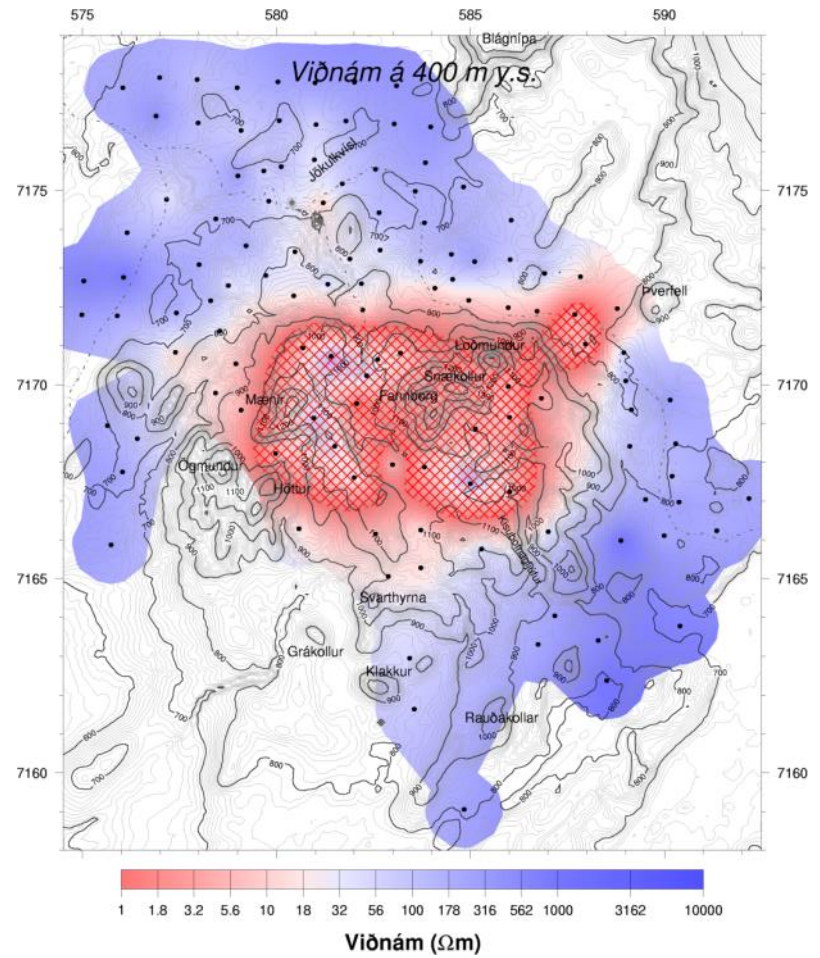
Mynd 12. Viðnám í 700 m y.s.



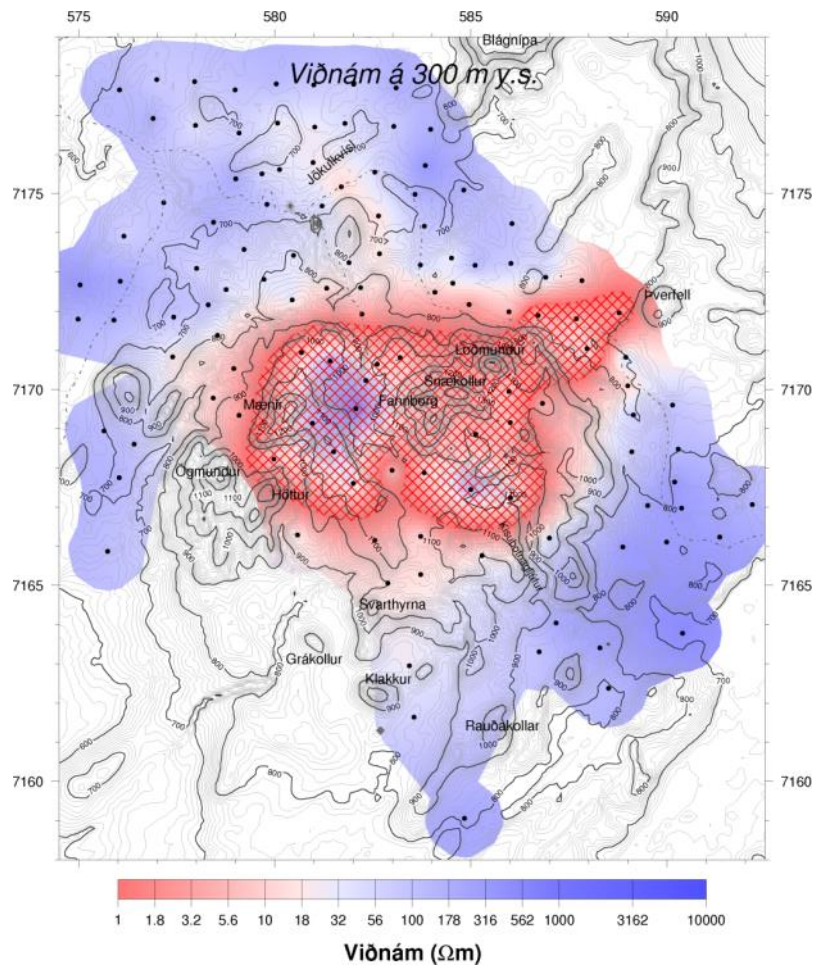
Mynd 13. Viðnám í 600 m y.s.



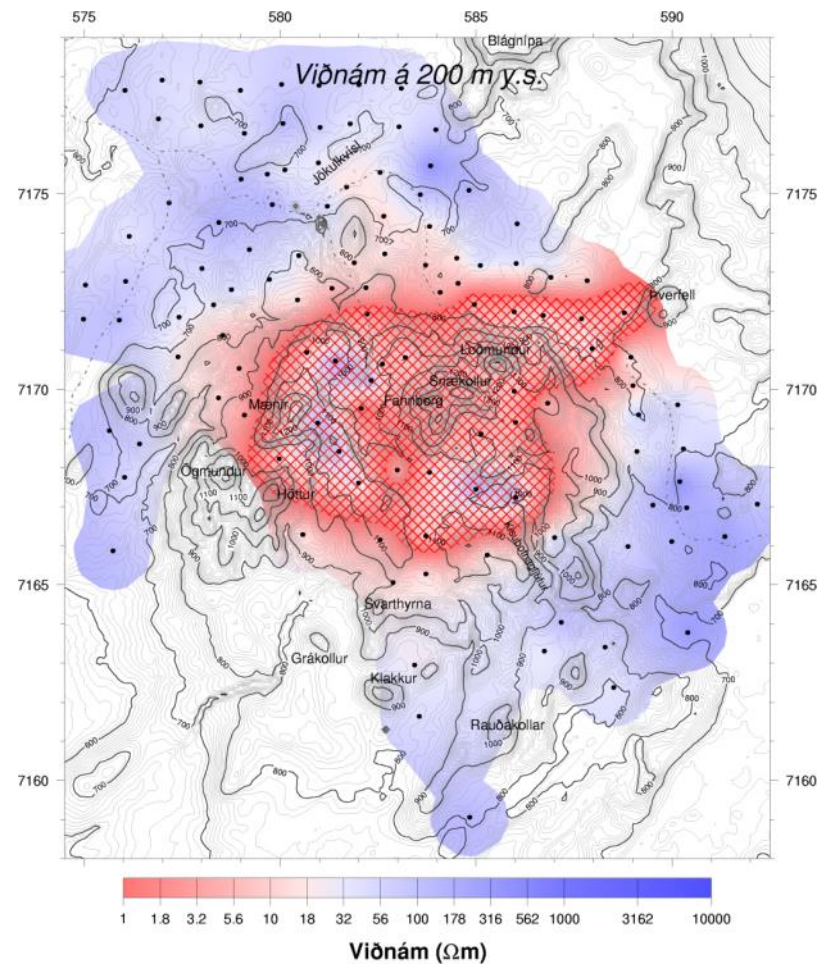
Mynd 14. Viðnám í 500 m y.s.



Mynd 15. Viðnám í 400 m y.s.



Mynd 16. Viðnám í 300 m y.s.

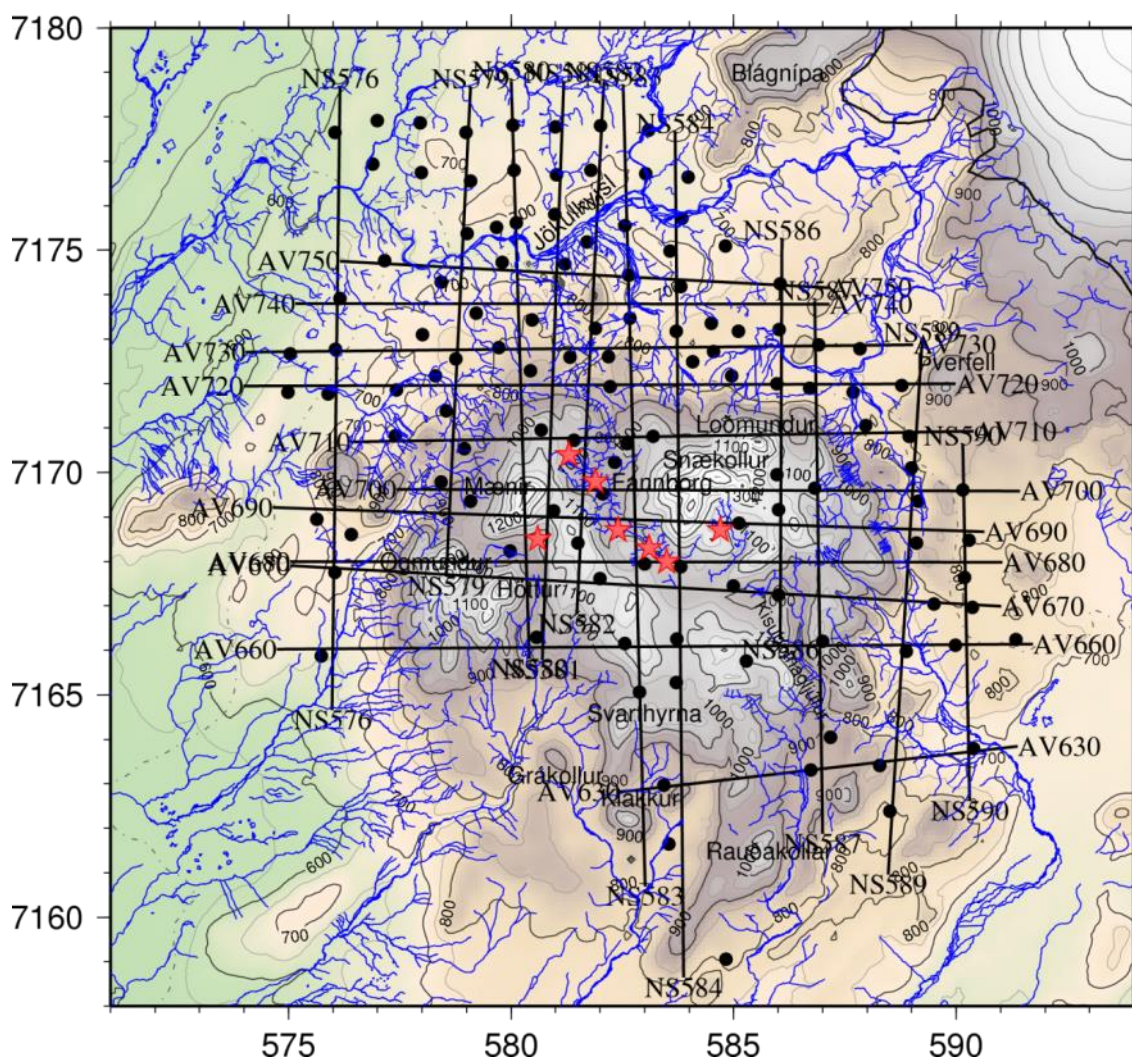


Mynd 17. Viðnám í 200 m y.s.

5.2 Viðnámsnið

Til að skýra nánar niðurstöðurnar eru sett fram nokkur snið sem sýna viðnám í gegnum svæðið allt niður í 100 m y.s. Lega sniðanna er sýnd á mynd 18.

Nyrsta sniðið, **AV750**, liggur austur-vestur um Ásgarðsfjall (mynd 19). Í sniðinu sést í lágviðnám (rautt) fyrir miðju sniði en þetta er ytri jaðar lágviðnámskápunnar þar sem dýpkar á hana til norðurs frá jarðhitakerfinu í Kerlingarfjöllum. Í sniði **AV740** (mynd 20) sést samskonar mynd þar sem heldur meira sést af lágviðnámskápunni. Lágviðnáms-totan í mælingu 812747 í sniði **AV750** og í 805736 í sniði **AV740** er vísbending um volgt afrennsli sem rennur til norðurs frá sjálfu jarðhitakerfinu. Þessi afrennslisstraumur sést í mælingunum frá 2004–2005 og er minnst á hann í skýrslunni frá 2006 (Ragna Karlsdóttir og Arnar Már Vilhjálmsson, 2006) og þar tekið fram að borholan í gilinu inn af skálanum tekur vatn úr þeim straumi.



Mynd 18. Lega viðnámsniða. Rauðar stjörnur merkja helstu ummerki um jarðhita á yfirborði.

Á næsta sniði, **AV730** (mynd 21), um 1 km sunnar, sér í lágviðnámskápuna í um 400 m þar sem hún nær hæst og dýpkar á hana til austurs og vesturs. Austast í sniðinu (mæling 878730) sér í lágviðnámið, sem teygir sig út frá jarðhitakerfinu í átt að Þverfelli, og hefur verið minnst á hér áður í umræðunni um viðnámskortin.

AV720 (mynd 22) liggur rétt sunnan við Ásgarðsfjall en um 1 km norðan Loðmundar. Þarna er lágviðnámskápan á um 400 m dýpi undir yfirborði. Austan til í sniðinu sést lágviðnámið í átt að Þverfelli, sem stendur austan við hin eiginlegu Kerlingarfjöll, og hér grillir í hærra viðnám undir. Þetta ber öll einkenni háhitakerfis með lágviðnámskápu yfir háviðnámskjarna og þykir því rétt að álykta að þarna sé, eða hafi verið, háhiti og ummyndun í takt við það. Hvort þarna sé jafnvægi á milli ummyndunar og hita núna er ekki hægt að segja til um nema með nánari athugun, þ.e.a.s. borun.

AV710 (mynd 23) liggur um nyrsta hluta Neðri-Hveradala og um Loðmund. Lágviðnámskápan nær yfirborði í Neðri-Hveradölum og er þar mjög greinilegur háviðnámskjarni undir. Það dýpkar á lágviðnámskápuna til austurs og vesturs út frá Hveradölum en gæta verður að því að vegna landslagsins vantar mælingar í hlíðum Fannborgar og Snækolls og því eru um 5 km á milli mælinga. Líklegt er að meira landslag sé í viðnáminu, þar sem mælingar vantar, en virðist hér í sniðinu. Miklar breytingar í viðnámi um miðbik sniðsins gætu verið vegna þrívíddaráhrifa og því ekki ljóst hversu áreiðanleg einvíð túlkun er, sérstaklega í dýpsta hluta sniðsins. Austast í sniðinu sést í Þverfellssvæðið.

AV700 (mynd 24) liggur um Mæni og rétt sunnan við hátoppa Fannborgar og Snækolls. Lágviðnámskápan er í yfirborði í Neðri-Hveradölum og síðan dýpkar á hana mjög ákveðið til vesturs, vestan við Mæni og til austurs, austan Snækolls. Rétt er að benda á að langt er á milli mælinga vegna erfiðs landslags. Í næsta sniði, **AV690** (mynd 25), sést í syðri hluta Neðri-Hveradala svo og Efri-Hveradali. Mælingin 851691, sunnan við Snækoll í Efri Hveradölum, sýnir hæsta topp lágviðnámskápunnar í Kerlingarfjöllum í rúmlega 1000 m hæð yfir sjó. Lágviðnámskápan hvelfist yfir háviðnámskjarnann sem er vel afmarkaður til austurs og vesturs.

Í sniði **AV680** (mynd 26) má sjá lágt viðnám í yfirborði bæði í Neðri- og Efri-Hveradölum. Til vesturs frá Neðri-Hveradölum lækkar á lágviðnámskápuna og er hún á 250–300 m dýpi undir Hverabotni. Einnig viðist lækka til suðurs á svæðið í Neðri-Hveradölum. Til austurs liggur svo lágviðnámskápan í yfirborði í Efri-Hveradölum og á að tengjast lágviðnámi á 500–600 m dýpi austast í sniðinu í mælingu 891686.

Annars vegar er mjög langt á milli mælinga, eða 8 km frá Efri-Hveradölum og austur fyrir fjöllin. Hins vegar er mæling „á milli“ Efri- og Neðri-Hveradala (mæling 829680) sem sér lágt viðnám frá um 500 m dýpi og niður úr eins langt og hún skynjar. Í raun er líklegt að lágviðnámskápan hvelfist niður frá Efri-Hveradölum til austurs líkt og til vesturs en hér vantar mælingar til að staðfesta það. Það sést hins vegar í næsta sniði **AV670**. Mælingin með lága viðnáminu 829680 sýnir skilin á milli háviðnámskjarnanna í Efri- og Neðri-Hveradölum eins og minnst hefur verið á í umræðunni um viðnámskortin.

AV670 (mynd 27) sýnir svo hvernig lágviðnámskápan hvelfist undir Efri-Hveradölum og að farið er að dýpka á hana til suðurs, þ.e. hún er hér á meira dýpi en í næsta sniði fyrir norðan (**AV680**). Í næsta sniði, **AV660** (mynd 28), dýpkar enn á jarðhitakerfið til

suðurs og er lágviðnámskápan á 400–500 m dýpi. Háviðnámskjarninn sést ekki í þessu sniði. Í syðsta sniðinu, **AV630** (mynd 29), sem liggur sunnan við hin eiginlegu Kerlingarfjöll, sést í lágviðnámskápuna á um 800 m dýpi í einni mælingu sem er um 1 km norðaustan við Klakk.

Til nánari skýringar verður farið á sama hátt í gegnum snið með N-S stefnu.

Vestasta sniðið, **NS576** (mynd 30), liggur vestan við Kerlingarfjöll og sýnir ekki merki um jarðhitakerfið. Í næsta sniði, **NS579** (mynd 31), sem liggur um 2,5 km austar og liggur um Ásgarðsöldur norðan Ögmundar, sér í lágviðnámskápuna í norðaustasta hluta jarðhitakerfisins, þar sem hún er á 300 m dýpi norðan Ögmundar. Næsta snið, **NS580** (mynd 32), liggur um Mæni og Hverabotn og austan í Hetti. Lágviðnámskápan er á 200–300 m dýpi undir Hverabotni en þar eru ummerki um jarðhita á yfirborði eins og sagt var áður.

NS581 (mynd 33) liggur um Neðri-Hveradali og sýnir lágviðnámskápu á um 200 m dýpi þar sem hún nær hæst, hvelfast um háviðnámskjarna, og dýpkar á hana til norðurs og suðurs. Á sniðinu sést lágviðnámsstota, sem liggur til norðurs á 200–300 m dýpi. Þetta er túlkað sem afrennsli af volgu vatni til norðurs út frá jarðhitakerfinu. Borholur í gilinu inn af skálanum í Ásgarði staðfesta að mikill flaumur af 35–40°C heitu vatni er á 300–400 m dýpi þar og er líklegt að þetta afrennsli fæði borholurnar.

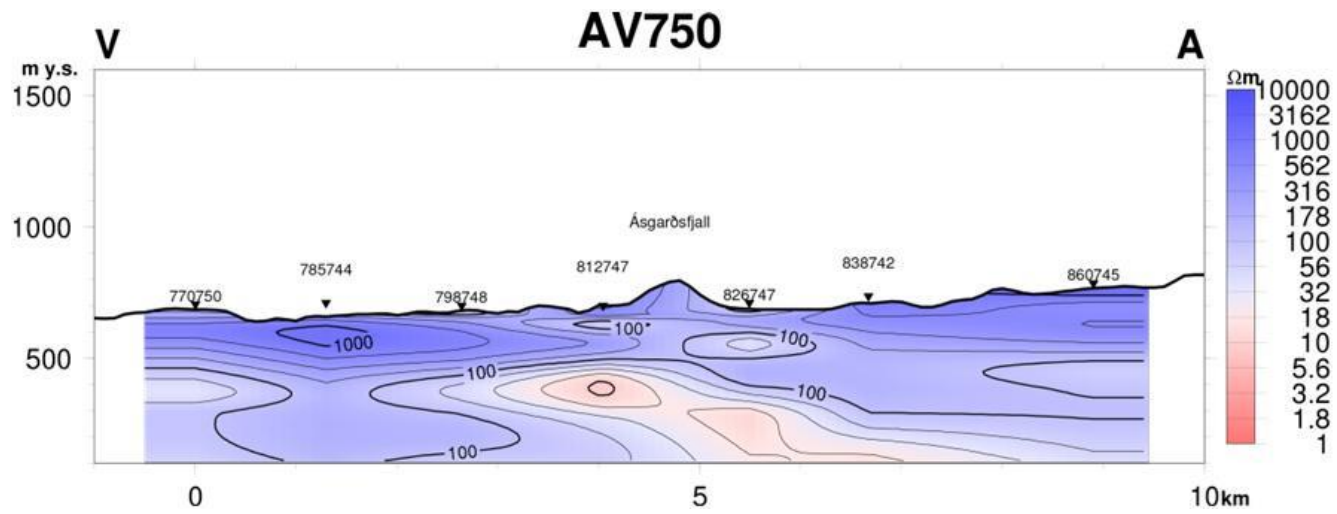
Snið **NS582** (mynd 34) sýnir samskonar mynd og **NS581** en hér nær lágviðnámskápan yfirborði í Neðri-Hveradal. Greinilegur háviðnámskjarni er undir hálendinu (Kerlingarfjöllum). Lágviðnámslag teygir sig til norðurs, eins og sést í sniðinu á undan, og er túlkað sem heitt afrennsli til norðurs.

Snið **NS583** (mynd 35) er 17 km langt (ath. teiknað í öðrum mælikvarða en hin sniðin) og nær allt frá Jökulkvísl norðan Kerlingarfjalla að Klakki fyrir sunnan þau. Sniðið sker jarðhitasvæðið í Neðri-Hveradölum þar sem lágviðnámskápan er í yfirborði. Það dýpkar á lágviðnámskápuna til norðurs og suðurs og háviðnámskjarninn greinilegur og er á aðeins 100–200 m dýpi undir Hveradölum. Mæling 829680 er staðsett sunnan Fannborgar ofan við efstu drög Neðri-Hveradala. Í henni sést lágt viðnám eins djúpt og hún skynjar (sjá umræðuna um jafnviðnámskortin hér á undan). Hér virðast vera lágviðnámskil á milli Efri-Hveradala og Neðri-Hveradala. Þetta þykir styðja það að aðskilin uppstreymi séu undir jarðhitasvæðunum, enda styðja efnahitamælar þá tilgátu þar sem mismunandi efnahiti er í Efri- og Neðri-Hveradölum.

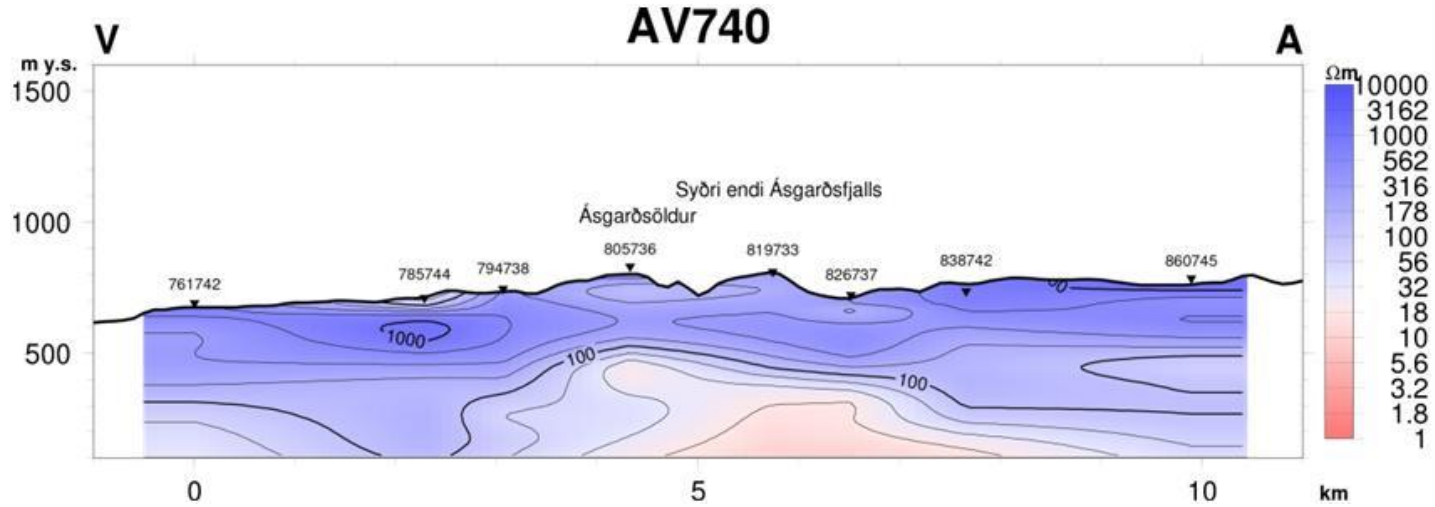
Í sniði **NS584** (mynd 36) sést lágviðnámskápan í yfirborði í Efri-Hveradölum og háviðnámskjarni undir (ath. að háa viðnámið í mælingu 837663 er háviðnámskjarni). Mæling 838661 sýnir einnig lágviðnámskilin á milli jarðhitakerfanna í Efri- og Neðri-Hveradölum.

Í sniði **NS586** (mynd 37) er farið að dýpka á jarðhitakerfið til austurs. Laga viðnámið í yfirborði er suðaustast í Efri-Hveradölum, ofan við efstu drög Kisubotnagljúfurs.

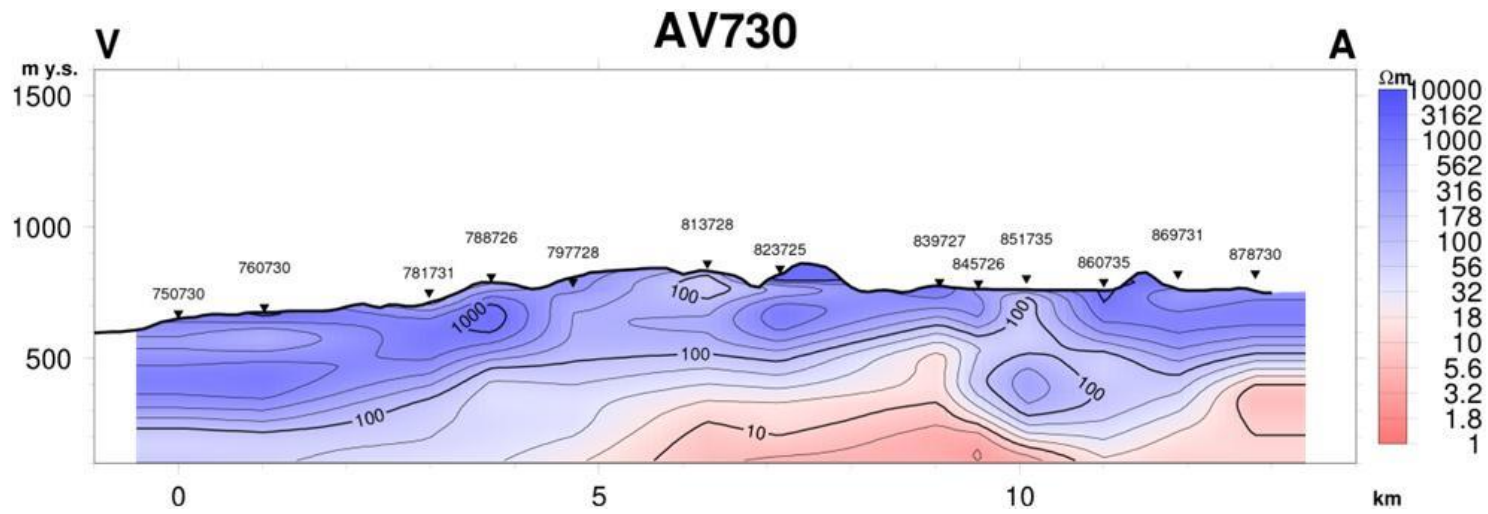
Snið **NS587** (mynd 38) sker austurjaðar lágviðnámskápunnar og þar með jarðhitakerfisins þar sem farið er að dýpka á það til austurs. Lágviðnámskápan er á 500–600 m dýpi og ekki sér í háviðnámskjarna. Í næsta sniði **NS589** (mynd 39) glittir hins vegar í lágviðnámskápuna sem teygir sig í norðaustur frá Kerlingarfjöllun í átt að Þverfelli. Austasta sniðið, **NS590** (mynd 40), er greinilega austan við jarðhitakerfið.



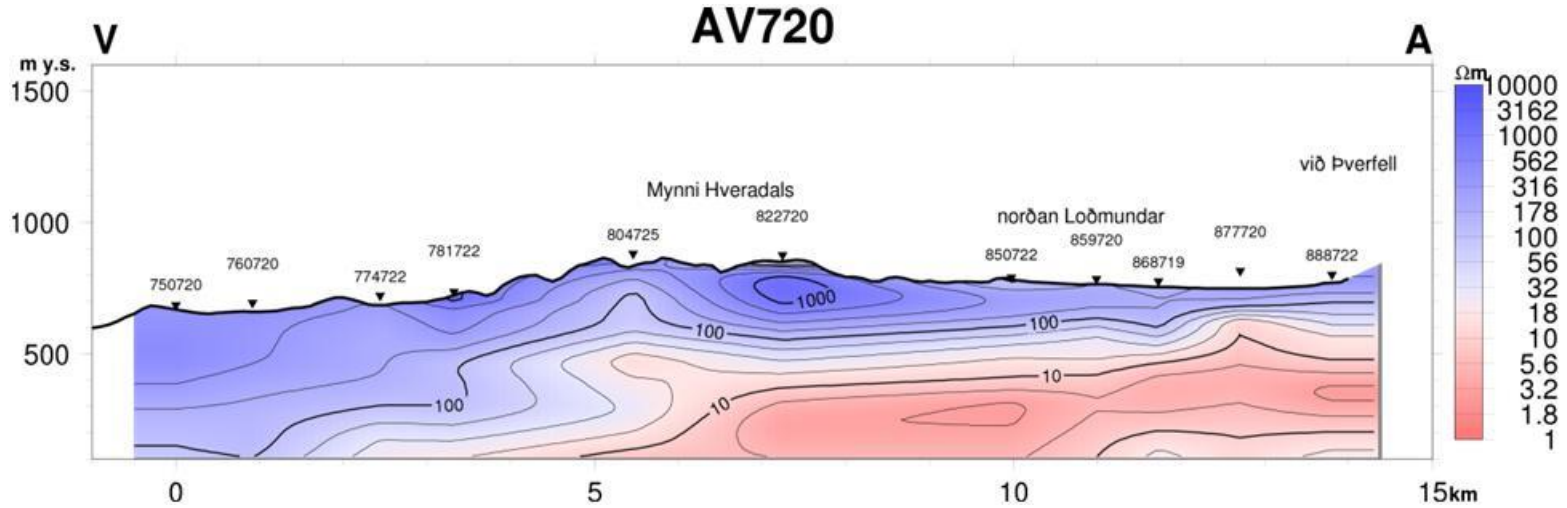
Mynd 19. Viðnámssnið AV750.



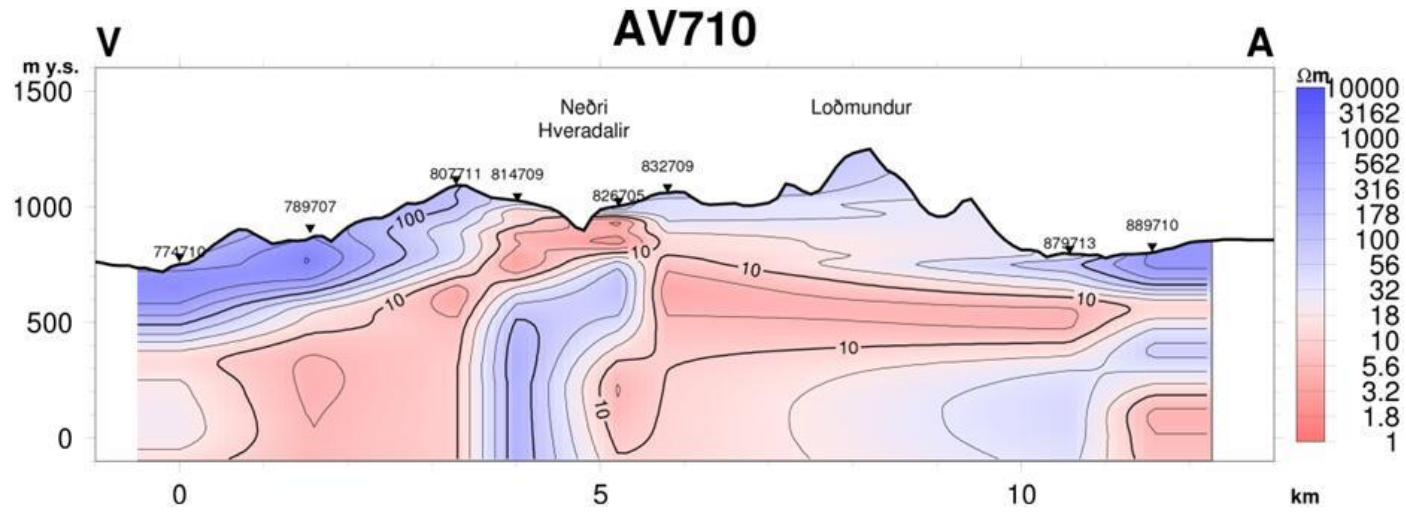
Mynd 20. Viðnámssnið AV740.



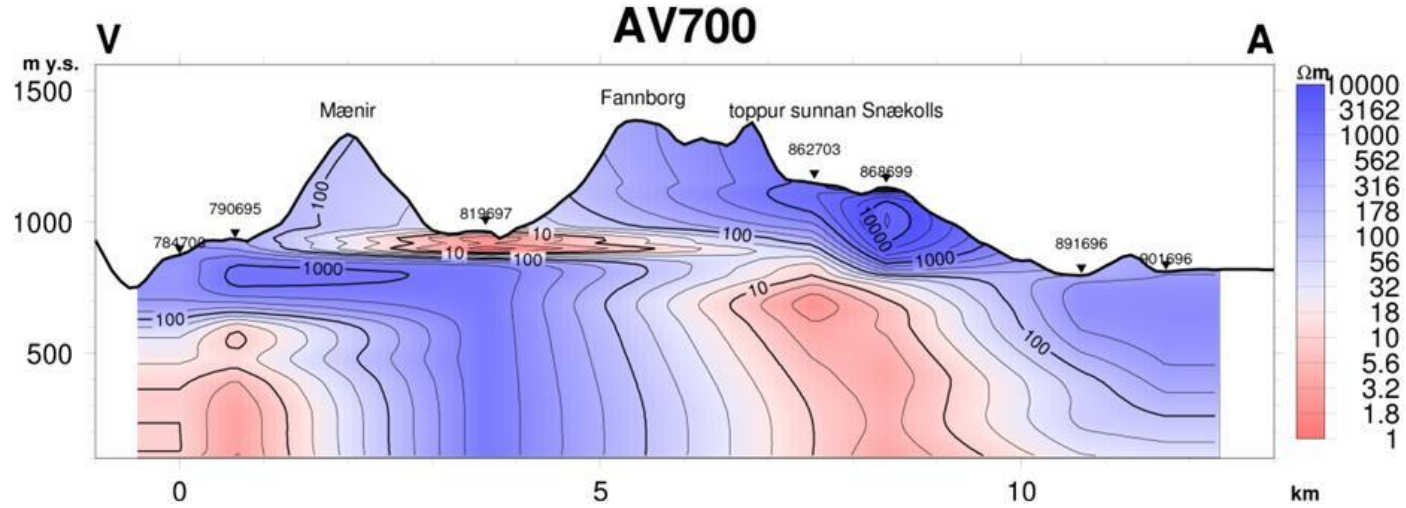
Mynd 21. Viðnámssnið AV730.



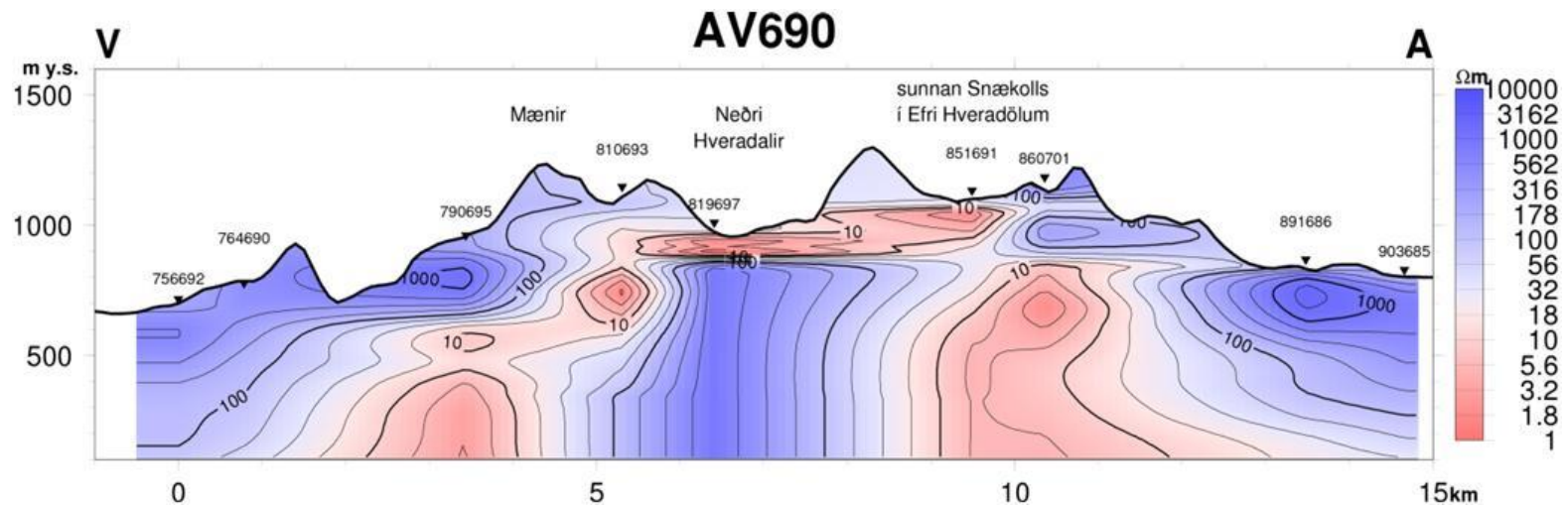
Mynd 22. Viðnámssnið AV720.



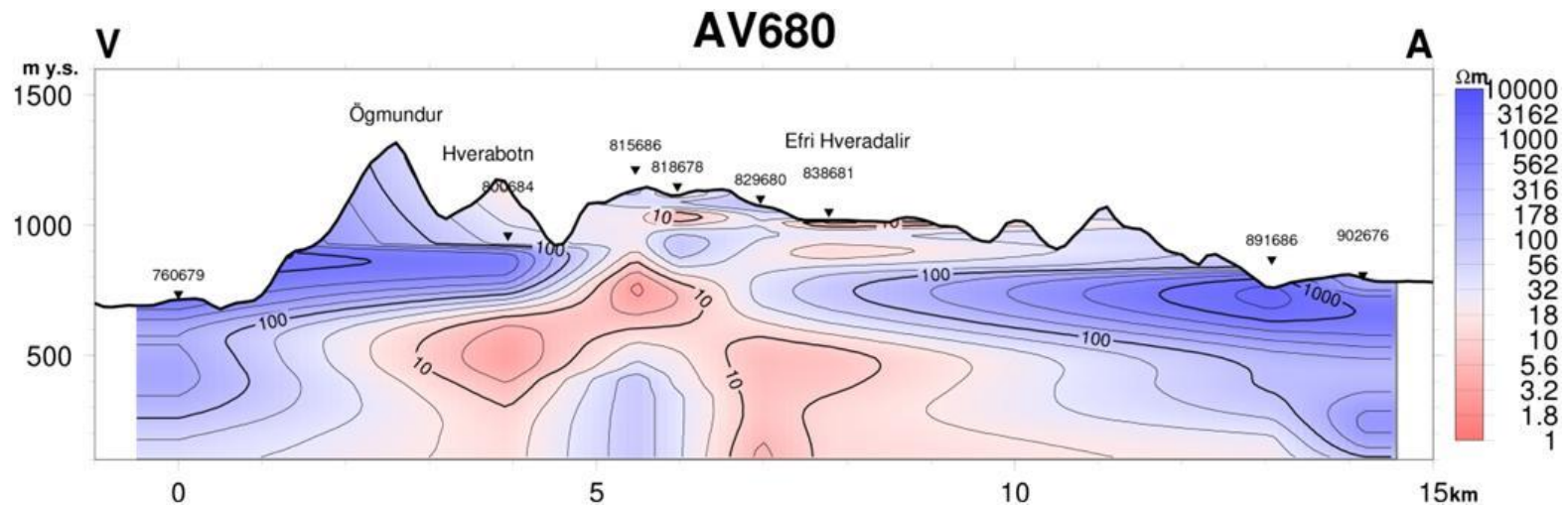
Mynd 23. Viðnámssnið AV710.



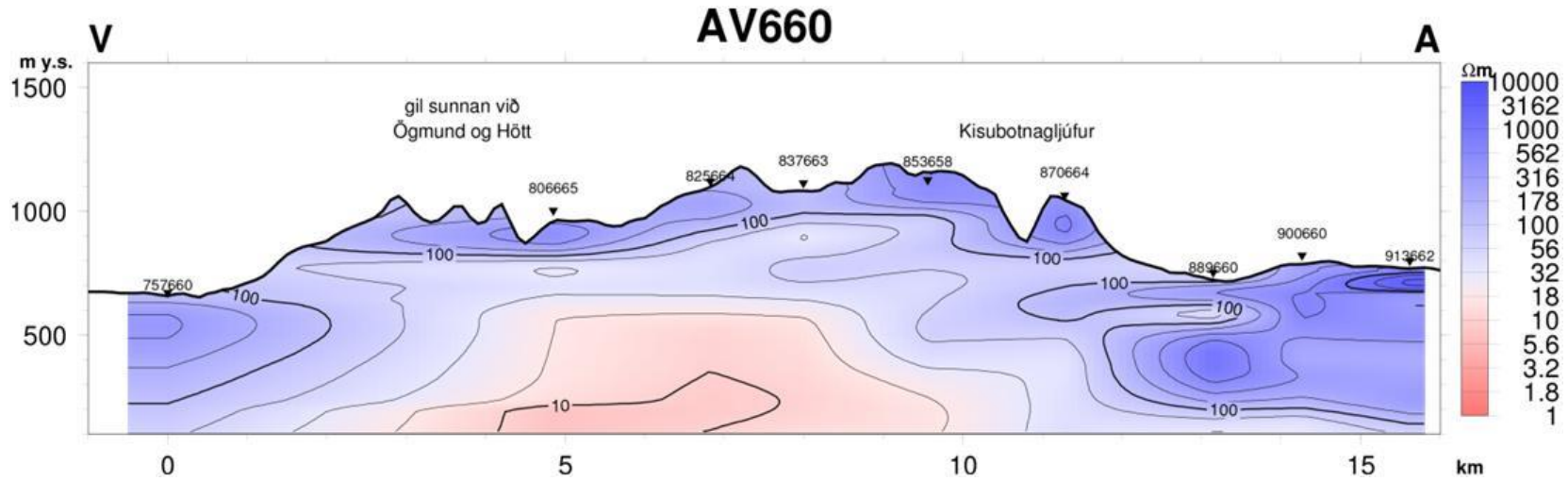
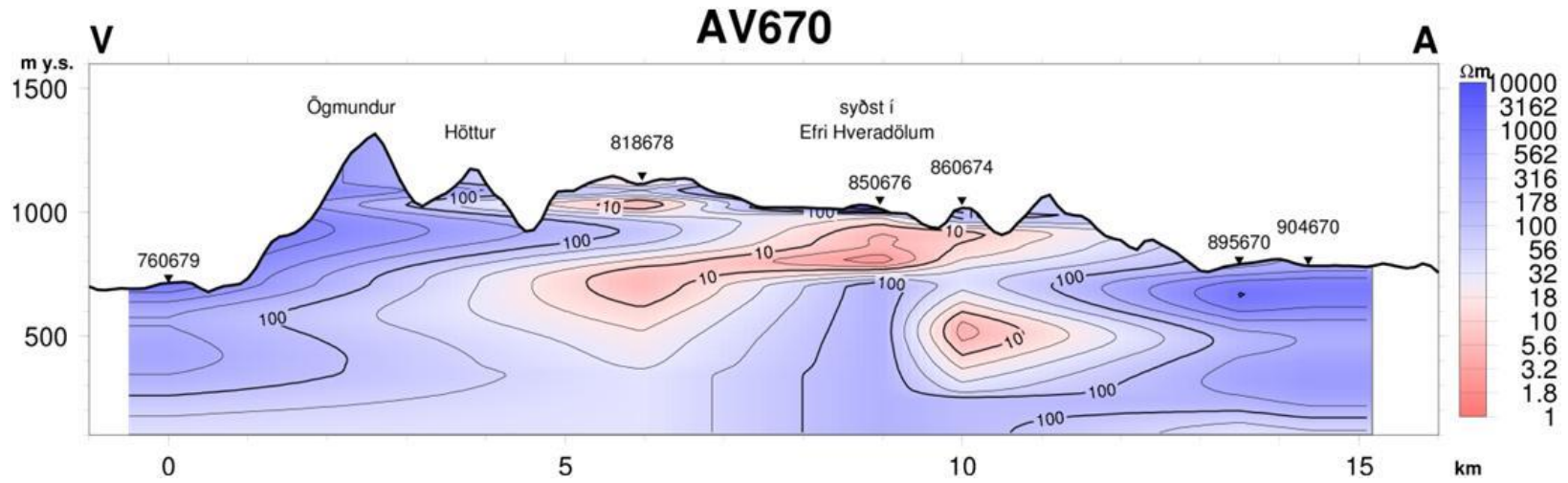
Mynd 24. Viðnámssnið AV700.

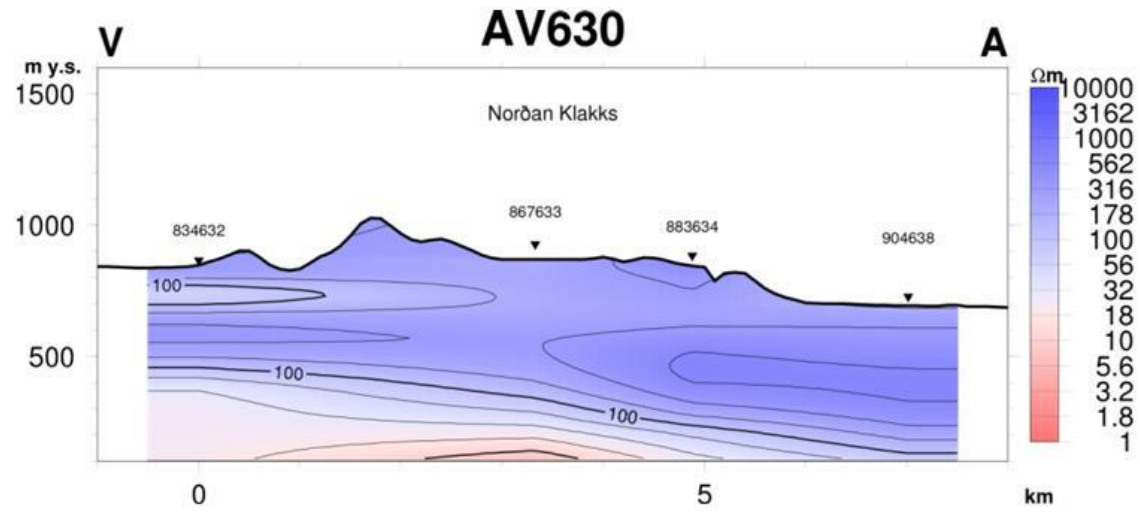


Mynd 25. Viðnámssnið AV690.

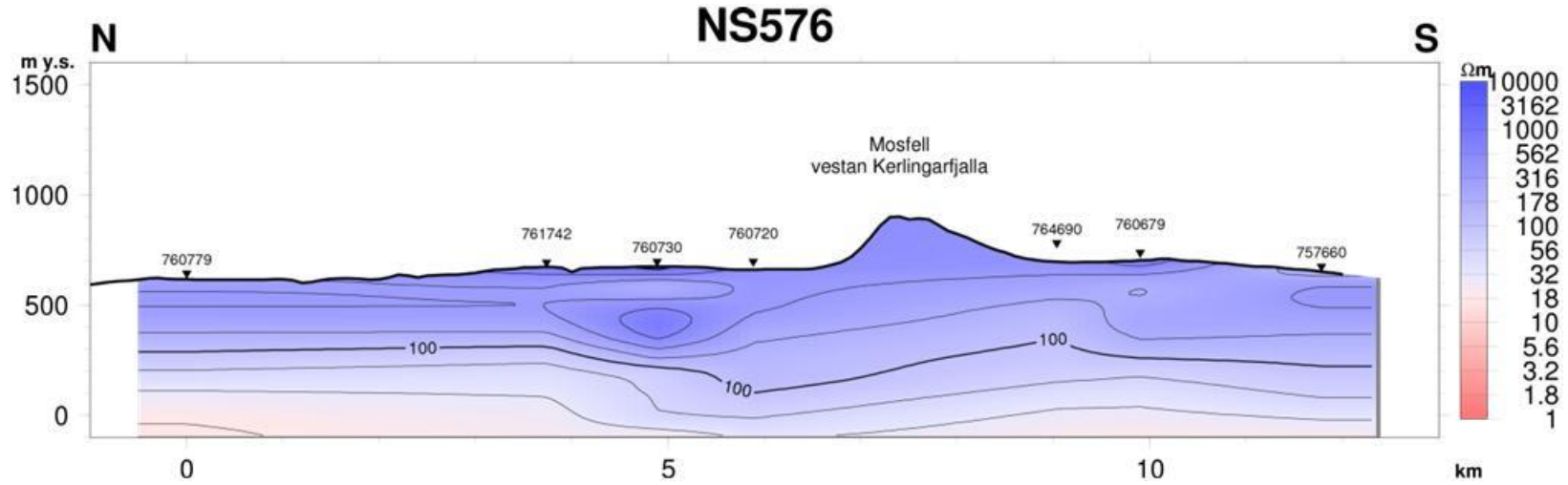


Mynd 26. Viðnámssnið AV680.

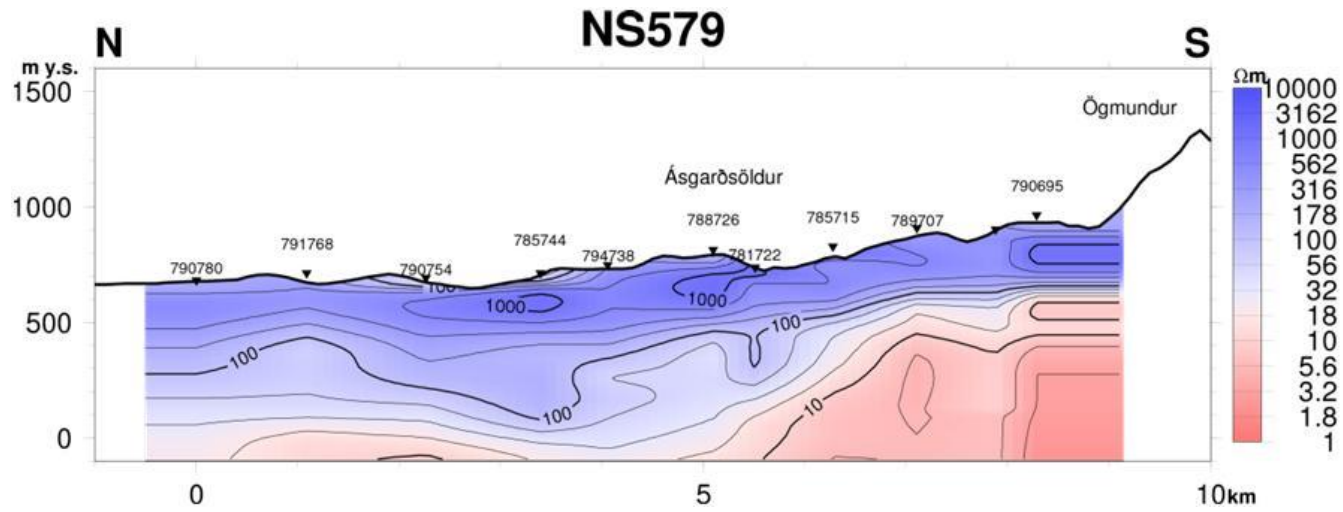




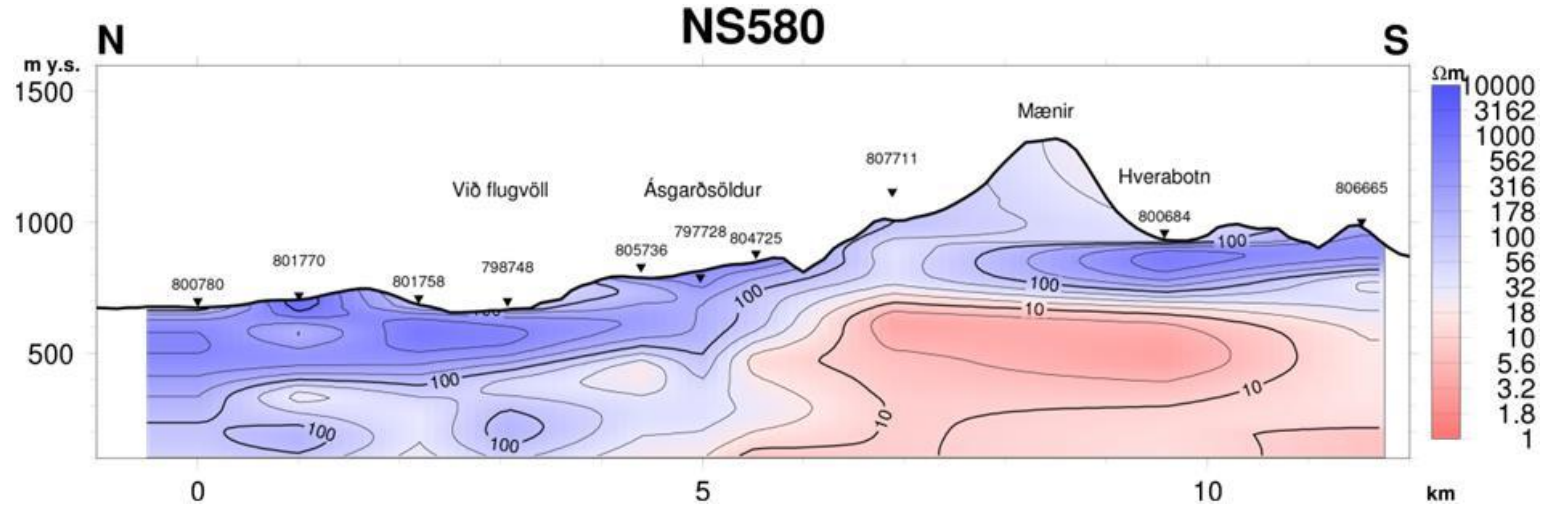
Mynd 29. Viðnámssnið AV630.



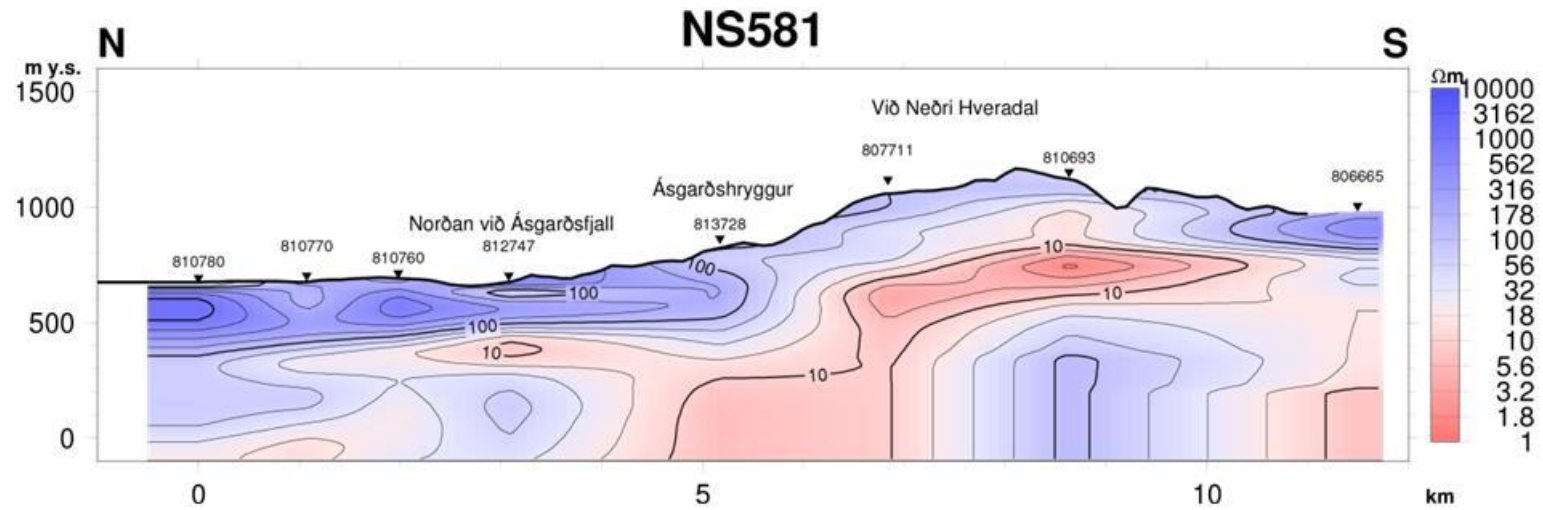
Mynd 30. Viðnámssnið NS576.



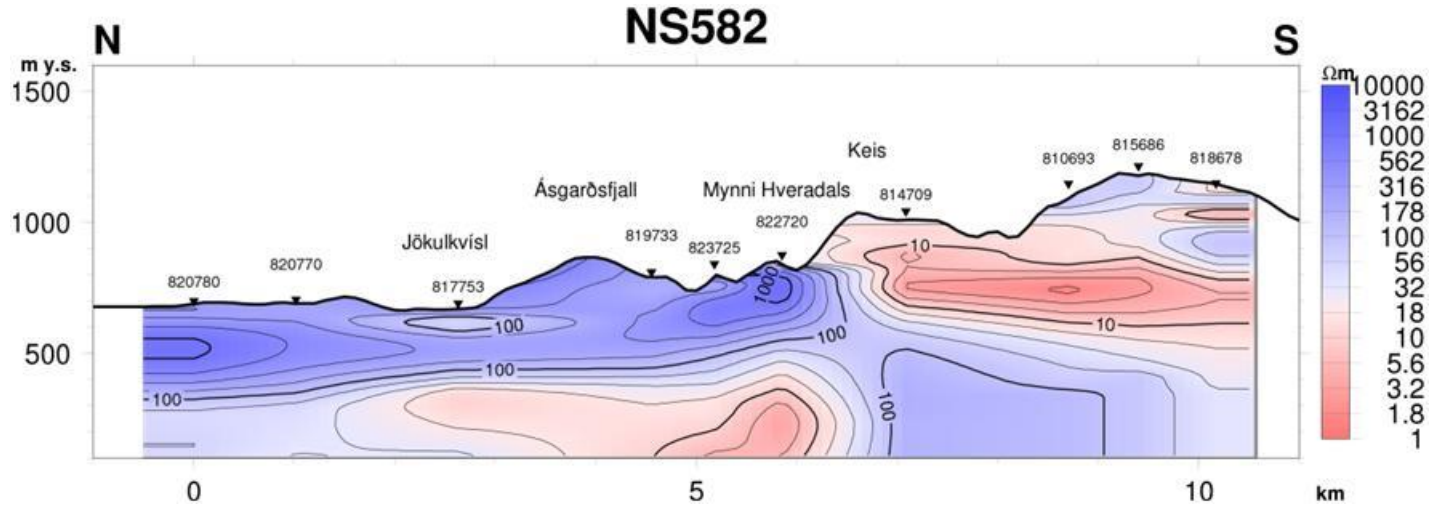
Mynd 31. Viðnámssnið NS579.



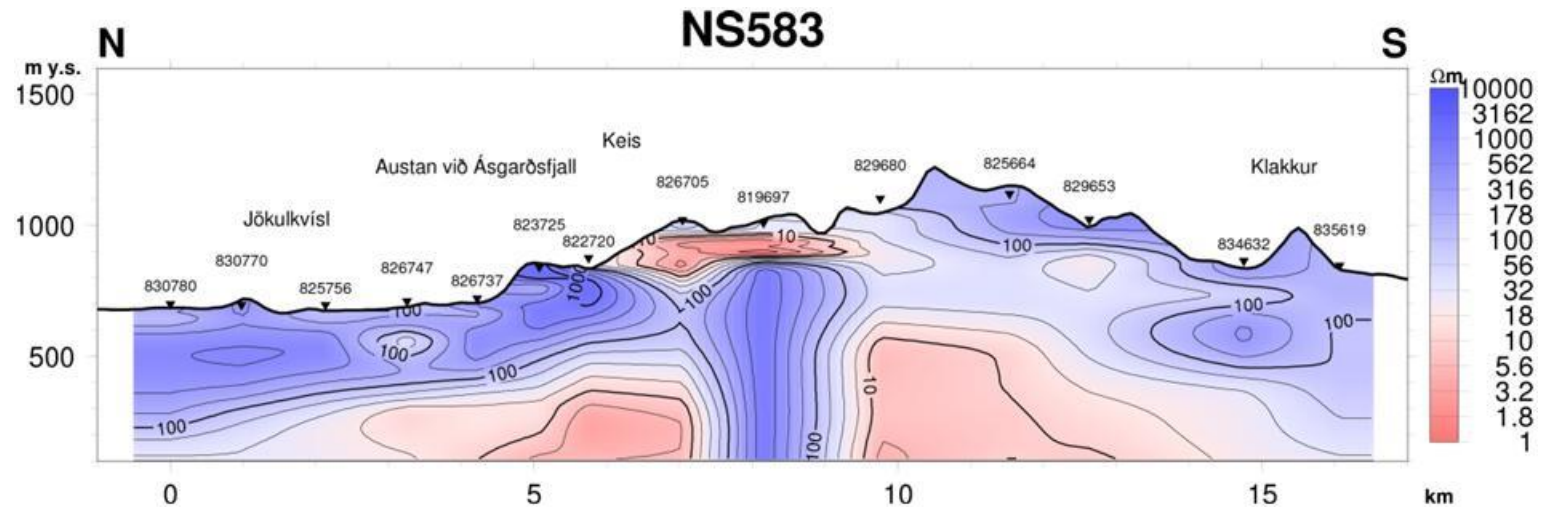
Mynd 32. Viðnámssnið NS580.



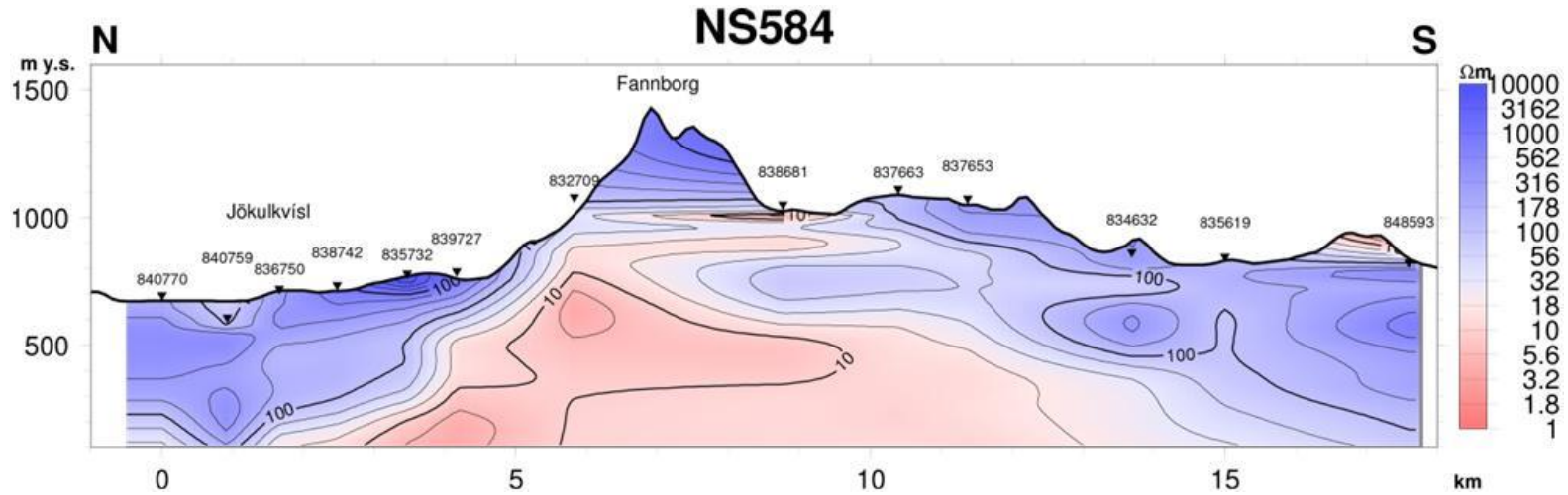
Mynd 33. Viðnámssnið NS581.



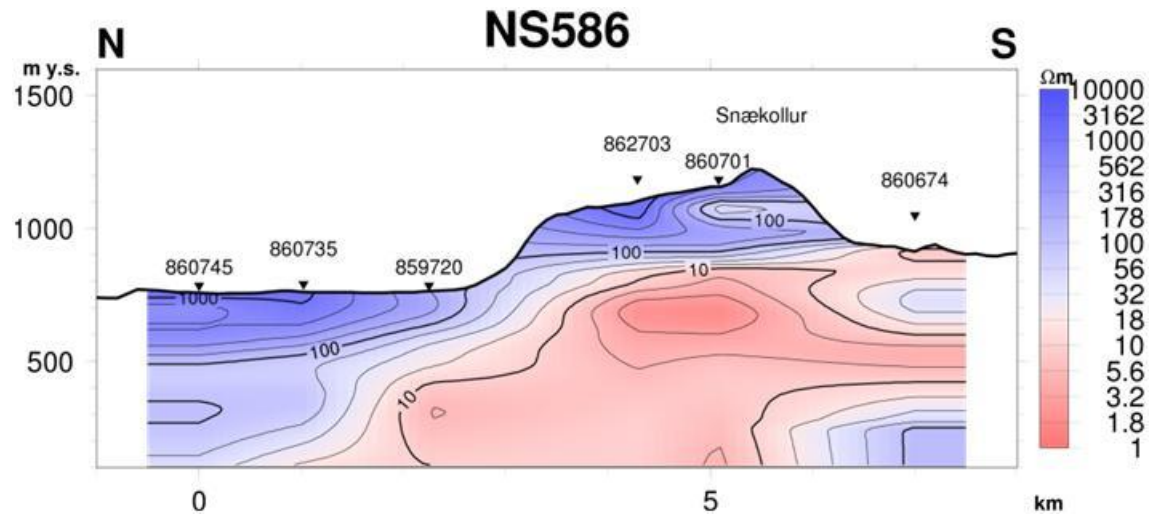
Mynd 34. Viðnámssnið NS582.



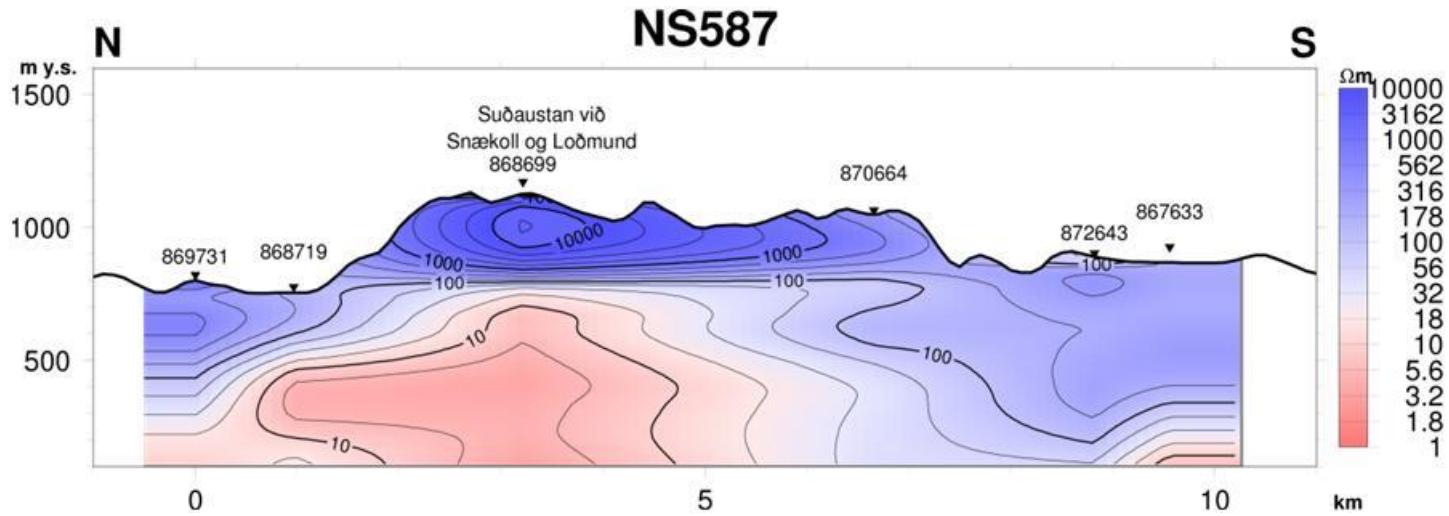
Mynd 35. Viðnámssnið NS583.



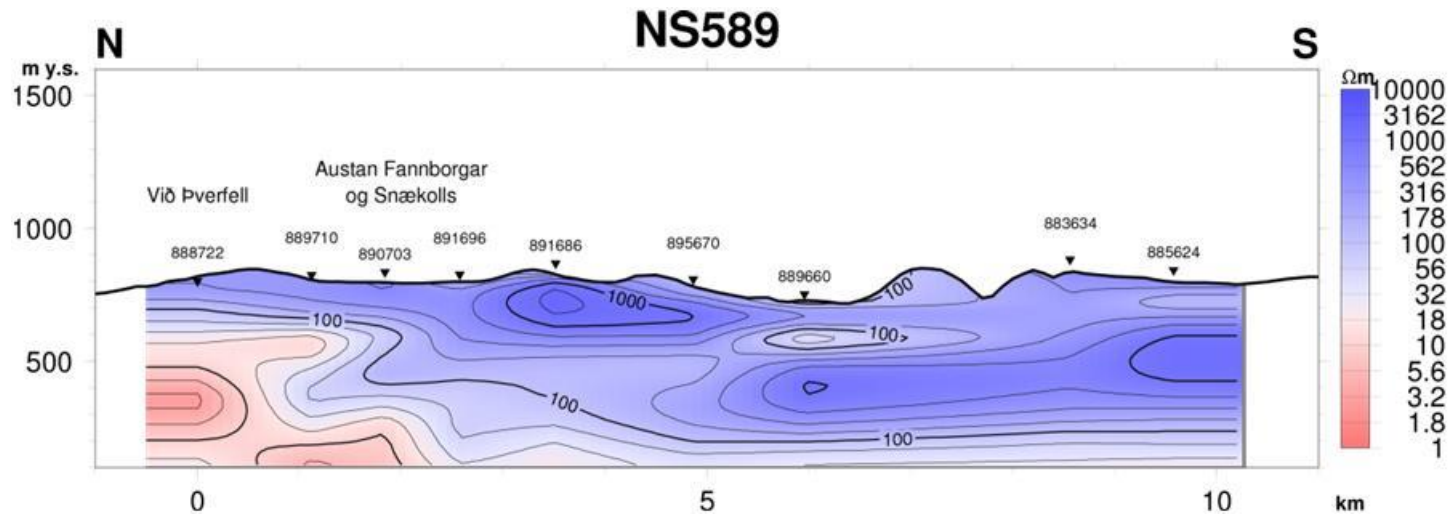
Mynd 36. Viðnámssnið NS584.



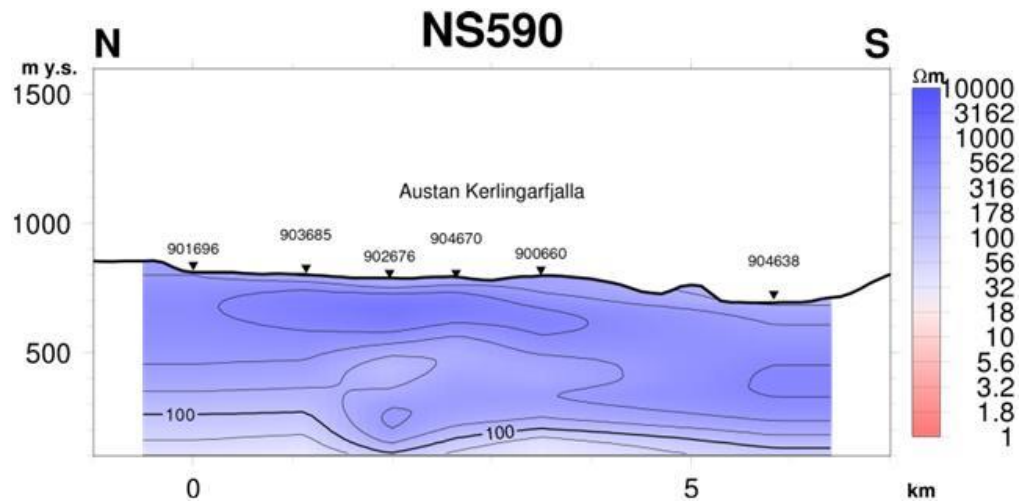
Mynd 37. Viðnámssnið NS586.



Mynd 38. Viðnámssnið NS587.



Mynd 39. Viðnámssnið NS589.



Mynd 40. Viðnámssnið NS590.

6 MT-mælingar

6.1 Framkvæmd MT-mælinga

Gerðar voru 12 MT-mælingar í Kerlingarfjöllum sumarið 2008. Staðsetning þessara mælinga er sýnd á mynd 4. Staðsetning þeirra (utan mælingar 007) er á NS-línu þvert í gegnum fjöllin. Mælt var með Phoenix MT tækjunum að MTU-gerð sem spanna tíðnisviðið frá DC og upp í 320 Hz. Mælt er yfir nótt. Tæki eru sett upp að degi og tekin niður daginn eftir, sem gefur um 20 klst. af samfelldum tímaröðum og gefur yfirleitt góð gögn, allt að 1000 sekúnda sveiflutíma. Notuð var svonefnd „remote reference“ aðferð þar sem ein mælistöð er staðsett fjarri mælisvæðinu (base-stöð) og höfð stöðugt í gangi. Gögnin úr henni eru notuð í úrvinnslu gagnanna sem bætir yfirleitt gæði mæliniðurstaðna. Þessi stöð var um 20 km austan við Kerlingarfjöll og hefur númerið 999. Mælt var með fjórum MT-tækjum; eitt tæki í base og hin þrjú tækin voru færð til daglega. Eitt af þessum þremur tækjum mælir einungis rafsvið og er þá notast við segulsvið frá næstu mælistöð sem staðsett er þá í um eða innan við 1 km fjarlægð. Vegna bilana var ekki mældur lóðréttur þáttur segulssviðs í base-stöð.

6.2 MT-mælingar og túlkun þeirra

Enda þótt MT-mælingum hafi verið beitt í rannsóknum á Íslandi á síðustu öld var það aðeins í tilraunaskyni. Það er fyrst á síðustu árum sem farið var að beita þeim með öðrum viðnámsmælingum í jarðhitarannsóknum. Því er farið í það hér að skýra fræðin á bak við mæliaðferðina og túlkun mælinganna.

Út frá tímaröðum raf- og segulsviða er reikna með „robust“ aðferð, „impedance (Z)“, en hún lýsir sambandi raf- og segulsviða samkvæmt:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

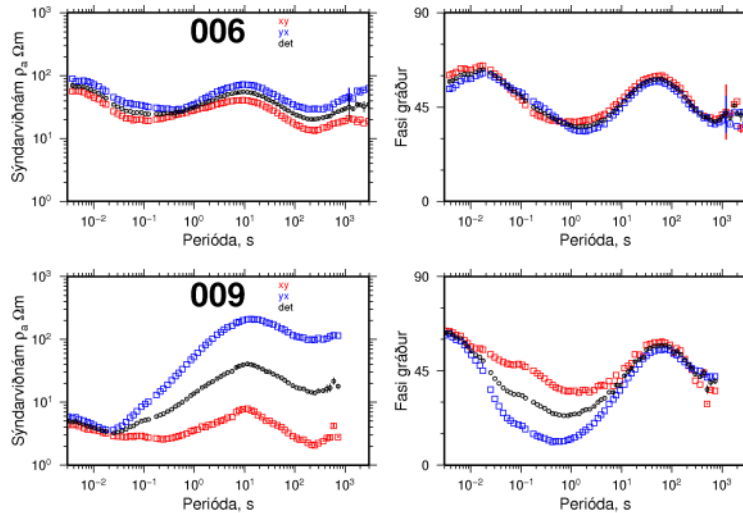
þar sem E og H eru raf- og segulsvið í x (norður) og y (austur) stefnur og Z_{ij} eru stök tvinntölu „impedance tensorsins“ Z. Upplýsingar um viðnámsgerð jarðlaga undir og umhverfis mælistöð eru fólgnar í þessum tensor. Fyrir einvíða jörð (viðnám breytist eingöngu með dýpi) gildir að $Z_{xx}=Z_{yy}=0$ og $Z_{xy}=-Z_{yx}$. Fyrir tvívíða jörð, þ.e. til er ein lárétt stefna (ϕ) þar sem viðnám breytist ekki í þá stefnu, er hægt að snúa tensorum um þá stefnu og gildir þá $Z_{xx}=Z_{yy}=0$ og $Z_{xy}\neq Z_{yx}$. En almennt gildir að öll stökin í viðnáms-tensorum eru frábrugðin núlli. Í viðauka eru öll stök tensorsins teiknuð og kemur þar fram að gæði mælinganna eru yfirleitt mjög mikil. Í mælingu 005 reyndist norður-suður rafsviðið ónothæft og því var einungis hægt að reikna Z_{yx} og Z_{yy} fyrir þá mælistöð. Út frá impedansinum er reiknað svonefnt sýndarviðnám og fasi samkvæmt:

$$\rho_{xy} = 0.2T|Z_{xy}|^2; \theta_{xy}=\arg(Z_{xy})$$

$$\rho_{yx} = 0.2T|Z_{yx}|^2; \theta_{yx}=\arg(Z_{yx}),$$

en sýndarviðnám er það sama og eðlisviðnám jarðar ef jörðin væri einsleit, þ.e. breyttist hvorki með dýpi né lárétt. Viðnám jarðar er breytilegt með dýpi (og oftast einnig lárétt) og því er þetta sýndarviðnám oftast teiknað sem fall af sveiflutíma sem er einskonar

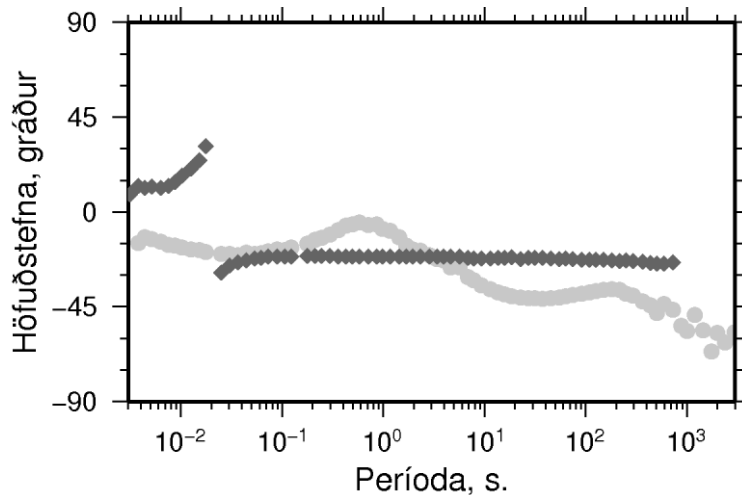
dýptarskali þar sem rafsegulbylgjurnar ná dýpra eftir því sem bylgjulengd þeirra (þ.e. sveiflutími) er lengri. Í viðauka MT-2 eru teiknaðir sýndarviðnáms- og fasaferlar allra mælinganna ásamt öðrum MT-parametrum. Dæmi um slíka ferla er sýnt á mynd 41 fyrir mælingar 006 og 009.



Mynd 41. Sýndarviðnám og fasi fyrir mælistöðvar 006 og 009. Rauðir ferlar (ρ_{xy}) eiga við impedans með rafsvið í stefnu höfuðáss og bláir ferlar í stefnu hornrétt á hana. Höfuðás mælingar 006 hefur í $N40^\circ V$ og $N20^\circ V$ fyrir stöð 009. Svartir ferlar eiga við determinant impedansinn og eru óháðir snúningsstefnu.

Á myndinni kemur fram að ρ_{xy} og ρ_{yx} ferlarnir eru nánast eins fyrir stöð 006 en mjög ólíkir fyrir stöð 009. Mismunurinn er sá að stöð 006 skynjar undirliggjandi rafviðnám jarðar sem einvítt en stöð 009 sem tví- eða þrívítt. Fyrir mælingar sem sýna einvíða hegðun skiptir ekki máli í hvaða stefnur er mælt (þ.e. stefnur x og y), viðnáms- og fasaferlarnir eru ávallt þeir sömu, en þar sem jörðin er margvíð skiptir þetta máli. Í reynd eru MT-mælingar sjaldnast alveg einvíðar en oft nærri því. Eins og sjá má í viðauka er stærð stakanna Z_{xx} og Z_{yy} yfirleitt um einni til tveimur stærðargráðum lægri en stærð Z_{xy} og Z_{yx} og fer munurinn yfirleitt minnkandi með hærri sveiflutíma. Þetta þýðir að þrívíðanleiki gagnanna er yfirleitt lítil en fer vaxandi með dýpi.

Eins og áður segir gildir að fyrir tvívíða viðnámsdreifingu er hægt að snúa hnitakerfi MT-mælinga þannig að $Z_{xx}=Z_{yy}=0$. Þessi stefna segir til um lárétta stefnu tvívíðanleikans. Sú stefna sem hámarkar $|Z_{xy}+Z_{yx}|$ (eða lágmarkar $|Z_{xx}+Z_{yy}|$) kemur næst því að segja til um stefnu hugsanlegs tvívíðanleika og er nefnd höfuðásstefna (e. principle direction) og segir til um í hvaða átt raffræðilegt strik er (e. geoelectrical strike). Reikna má með því að þessi stefna sé samíða vel leiðandi, jarðfræðilegum fyrirbrigðum, svo sem misgengjum, sprungum, göngum eða stórum, jarðfræðilegum skrokkum. Stefnan ætti því að gefa upplýsingar um meginbrotastefnu svæðisins. Hægt er að reikna út þessa stefnu fyrir sérhverja tíðni og eru þær stefnur sýndar á mynd 42 fyrir stöðvar 006 og 009.



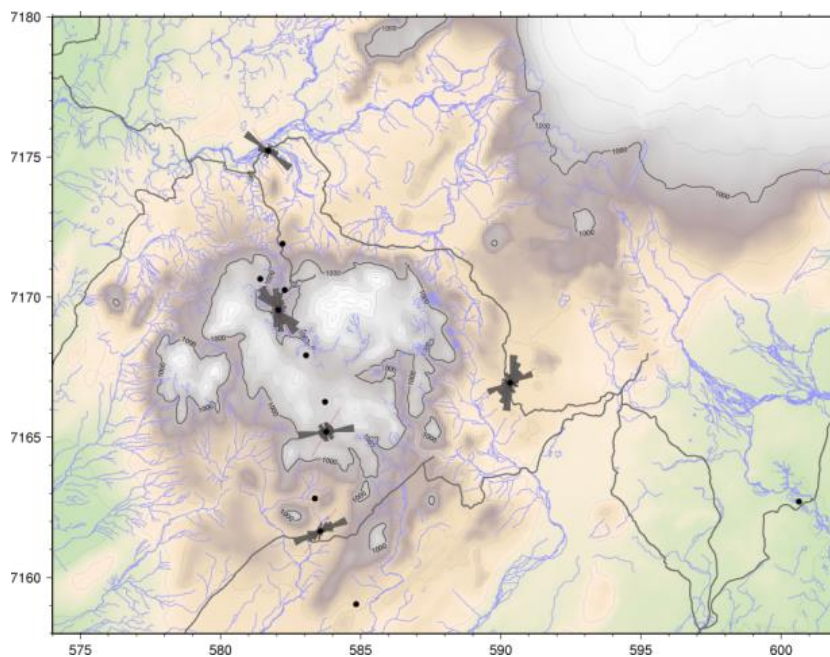
Mynd 42. Höfuðásstefna mælinga 006 (gráir hringir) og 009 (tíglar).

Stöð 009 gefur mjög ákveðna stefnu, eða um 20° vestan við norður, að mestu óháð sveiflutíma. Höfuðásstefnan fyrir stöð 006 er svipuð og í stöð 009 en þó lítillega breytileg með tíðni, um N15°V fyrir sveiflutíma minni en 1s, og um N40° V fyrir sveiflutíma stærri en 10s, sem segir að raffræðileg strikstefna er um N15°V grunn en dýpri N40° V. Á mynd 41 er sýnt sýndarviðnám reiknað út frá impedans sem snúið hefur verið í þessar áttir. Í viðauka eru mæliferlar teiknaðir í mældu hnitakerfi sem er með x-ás í segulnorður (sem er N15°V).

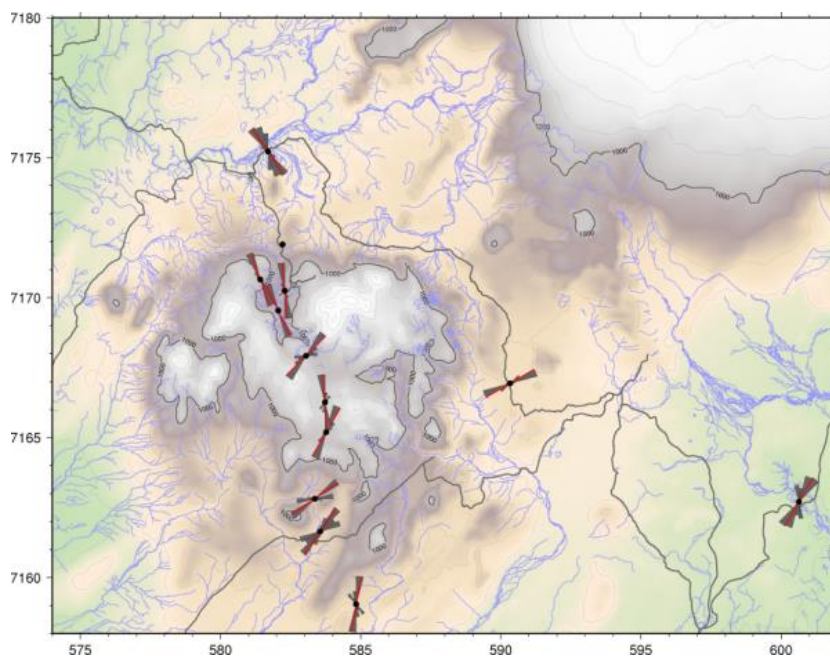
Við útreikning á raffræðilegri strikstefnu er 90° óvissa, þ.e. þegar reiknað er út stefnan, 15°, getur hún allt eins verið -15+90=75°. Þessa stefnu mé einnig reikna út frá sambandi lóðrétts og láréttra þátta segulsviðsins sem er:

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y$$

og T er svonefndur Tipper. Fyrir einvíða jörð er $T_x=T_y=0$; og fyrir tvívíða jörð er hægt að snúa hnitakerfinu þannig að ef x' er í strikstefnu gildir $T_x=0$; og $T_y \neq 0$. Með því að finna það snúningshorn sem hámarkar T_y (eða lágmarkar T_x) má einnig reikna út raffræðilega strikstefnu. Vegna bilaðra segulspóla var aðeins mældur lóðréttur þáttur segulssviðs á fimm mælistöðum (sjá töflu 1). Oft er erfitt að koma fyrir lóðréttum segulspólum í jörð þar sem það þarf að grafa þær niður um 1,5 m til að minnka vindsuð. Eins er styrkur lóðréttu þáttarins lítill miðað við H_x og H_y . Í viðauka MT-2 eru tipper-ferlarnir sýndir. Þar kemur fram að í flestum mælinganna þar sem H_z var mældur eru nothæf gögn í allt að 1–100 sek. Mæling 007 gefur þó léleg gögn á flestum tíðnum. Á mynd 43 er sýnd strikstefnan reiknuð út frá lóðréttu þætti segulsviðsins (TSTRIKE). Mynd 44 sýnir strikstefnu ákvarðaða út frá impedansinum (ZSTRIKE) þar sem tekið hefur verið tillit til TSTRIKE. Myndin sýnir að strikið er nærri því að vera NNA-SSV fyrir mælingar austan og sunnan Kerlingarfjalla sem er í samræmi við jarðfræði gosbeltisins. Eftir mæli-línunni þvert yfir fjöllin breytist stefnan úr NNA-SSV í N-S og verður nokkuð vestan við norður nyrst. Viðnámsdreifingin er því greinilega þrívíð og hæpið að túlka gögnin eftir mæli-línunni með tvívíðu líkani. Byggt á þessum takmörkuðu gögnum væri AV-lína yfir nyrðri hluta fjallanna heppileg lega fyrir tvívíða túlkun en NNV-SSA lega fyrir syðri hlutann.

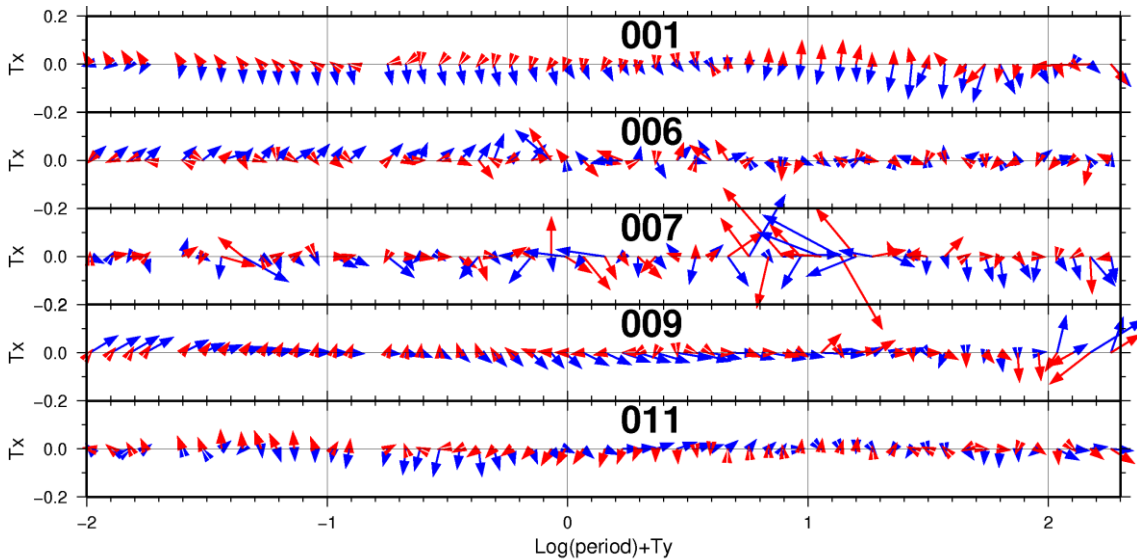


Mynd 43. Raffræðileg strikstefna út frá lóðrétta þætti segulsviðsins. Teiknaður er fjöldi þeirra stefna sem falla innan ákveðins stefnugeira og stærsti geirinn jafngildir 2 km á kortinu (e. rose diagram).



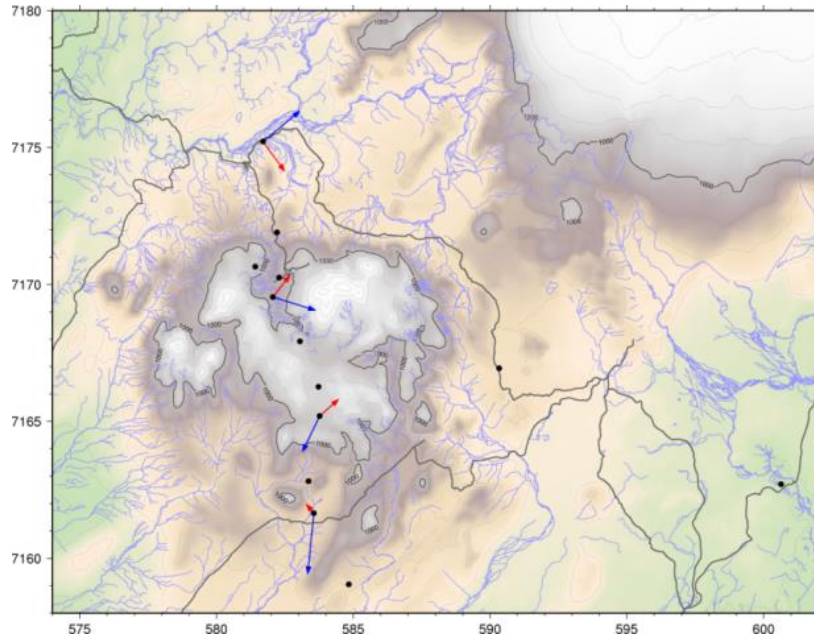
Mynd 44. Raffræðileg strikstefna ákvörðuð út frá impedansinum með hliðsjón af stefnunni ákvarðaðri út frá stefnunni á mynd 43. Teiknaður er fjöldi þeirra stefna sem falla innan ákveðins stefnugeira og stærsti geirinn jafngildir 2 km á kortinu (e. rose diagram). Rauð strik er ákvörðuð meðaltalsstefna.

Svonefndar spanörvar (e. induction arrows) eru teiknaðar á mynd 45 fyrir alla sveiflutíma hvernar mælingar þar sem lóðrétt segulsvið var mælt. Teiknaðar eru tvær örvar, blár örvar fyrir tipper í fasa (real part) og rauðar fyrir tipper úr fasa (imaginary part). Þessar örvar sýna stefnu frá leiðurum, einkum bláu örvarnar sem eru næmari fyrir stórum leiðurum (regional) en þær rauðu eru frekar háðar leiðurum nærri mælistöð (local). Eins og fram kemur á myndinni eru örvarnar fyrir stöð 007 ónothæfar fyrir allar tíðnir. Stöð 006 hefur nothæf gögn upp í um 0,25 s (4Hz). En hinar hafa nothæf gögn allt að 10–100 s.



Mynd 45. Spanörvar (e. induction arrows) fyrir allar mælistöðvar þar sem lóðréttur þáttur segulsviðs er mældur. Bláar örvar eru real-örvar og rauðar tvinntöluörvar. Upphafspunktur hvernar örvar er sveiflutími hennar. X átt er í segulnordur (lóðréttur ás á mynd) og Y í segulaustur (láréttur ás á mynd).

Á mynd 46 eru þessar stefnur teiknaðar fyrir sveiflutíma 0,1 sek. þar sem mælistöð 007 er sleppt. Stefna bláu örvanna er suðlægari fyrir syðstu mælingarnar sem bendir til að mesta leiðnin sé norðan við þær, þ.e. í Kerlingarfjöllunum. Í mælingu 009 er stefnan austlæg sem bendir til leiðara vestan við mælinguna og í nyrstu mælingunni er stefnan NA sem bendir til leiðara suðvestan við þessa mælingu. Fjöldi þeirra mælinga þar sem til er nothæfur, lóðréttur þáttur segulsviðsins er í raun of lítill til að hægt sé að byggja of mikið á þessum niðurstöðum þar sem viðnámsbreytingar nærri mælistöðinni geta haft veruleg áhrif. Spanörvar nýtast best þar sem þær eru til í mörgum stöðvum á stóru svæði þar sem hægt er að líta heildrænt á niðurstöður þeirra.



Mynd 46. Spanörvoar fyrri sveiflutíma 0,1 sek. Blár örvoar eru í fasa (real) og þær rauðu úr fasa (imaginary). Einingarörin jafngildir 25 km á kortinu. Lengdarásar kortsins eru UTM-hnit í km.

Eins og sést á mynd 41 (og viðauka MT-2) skiptir stefna MT-mælinganna verulegu máli og geta xy- og yx-ferlarnir verið mjög mismunandi sem þýðir að túlkun þeirra getur gefið mjög mismunandi niðurstöðu. Eins skiptir máli í hvaða átt impedansinum er snúið. Því er oft notast við impedans sem er óháður snúningsstefnu við einvíða túlkun mælinga. Hér er notast við svonefndan „determinant impedance“ skilgreindan sem:

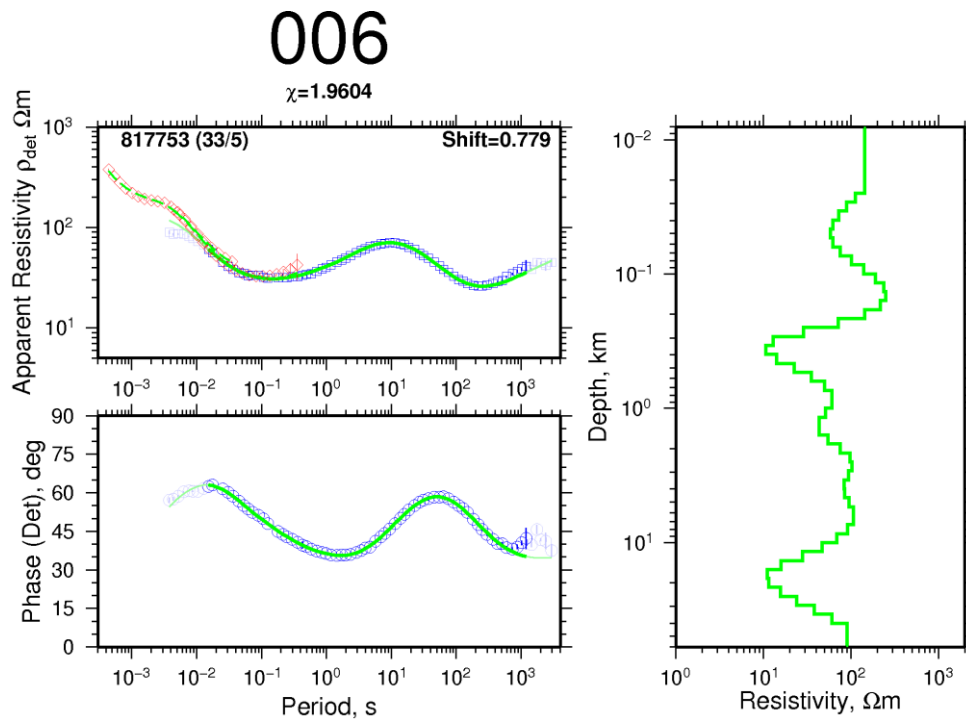
$$Z_{\text{det}} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}$$

og út frá honum skilgreint sýndarviðnám og fasi á sama hátt og áður, sem eru þá óháð stefnu. Til eru aðrar skilgreiningar á snúningsóháðum impedans en af ástæðum sem ekki verða raktar hér er ofangreind skilgreining notuð sem einskonar meðaltal-impedans. Rétt er að áréttu að einvíð túlkun á tví- eða þrívíðum gögnum er aldrei fullnægjandi til að skýra mæld gögn en verður látið nægja hér þar sem tví- og/eða þrívíð túlkun er mun erfiðari og dýrari.

Einvíð túlkun mælinganna felst í því finna líkan hvers svörun samræmist sem best mældum gögnum. Jafnframt þarf að leiðrétta MT-gögnin fyrir svokölluðum hliðrunar-áhrifum (e. telluric shift) sem stafa af viðnámsóreglum nærri yfirborði og hafa áhrif á mælt rafsviðið. Slíkt kemur fram í sýndarviðnámsferlum sem hliðrun upp eða niður þegar viðnámið er teiknað á lógaritmískum skala. Dæmi um slíka einvíða túlkun er sýnd á mynd 47. Á myndinni eru MT-gögnin sýnd með bláum hringjum og TEM-gögnin með rauðum tígulum. Tími frá straumrofi í TEM-gögnunum hefur verið breytt í sveiflutíma samkvæmt aðferð kenndri við Sternberg (Sternberg o.fl., 1988). Þeir MT-mælipunktar sem ekki eru notaðir við túlkunina eru sýndir með ljósbláum lit. Samtúlkun MT- og TEM-gagnanna er gerð með svonefndri OCCAM-aðferð þar sem leitast er við að finna einvitt viðnámslíkan sem gefur svörun sem passar við gögnin en jafnframt hefur líkanið sem minnstar breytingar í viðnámi á milli laga („lámarks strúktúr“). Þetta er gert með

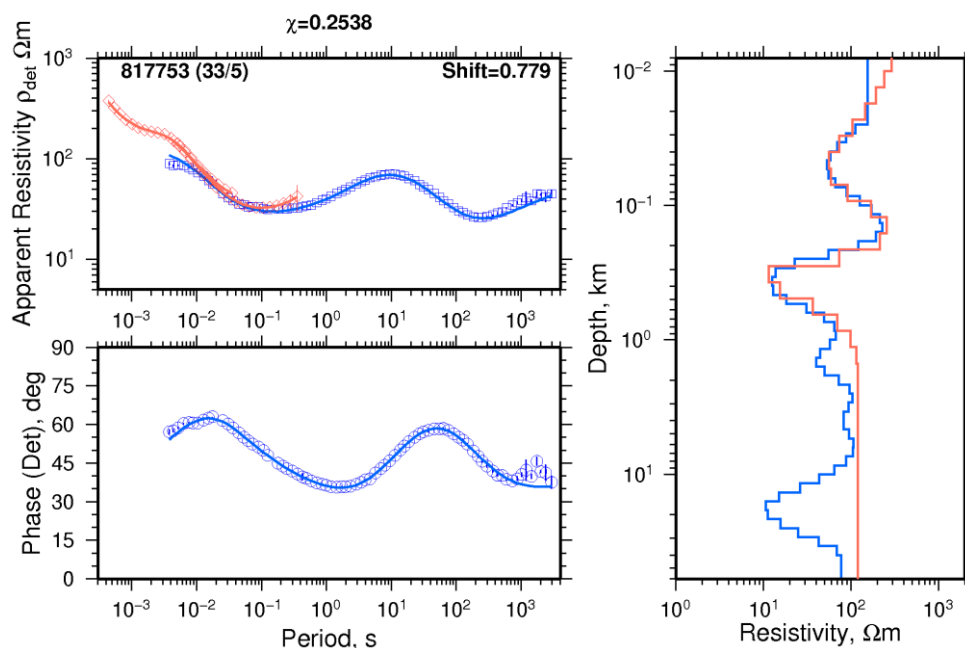
„samfelldu“ viðnámslíkani sem nálgast er með mörgum viðnámslögum. Svörun líkansins er sýnd með grænum ferlum á viðnáms- og fasamyndunum og falla vel að mældum gögnum. Sýndarviðnámsferill MT-gagnanna er hliðraður um fastann 0,779 á lógaritmískum skala (þ.e. $\rho_{hliðrð} = \rho_{mælt} / 0.779$) en með því gildi fæst „besta“ samræmið á milli MT- og TEM-gagnanna. Samtúlkunin gefur viðnámsgerð með tveimur lágviðnámslögum. Annars vegar er lágt viðnám ($\sim 10 \Omega\text{m}$) með miðju á 300–400 m dýpi og hins vegar er svipað lágt viðnám með miðju á um 17 km dýpi.

Á mynd 48 er sýnd túlkun beggja gagnasettanna óháð hvort öðru þar sem notað er áður nefndur hliðrunarstuðull fyrir MT-gögnin. Myndin sýnir góða samsvörun gagnasettanna niður á tæplega 1 km dýpi en TEM-gögnin skynja ekki viðnámið dýpra. Einvíð túlkun allra mælinganna er sýnd í viðauka MT-3 með samvarandi myndum og sýndar eru á myndum 47 og 48. Yfirleitt er góð samsvörun milli MT- og TEM-gagnanna en ekki næst alltaf að skýra öll gögn með sama einvíða líkaninu (sjá hér á eftir).



Mynd 47. Túlkun mælingar 006. Bláir hringir eru determinant MT-gögn, sýndarviðnám og fasi og eru þau gögn sem ekki voru notuð í túlkuninni sýnd með ljósbláum lit. Rauðir tíglar eru TEM-gögn þar sem tíma frá straumrofi hefur verið breytt í sveiflutíma. Svörun líkansins til hægri er sýnd með grænum ferlum vinstra megin, bæði fyrir MT og TEM. Heiti TEM-mælingarinnar kemur fram í efra, vinstra horni sýndarviðnámsmyndarinnar ásamt fjarlægð milli MT- og TEM-mælingar (33 m) og hæðarmun þeirra (5 m). Hliðrunarstuðull MT-mælingarinnar er 0,779. χ er mælikvarði á hversu vel svörun einvíða móðelsins passar við mæld gögn.

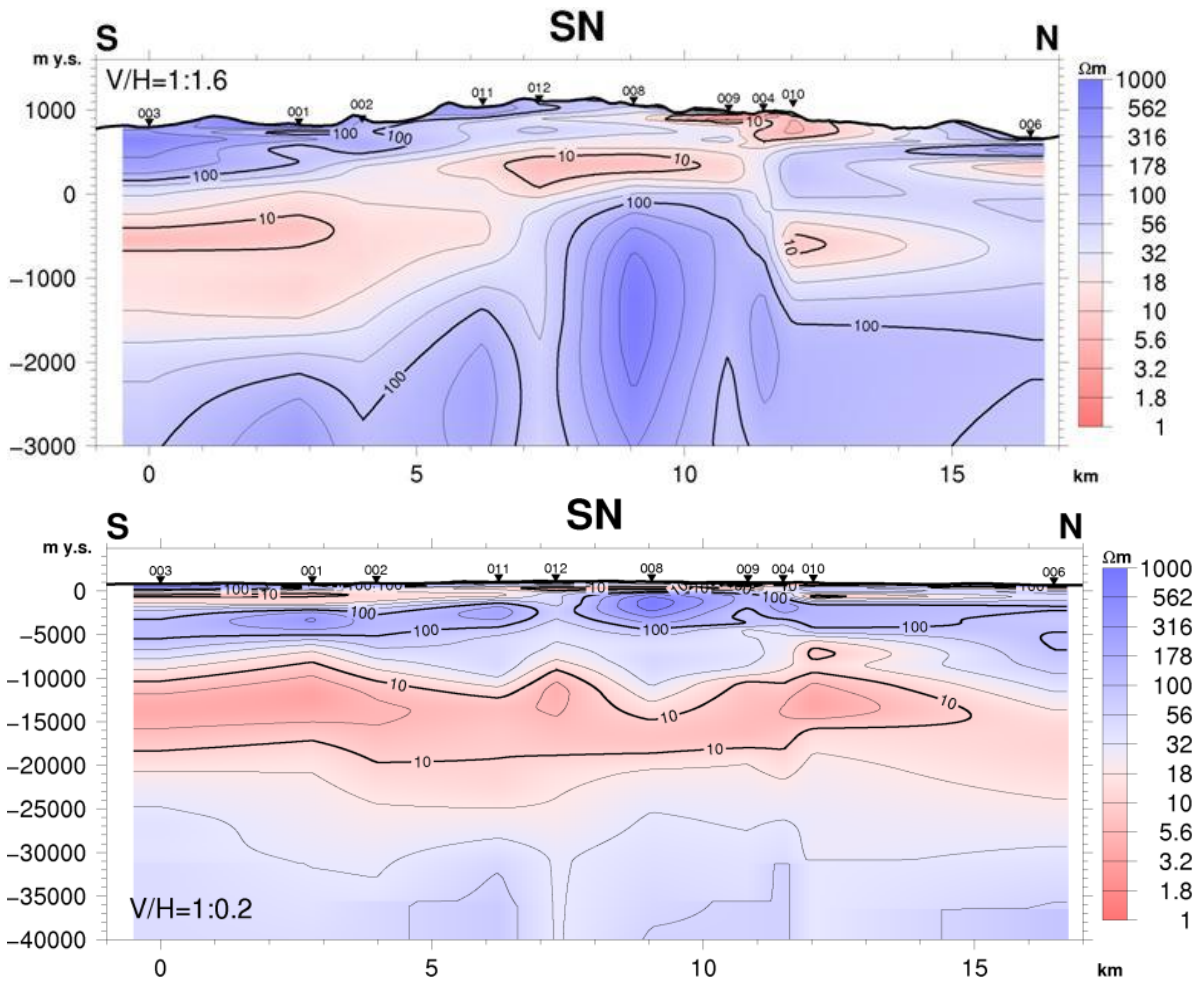
006 817753



Mynd 48. Óháð túlkun TEM- og MT-gagnanna. Rauða viðnámslíkanið hægra megin á myndinni er besta túlkun TEM-gagnanna eingöngu og það bláa er túlkun MT-gagnanna.

6.3 Viðnámsnið MT-mælinganna

Einviðu viðnámslíkönin eru sett saman í viðnámsnið eftir NS-mælilínunni á mynd 49 þar sem það er sýnt annars vegar frá yfirborði og niður á þriggja km dýpi undir sjávarmáli og hins vegar niður á 40 km dýpi, sem er um það bil dýptarskynjun MT-mælinganna. Fram koma tvö lágviðnámslög. Viðnám efra lagsins er 5–10 Ωm , miðja þess er á um ríflega 1 km dýpi syðst (~500 m undir sjávarmáli) og grynnkar á þetta lag norðar þar sem það er á 500–800 m dýpi (~500 m yfir sjávarmáli). Í mælingum 004, 006, 008 og 010, þ.e. á svæðinu sunnan við Ásgarð, nær þetta lag alveg upp að yfirborði og viðnámsgerðin í efstu hundruð metrunum greinilega mjög flókin á því svæði enda er mikil yfirborðsjarðhitavirkni þar. Að öllum líkindum má skýra þetta lágviðnámslag á sama hátt og á öðrum háhitasvæðum þar sem samskonar leiðara (lágviðnámskápu) er að finna á svipuðu dýpi og stafar af velleiðandi ummyndunarsteindum (zeólítum og smektíti) svo og vaxandi viðnám (háviðnámskjarna) neðar vegna hækkandi hita þar sem torleiðandi ummyndunarsteindir taka við (klórít, epitót). Marka því þessi skil hitaflöt sem er um 240°C, eða hefur verið það á einhverjum tíma (Knútur Árnason o.fl., 2000).



Mynd 49. Samsett viðnámsnið úr einviðum túlkunum mælinganna á SN-línunni þvert yfir Kerlingarfjöllin (sjá mynd 1). Efri myndin sýnir staðsetningu efra lágviðnámslagsins þar sem dýptarskalinn nær niður í 3 km undir sjávarmáli og sú neðri sýnir staðsetningu neðra lágviðnámslagsins með dýptarskala niður í 40 km.

Neðra, djúpstæða lágviðnámslagið er á um 10–20 km dýpi (~10 Ωm jafnviðnámsflötur) og miðja lagsins á 13–18 km dýpi. Dýpst er á lagið nyrst eftir mælinunni þar sem viðnáms þess er einnig lægst. Slíkt lágviðnámslag finnst á svipuðu dýpi víðast hvar undir Íslandi þar sem MT-mælingum hefur verið beitt. Þar sem MT mælingum hefur verið beitt á háhitasvæðum sést að neðra lágviðnámslagið hvelfist upp undir jarðhitakerfin og er þess vegna talið vera vísbending um hitauppstreymi í kerfin. Lagið hvelfist aðeins upp undir mælingum 012 (Efri-Hveradalir) og 004 og 010 (Neðri-Hveradalir) en taka verður tillit til að mælingar eru fáar og því erfitt að telja sem örugga vísbendingu um uppstreymi hita. Þetta lag hefur stundum verið skýrt með hlutbráð en aðrar jarðeðlisfræðilegar niðurstöður benda til að hitinn á þessu dýpi sé ekki nægjanlegur til að búast megi við bráðnu bergi. Skýringar á eðli þessa lags eru því enn ekki fyrir hendi en líklegast má tengja það við hita og einhvers konar vökva.

6.4 Athugasemdir varðandi samtúlkun MT- og TEM-mælinga

Í flestum tilvikum gengur samtúlkun MT- og TEM-mælinga vel, þ.e. að hægt er að finna einvítt viðnámslíkan sem svörun mæliferla beggja mælinganna. Í einstaka tilvikum gengur það þó ekki og á það við um MT/TEM-mælipörin 008/892680 og 010/814709. Hér verður því farið nánar í samtúlkun þeirra.

Ekki er reyndist unnt að túlka MT-mælingu 008 og TEM-mælingu 892680 með sama einvíða líkaninu þar sem ósamræmi var á milli dýpri svörunar TEM-mælingarinnar og grunnsvörunar MT-mælingarinnar. Með því að sleppa hátíðnihluta MT-mælingarinnar í samtúlkuninni, eins og sýnt er á mynd í viðauka, reyndist unnt að túlka mælingarnar saman. Önnur leið við túlkun hefði verið að sleppa hæstu 10 tímunum í TEM-mælingunni, sem þýðir að viðnámsferillinn hefði hliðrast upp á við og túlkast þá lægra viðnámslagið með miðju á um 25 km dýpi sem er í ósamræmi við nærliggjandi mælingar. Greinilegt er að þessar tvær mæliaðferðir sjá ekki samskonar einvíða viðnámsgerð í efsta kílómetranum þó svo að aðeins 55 m séu á milli mælinganna. Líklegast stafar þetta af flókinni viðnámsgerð nærri yfirborði sem ekki er hægt að túlka með einvíðu líkani. Svipuð vandamál voru við samtúlkun á MT-mælingu 010 og TEM-mælingu 814709. Með því að sleppa verulegum hluta af hátíðnihluta MT-mælingarinnar er hægt að samtúlka mælingarnar eins og hér er gert. Einnig kom til greina að sleppa seinustu punktunum í TEM-mælingunni og fá þannig samræmi í þessar tvær mælingar en sú lausn hefði gefið miðju á neðra lágviðnámslagið á um 8 km dýpi sem er mun grynna en í öðrum nærliggjandi mælingum. Niðurstöðum einvíðrar túlkunar þessara tveggja MT-mælinga (008 og 010) verður því að taka með varúð.

Í MT-mælingu 005 mistókst mælingin á NS-rafsviðsþættinum og er því einungis hægt að nota yx-þáttinn í túlkuninni og því eru ekki túlkuð sambærileg gögn í þessari mælingu og öðrum mælingum. Þess vegna er túlkun þessarar mælingar sleppt á viðnámsniðinu á mynd 49.

MT-mæling 007, sem er staðsett austan við Kerlingarfjöll, gefur einnig tvö lágviðnámslög, annað með miðju á um 1 km dýpi og hitt á um 15 km dýpi sem er svipað og sýnt er á NS-viðnámsniðinu á mynd 49. Túlkun á MT-viðmiðunarmælistöðinni (númer 999), sem er gerð án leiðréttingar með TEM-mælingu, sýnir einnig tvö lágviðnámslög, þ.e. lágviðnámskápuna og djúpstæða lágviðnámslagið, en á heldur meiri dýpi en á áður nefndu NS-viðnámsniði.

7 Samandregnar niðurstöður

- Við mat á stærð háhitakerfa er stuðst við viðnámsmælingar. Miðað er við flatarmál þess flatar sem lágviðnámskápan umlykur á 800–1000 m dýpi undir yfirborði. Hér er miðað við 200 m h.y.s. (mynd 17). Rétt þykir að undanskilja svæðið við Þverfell þar sem ekki er vitað um hitaástand þess. Stærð jarðhitakerfisins í Kerlingarfjöllum samkvæmt þessu mati er nálægt 30 km².
- Lágviðnámskápan nær yfirborði í Efri- og Neðri-Hveradölum, enda sést þar mjög mikil háhituummyndun. Yfirborðsummerki eru minni um sig í Hverabotni en þar er lágviðnámskápan á 250–300 m dýpi. Efnahitamælar gefa til kynna að mestur hiti sé undir Hverabotni og minnstur í Efri-Hveradölum (Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, 2005). Háviðnámskjarninn er allur samfelldur en þó eru vísbendingar um skil á milli Efri- og Neðri-Hveradala á svæðinu sunnan Fannborgar. Þar eru mælingar sem sýna lágt viðnám niður á 1000 m dýpi líkt og mælingar í útjaðri jarðhitakerfisins. Ekki er hægt að segja til um hversu langt inn í jarðhitakerfið þessi skil ná þar sem ekki er hægt að koma við mælingum hæst í Kerlingarfjöllum. Ekki er að sjá í viðnámsmælingunum nein skil á milli Neðri-Hveradala og Hverabotns.
- Lágviðnámslag, sem teygir sig frá lágviðnámskápunni lárétt til norðurs á 300–400 m dýpi norðan Kerlingarfjalla, er túlkað sem volgt afrennsli (sjá snið NS580, NS581 og NS582). Tvær borholur við Ásgarðsá gefa mikið magn af 30–35°C heitu vatni sem nýtt er til baða og í heita potta.
- MT-mælingarnar eru aðeins eftir einu NS-sniði í gegnum jarðhitakerfið. Þær sýna tvö lágviðnámslög; lágviðnámskápuna í yfirborði í jarðhitakerfinu og dýpkandi á hana niður á 1 km dýpi út frá því, svo og lágviðnámslag á 10–15 km dýpi. Slíkt lágviðnámslag finnst á svipuðu dýpi víðast hvar undir Íslandi og hefur stundum verið skýrt með hlutbráð en aðrar jarðeðlisfræðilegar niðurstöður benda til að hitinn á þessu dýpi sé ekki nægjanlegur til að búast megi við bráðnu bergi. Skýringar á tilvist þessa lags eru því enn óþekktar en líklegast má tengja það við hita og einhvers konar vökva.
- Þar sem MT-mælingum hefur verið beitt á háhitasvæðum sést að grynna er á lágviðnámslagið undir jarðhitakerfunum en utan þeirra. Talið er að þetta djúpstæða lágviðnámslag gefi til kynna hvar hitauppstreymi er að finna í jarðhitakerfin. Eitt snið í gegnum jafn flókið svæði og Kerlingarfjöll gefur aðeins hugmynd um dýpi niður á djúpstæða lágviðnámið. Til að fá hugmynd um legu þess og hvar hugsanleg uppstreymi eru þarf þéttara mælinet. Þó má segja að það virðist dýpka á lagið til norðurs frá Kerlingarfjöllum en heldur óljósara til suðurs.

8 Heimildir

Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson (2005). *Kerlingarfjöll. Könnun og kortlagning háhitavæðisins*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2005/012. 60 s. + kort.

Knútur Árnason, Ragna Karlsdóttir, Hjálmar Eysteinnsson, Ólafur G. Flóvenz og Steinar Þór Guðlaugsson (2000). The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland. Erindi flutt á ráðstefnu IGA, *World Geothermal Congress í Japan 2000*. Birt í ráðstefnuriti.

Ólafur G. Flóvenz, Erik Spangenberg, Johannes Kulenkamff, Knútur Árnason, Ragna Karlsdóttir og Ernst Huenges (2005). The role of electrical interface conduction in geothermal exploration. Erindi flutt á ráðstefnu IGA, *World Geothermal Congress, í Tyrklandi 2005*. Birt í ráðstefnuriti.

Ragna Karlsdóttir og Arnar Már Vilhjálmsson (2006). *Hveravellir. TEM-mælingar 2006*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2006/049. 52 s.

Viðauki
Mæliferlar og túlkun þeirra

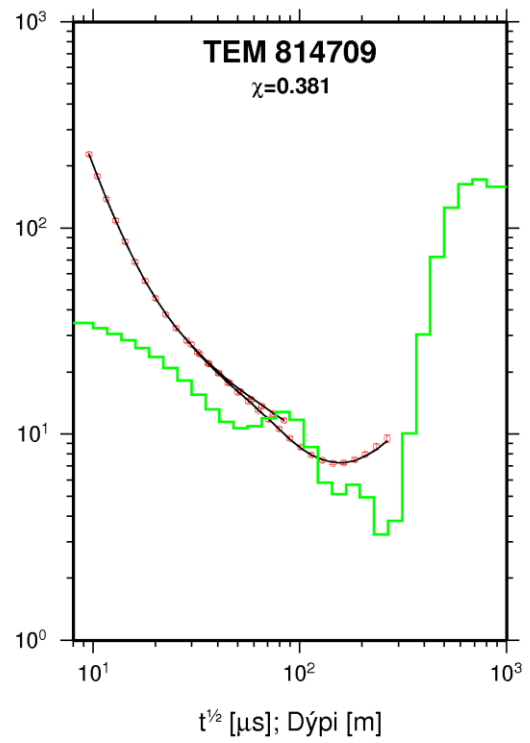
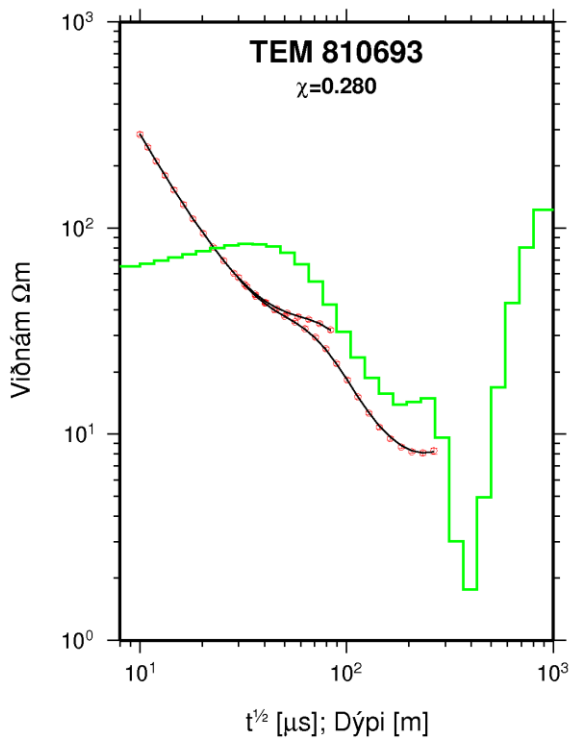
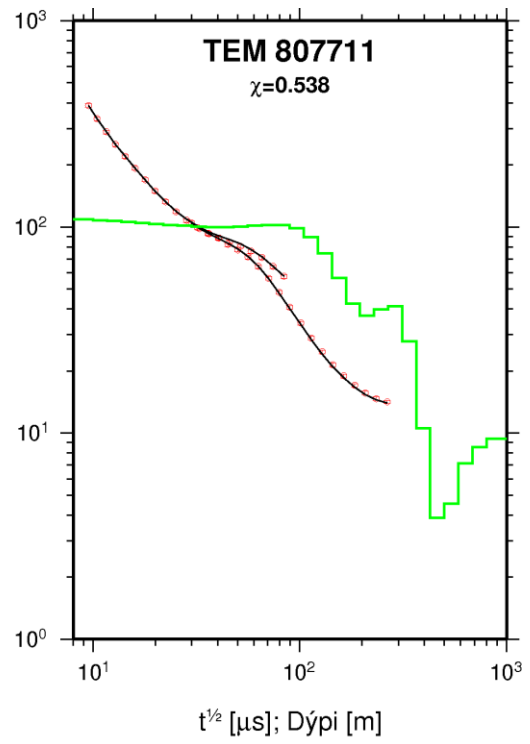
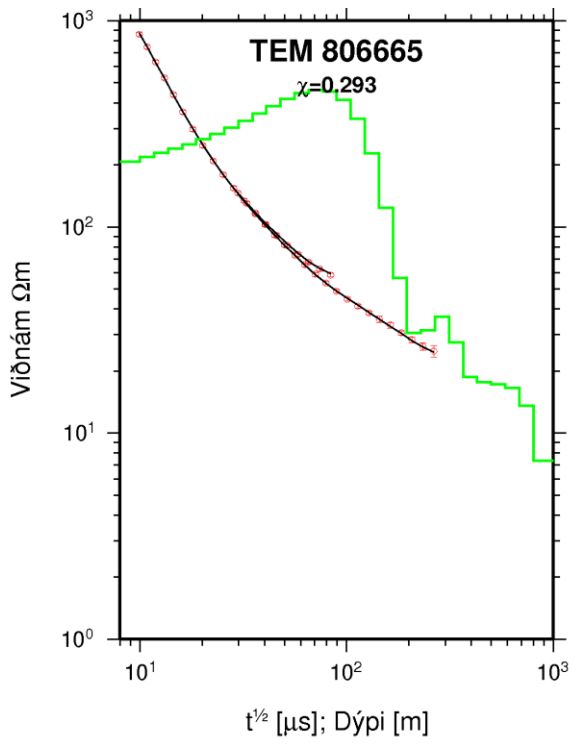
TEM

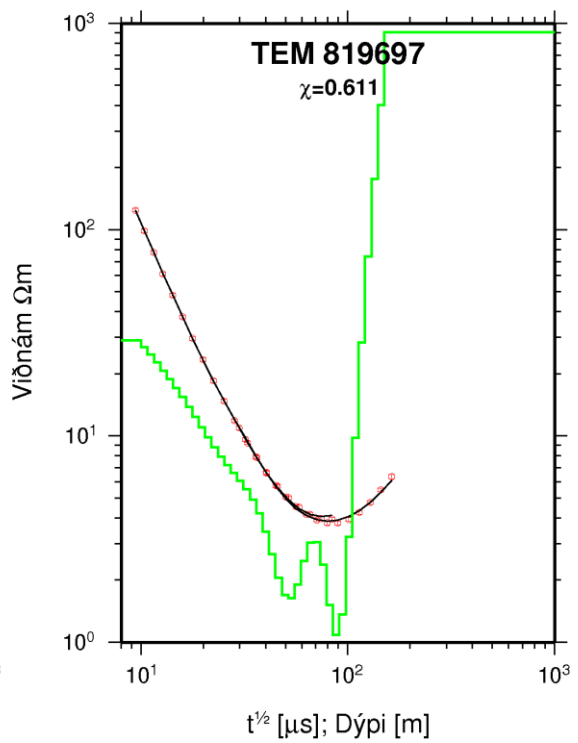
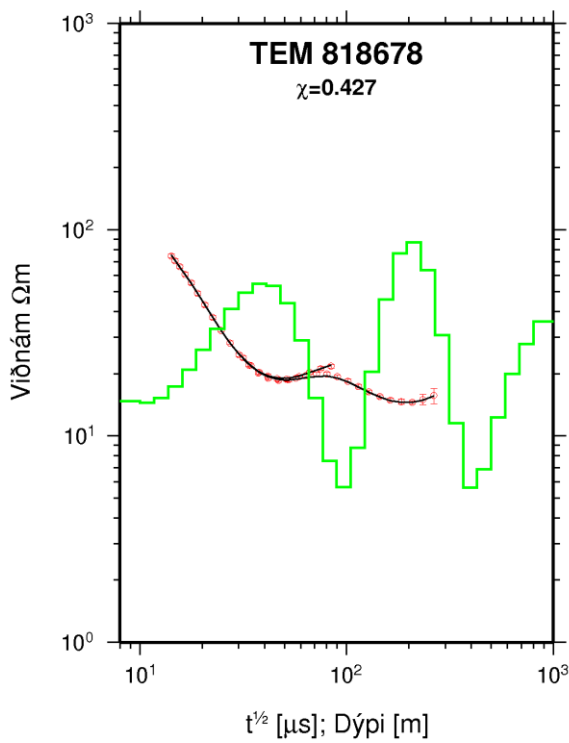
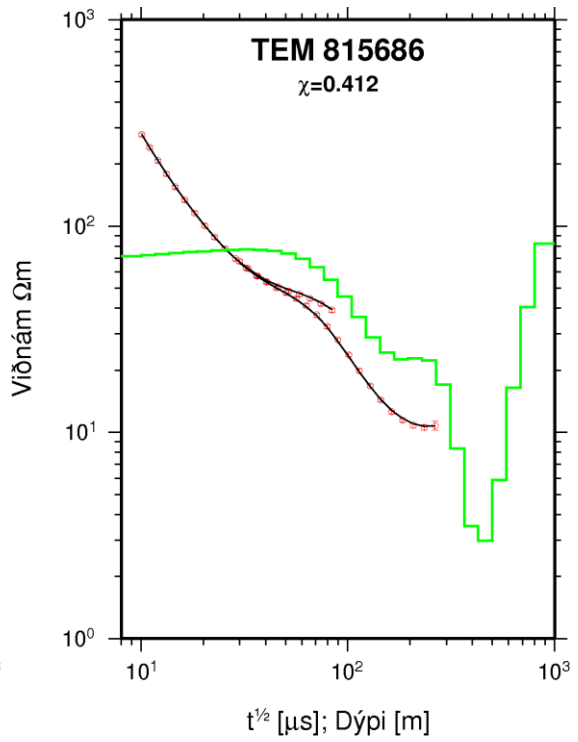
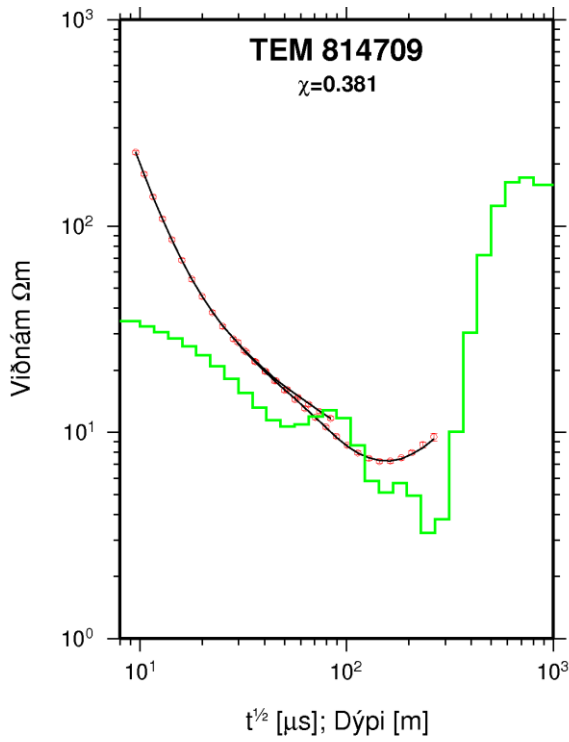
MT-1

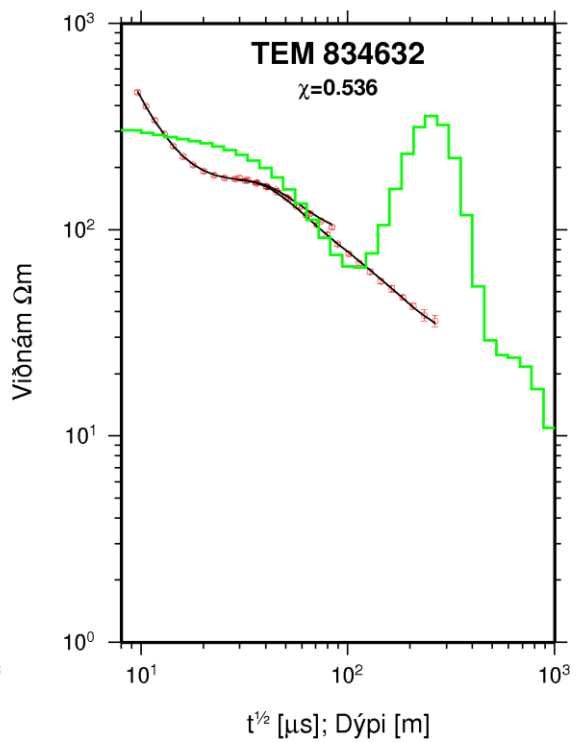
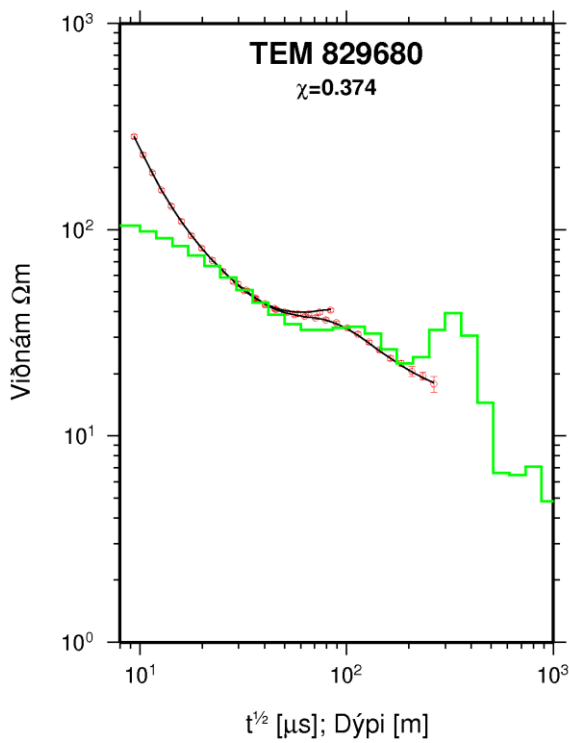
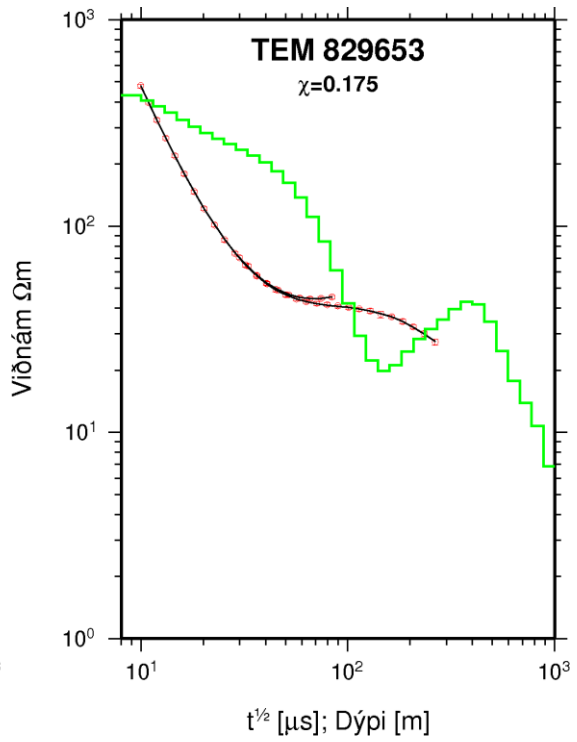
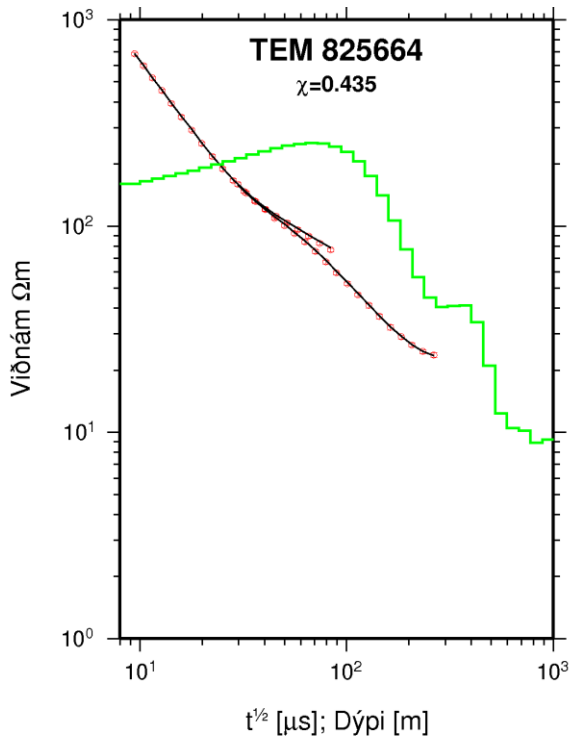
MT-2

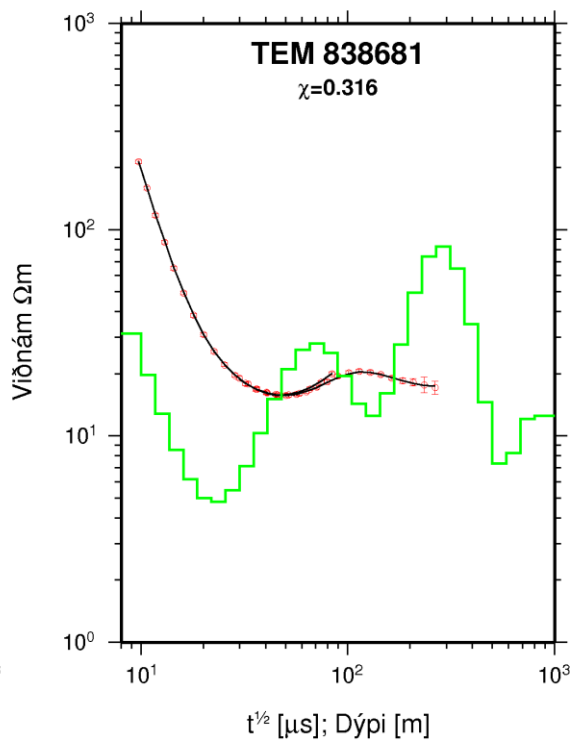
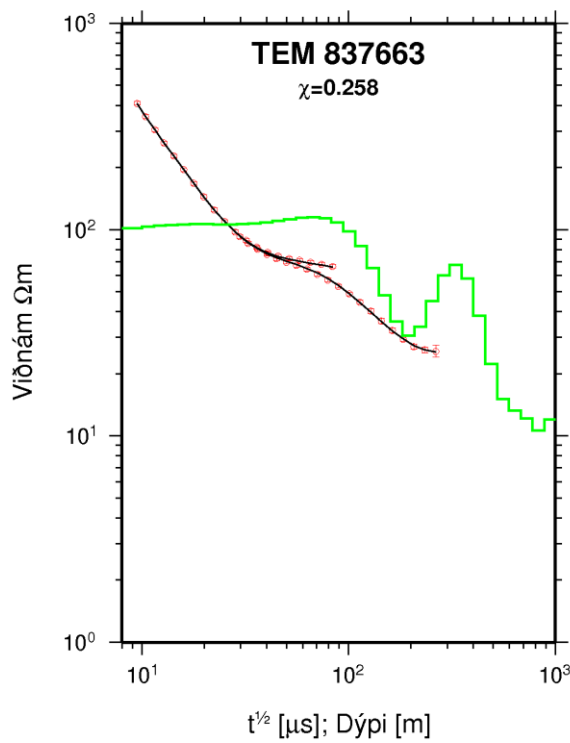
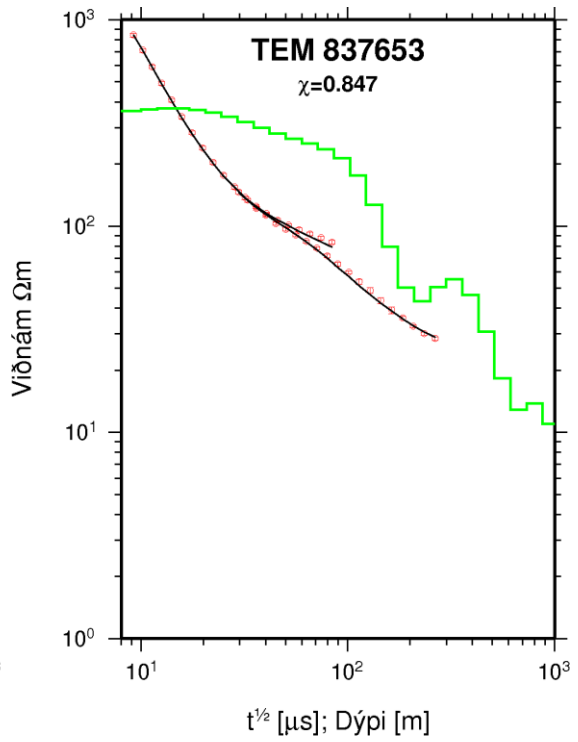
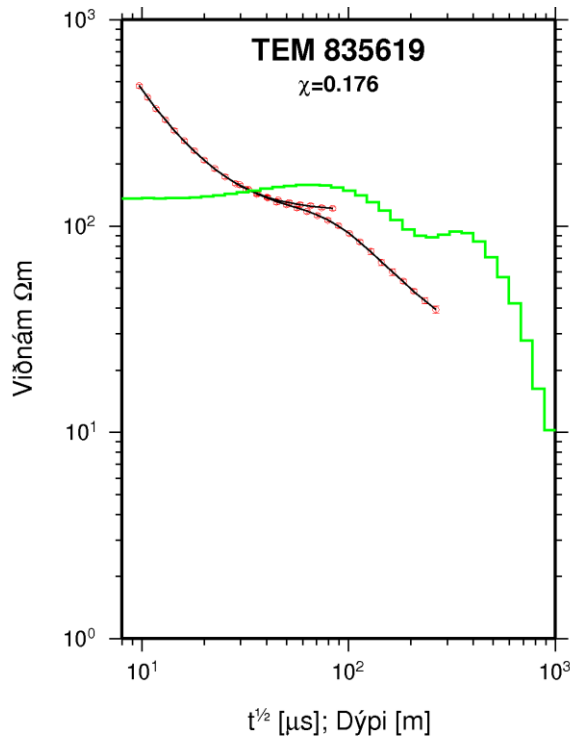
MT-3

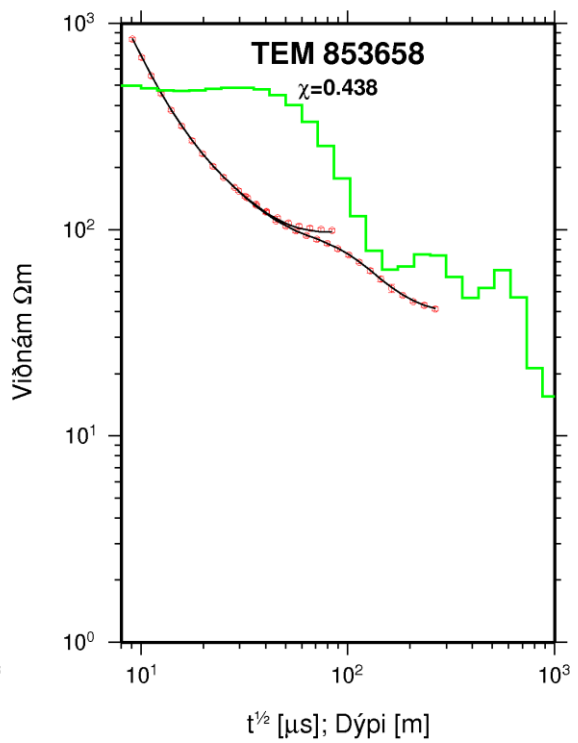
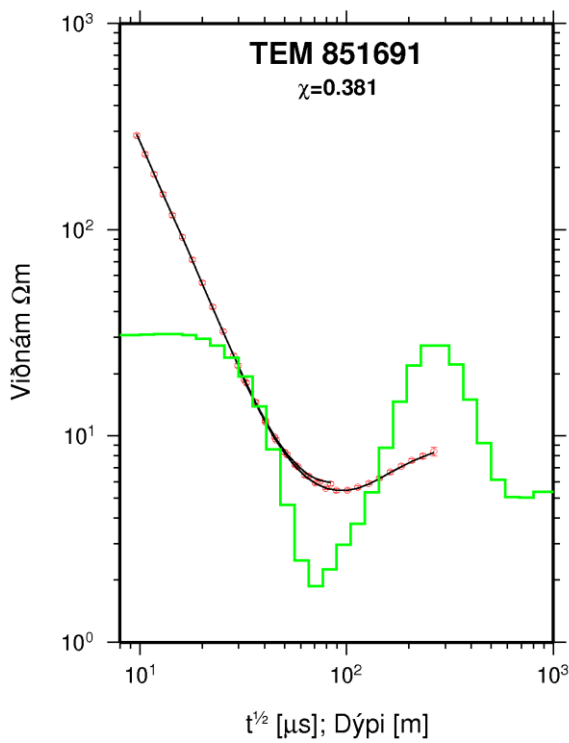
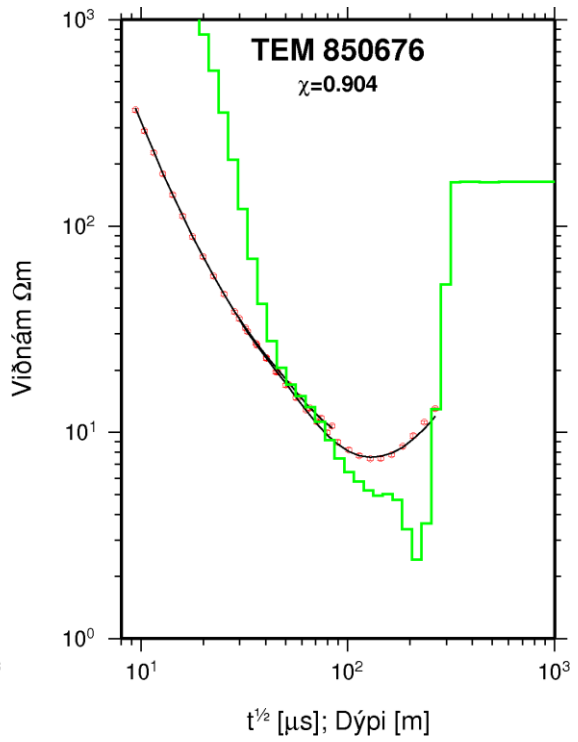
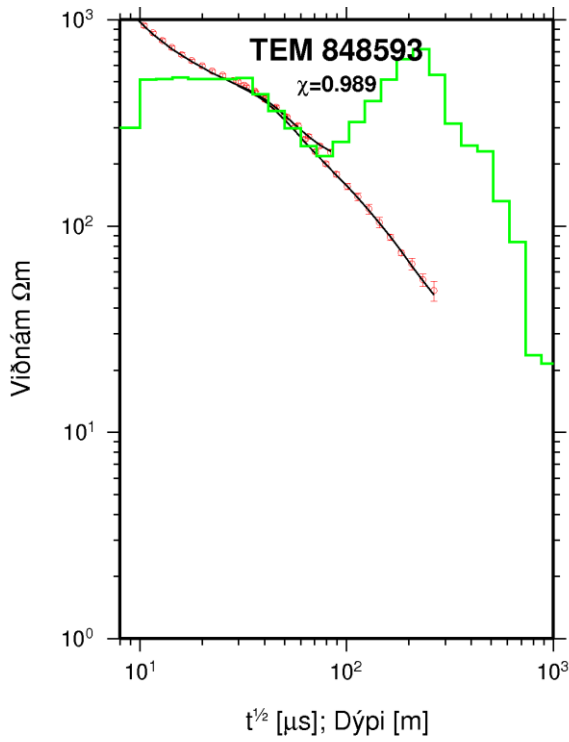
TEM

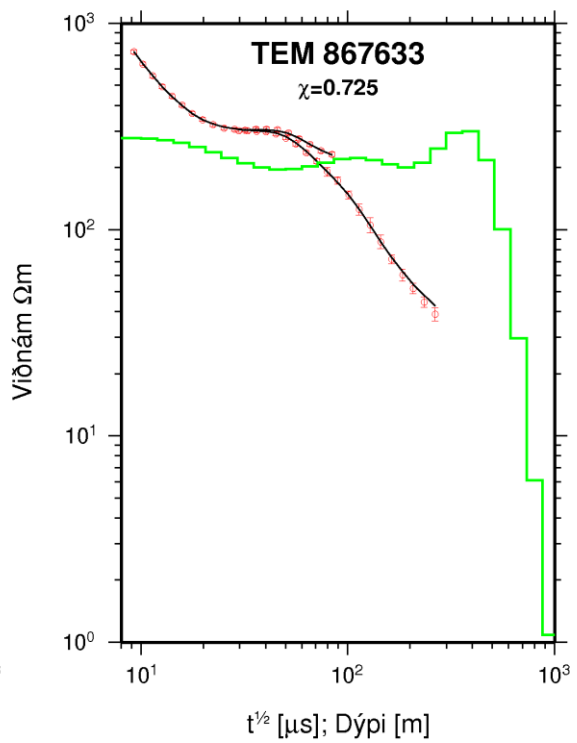
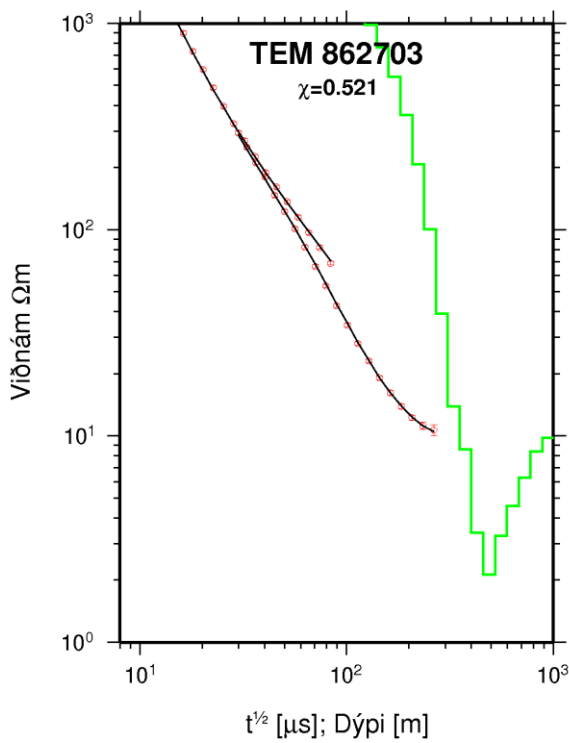
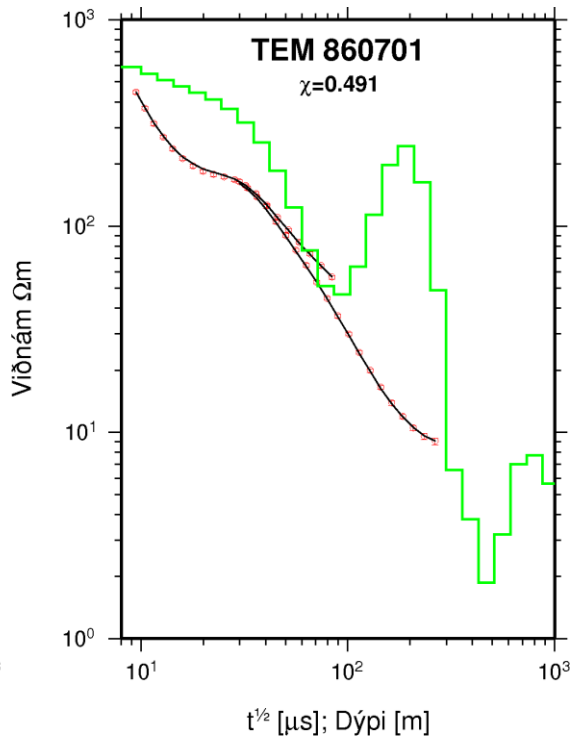
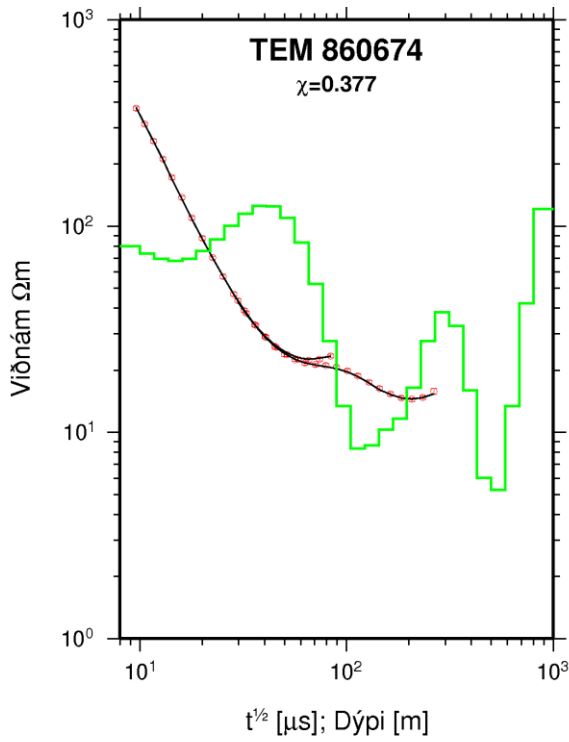


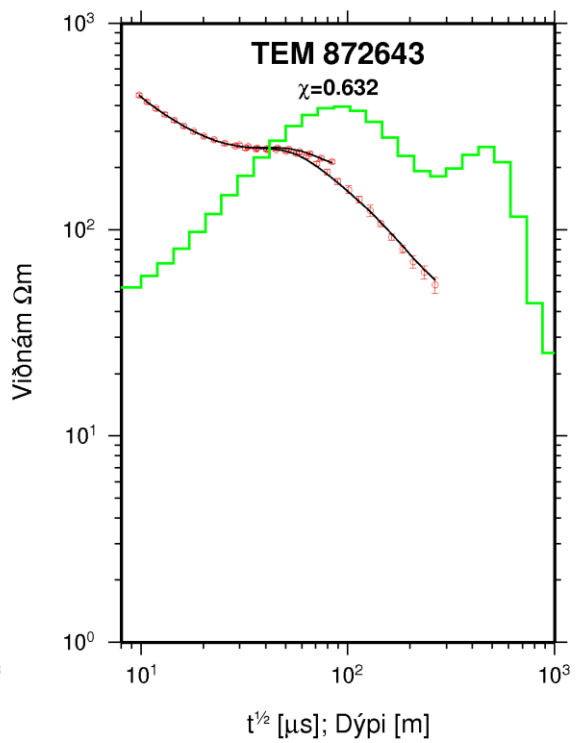
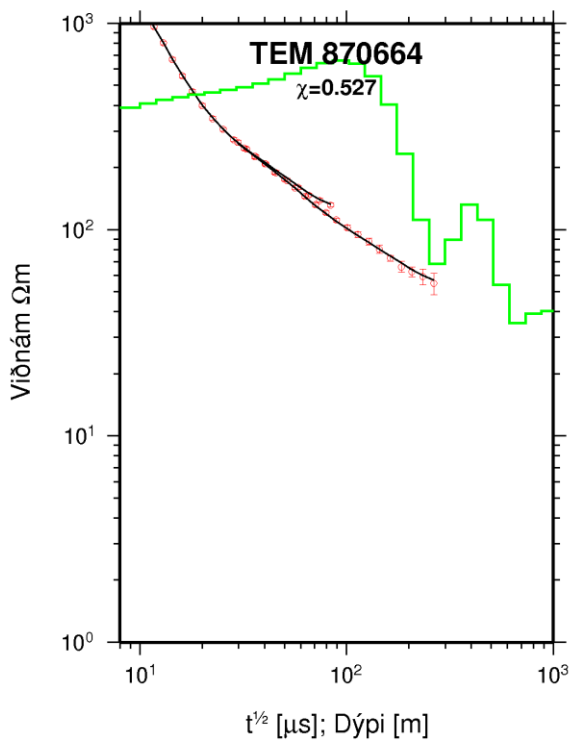
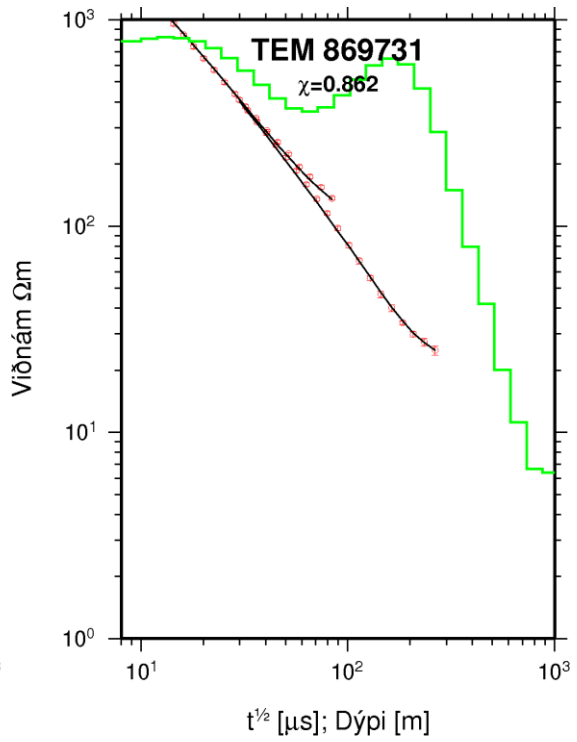
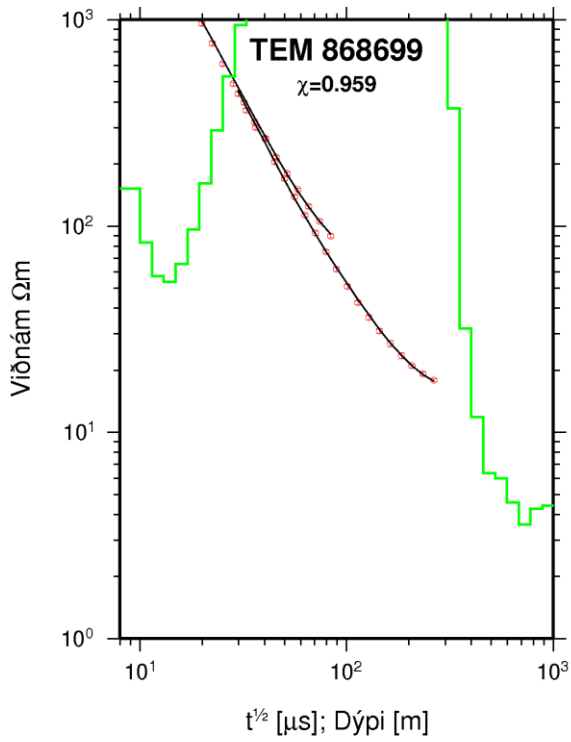


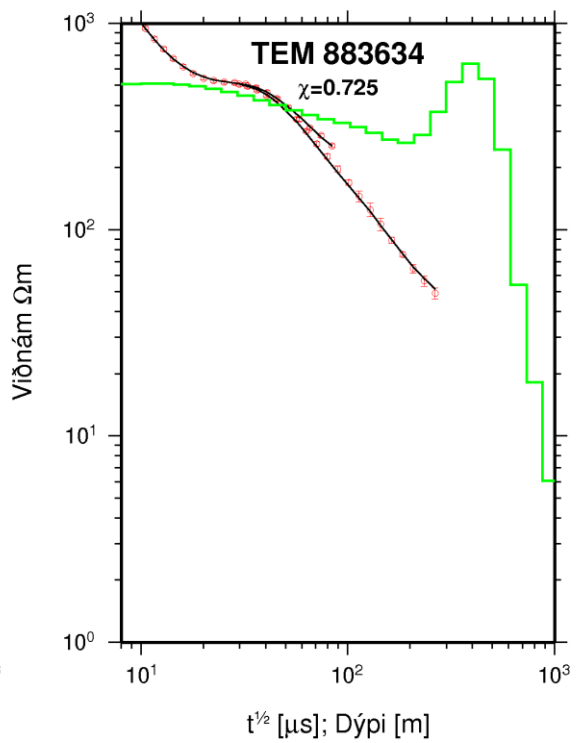
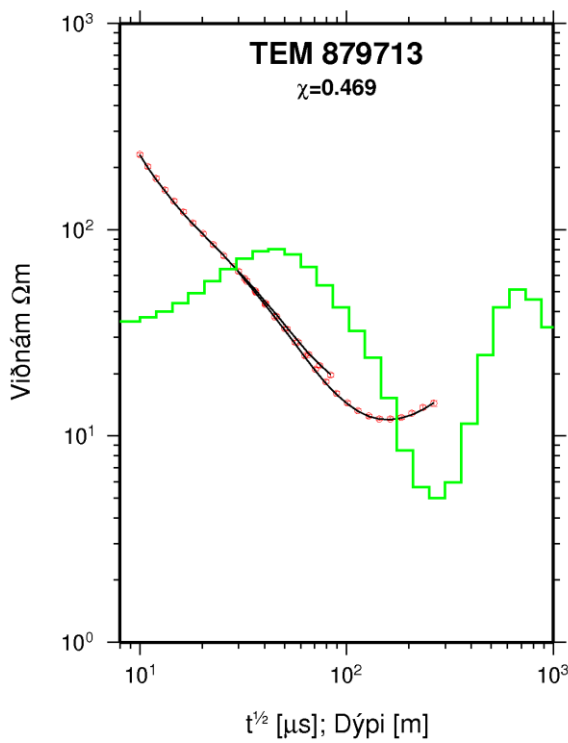
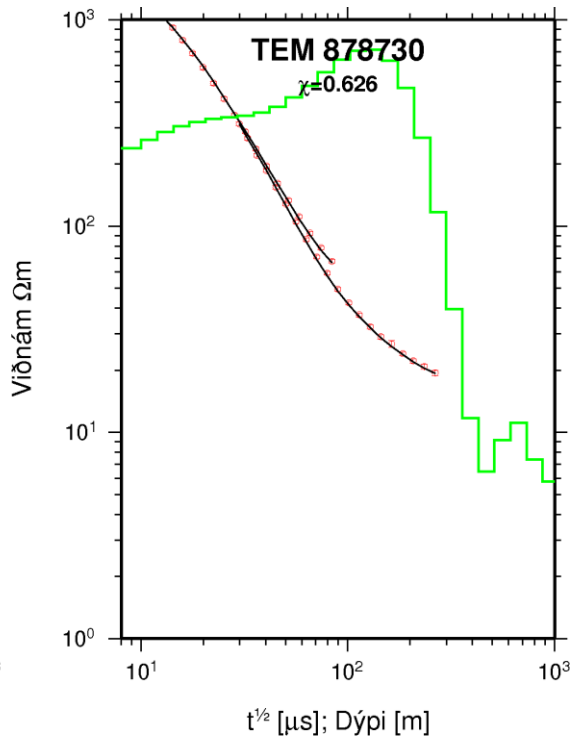
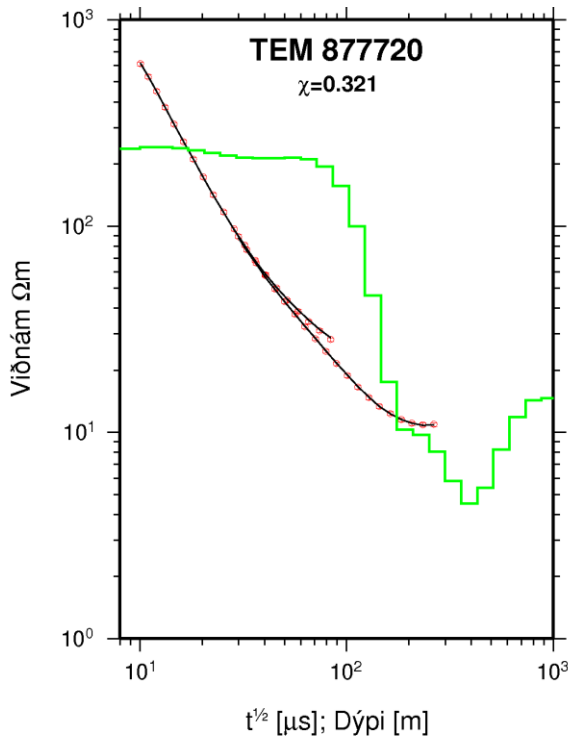


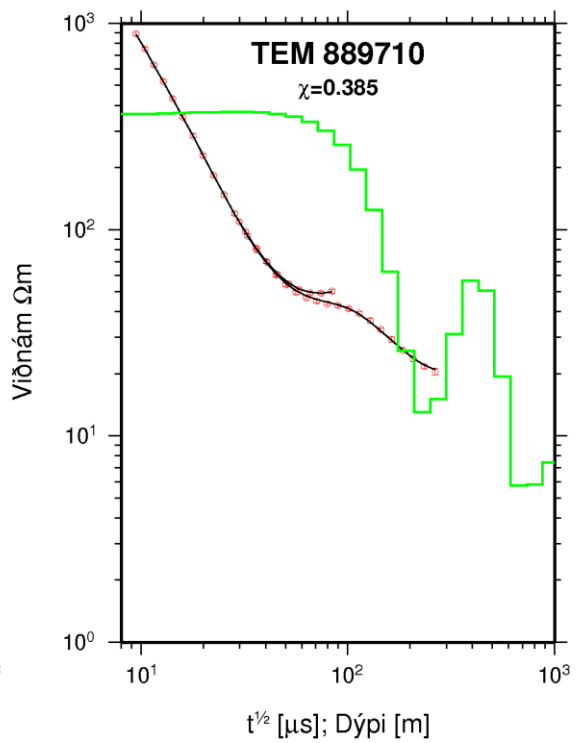
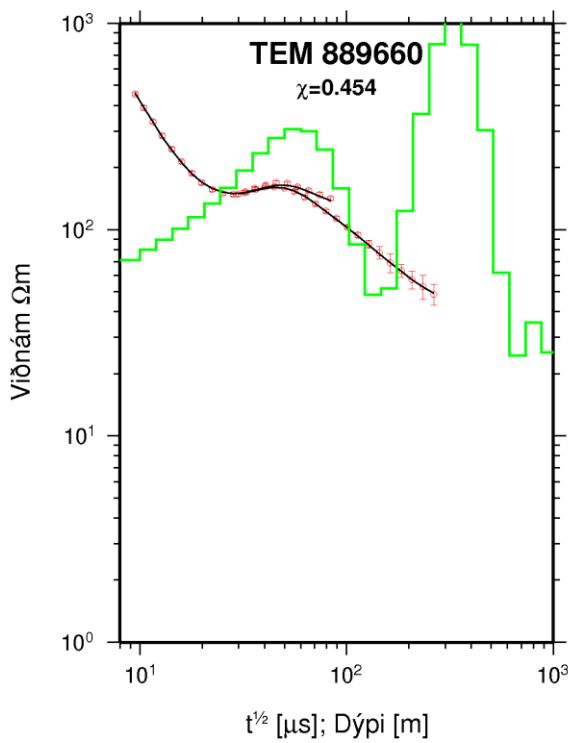
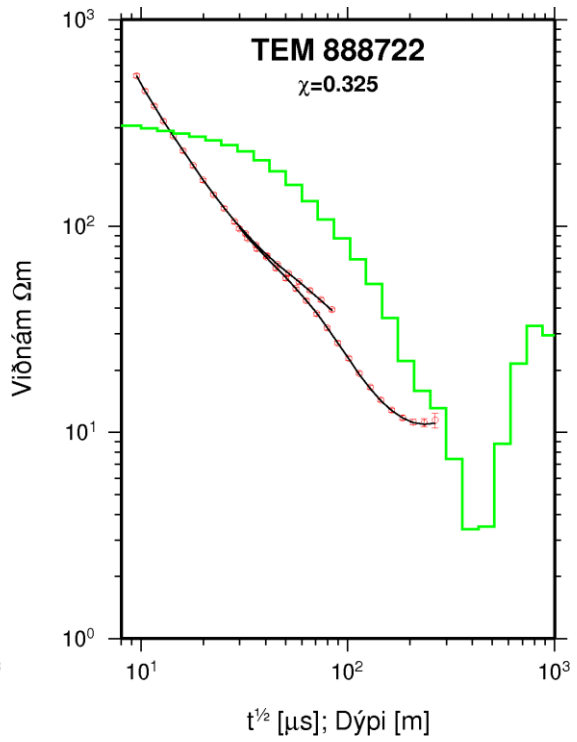
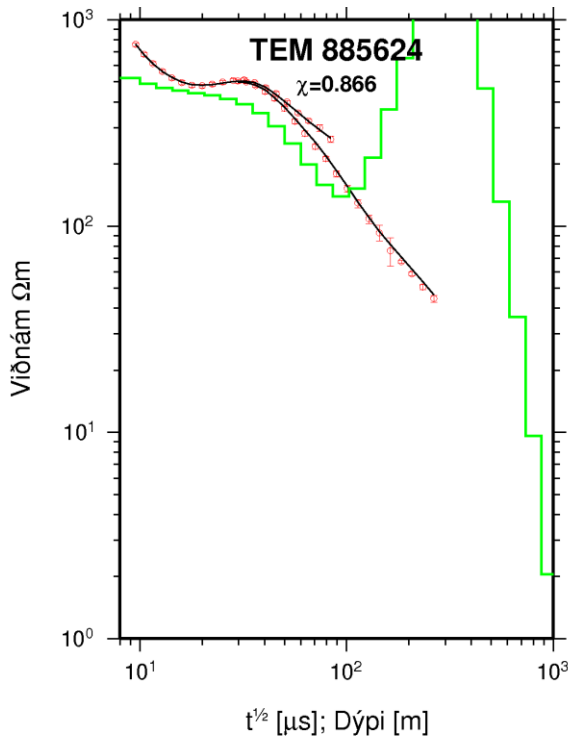


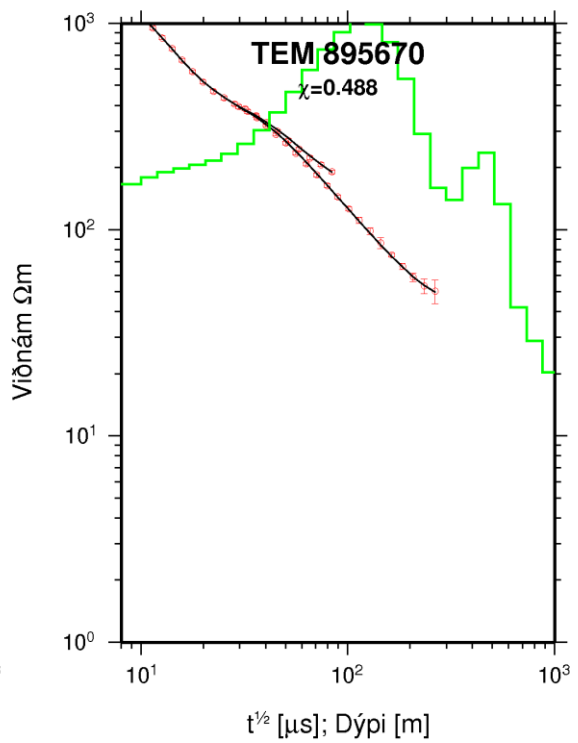
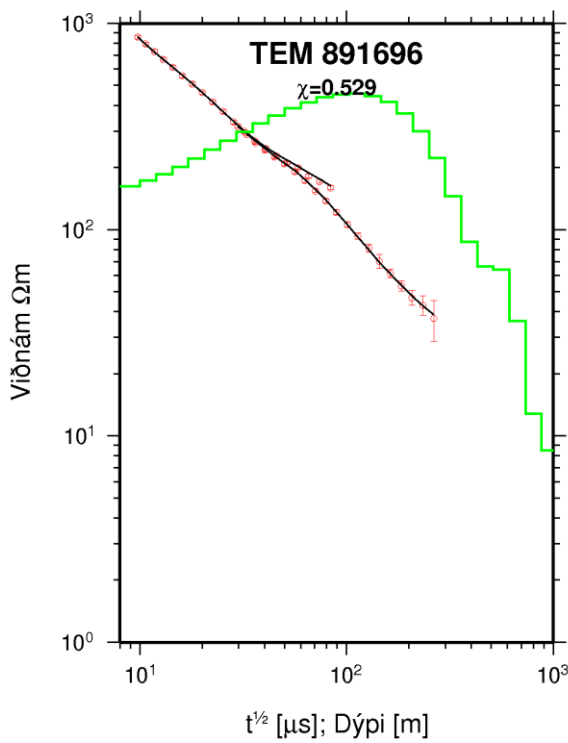
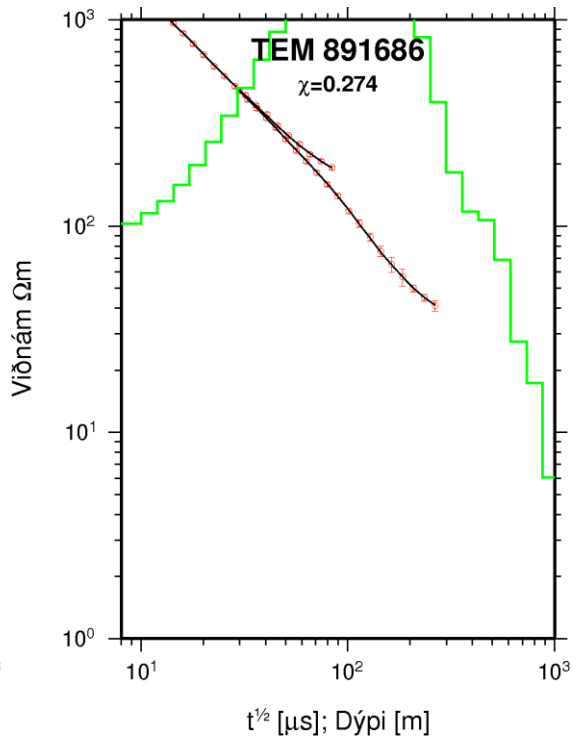
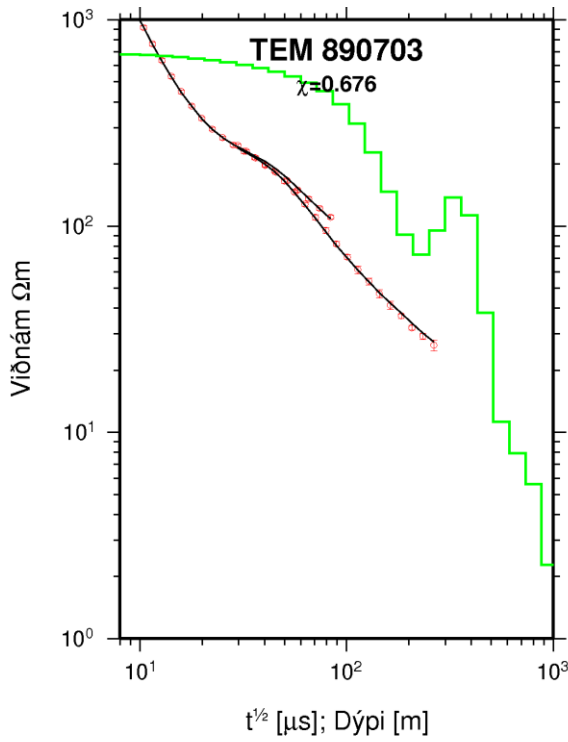


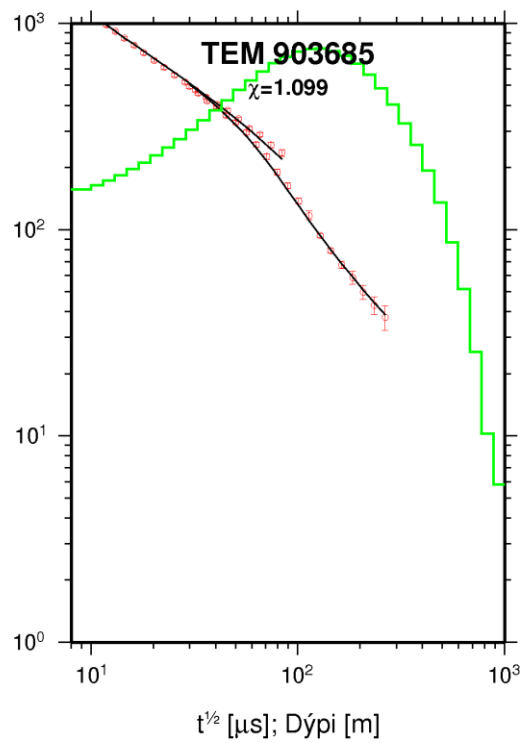
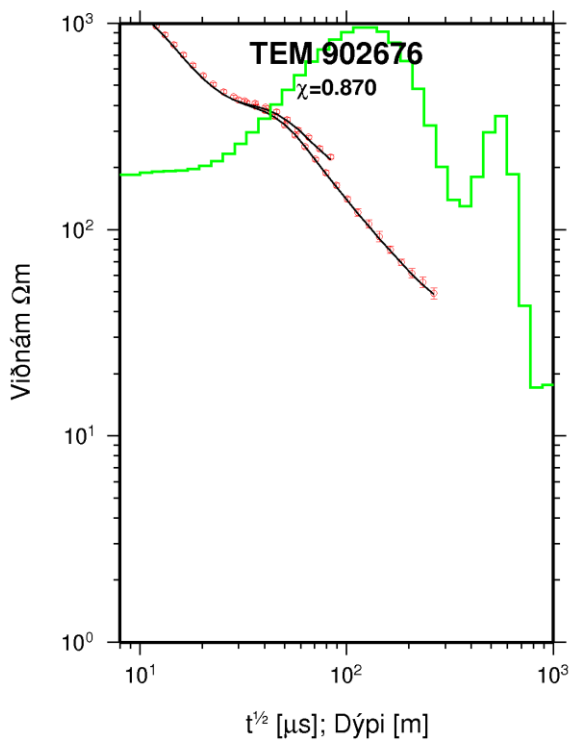
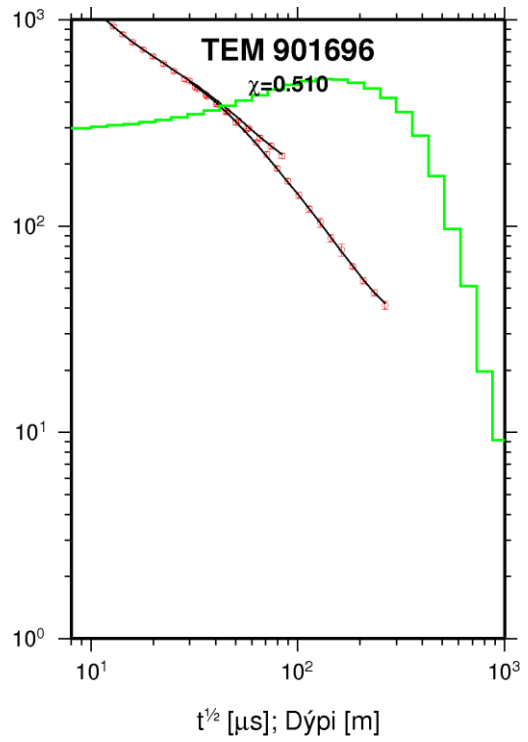
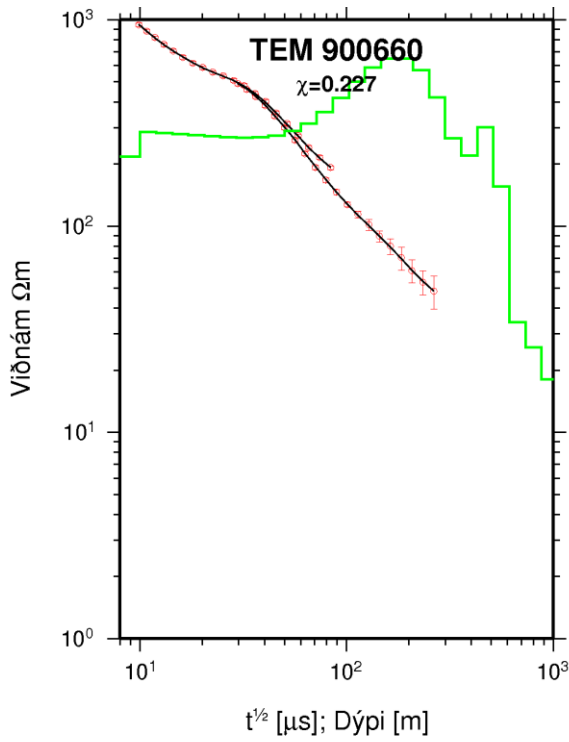


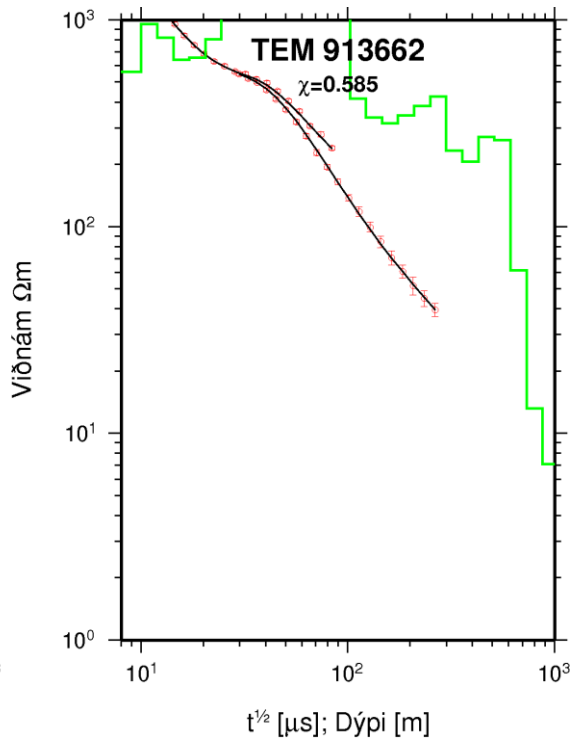
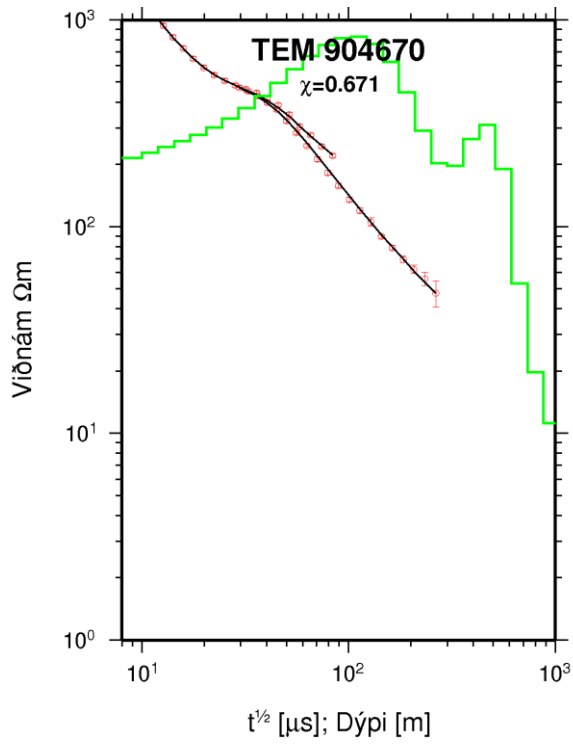








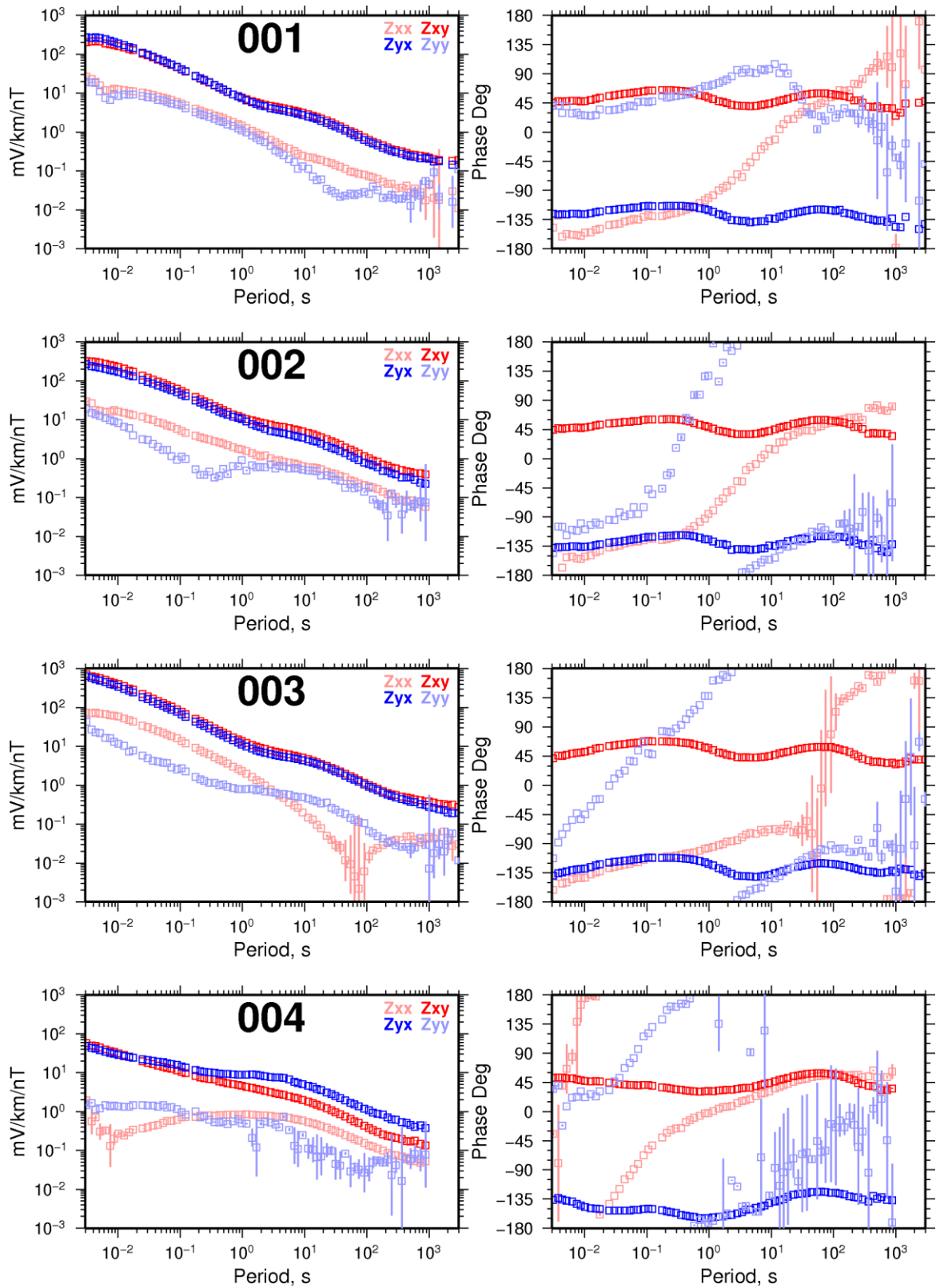




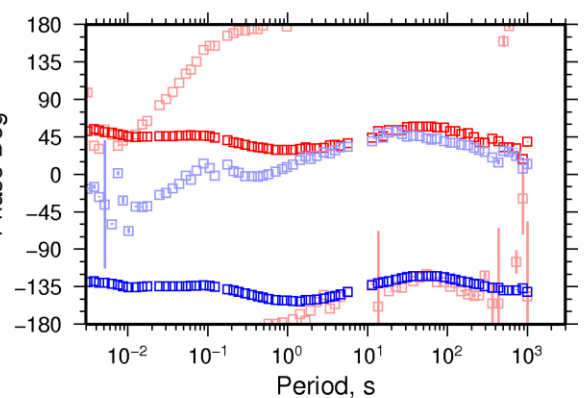
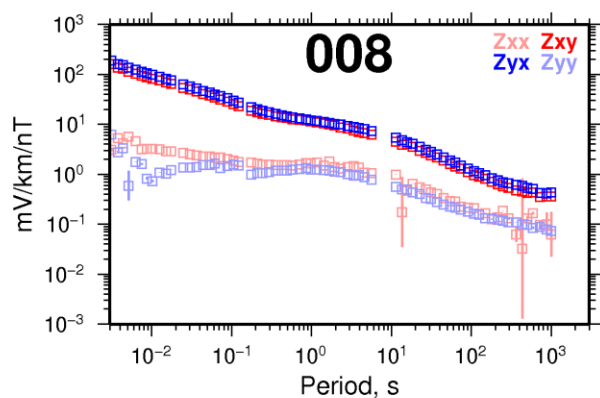
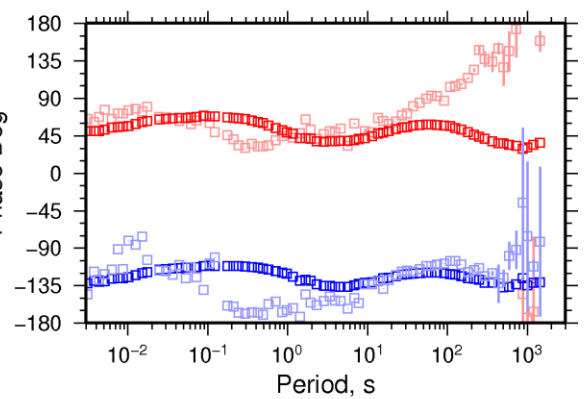
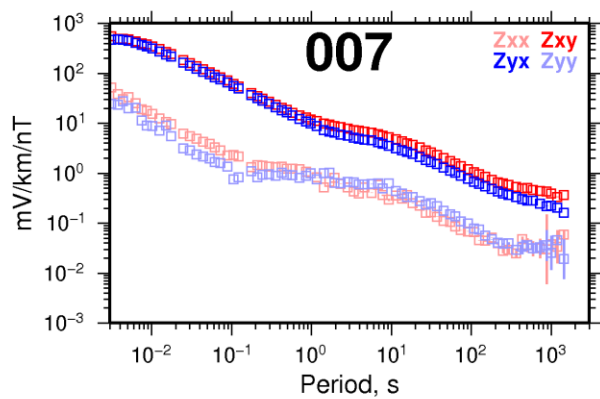
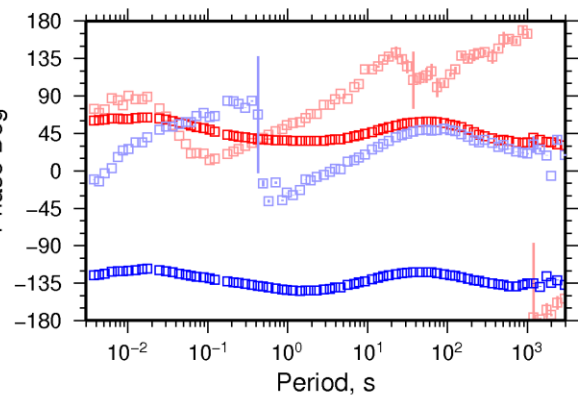
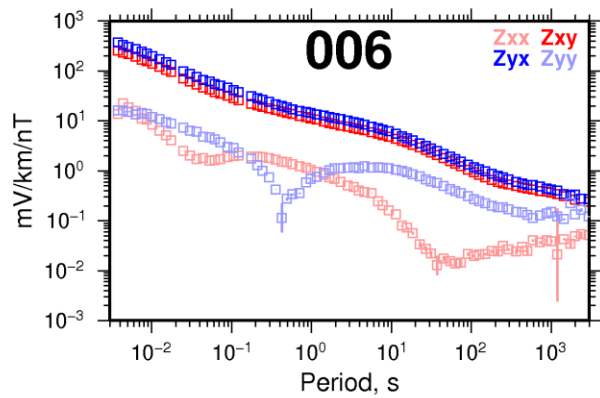
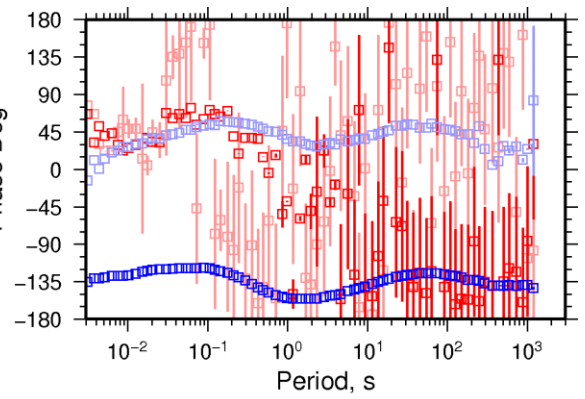
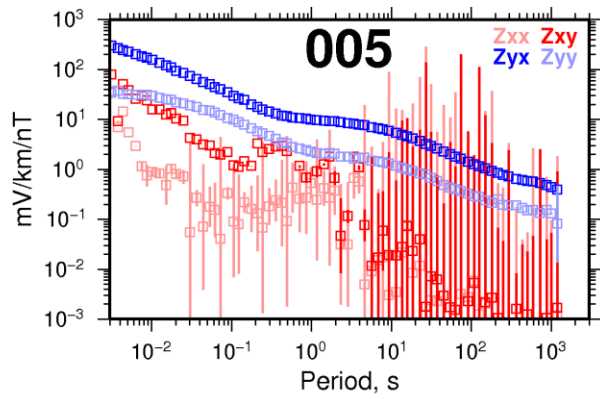
Mæliferlar og túlkun þeirra MT-1 og MT-2

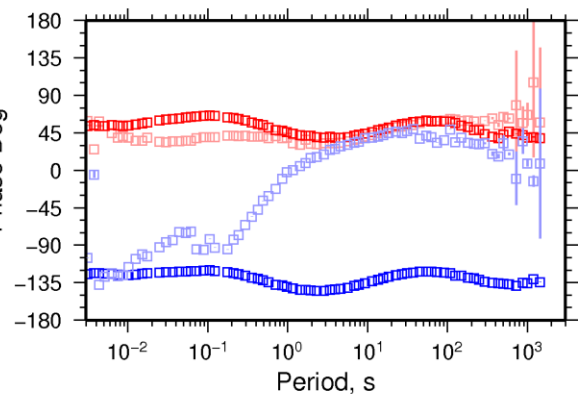
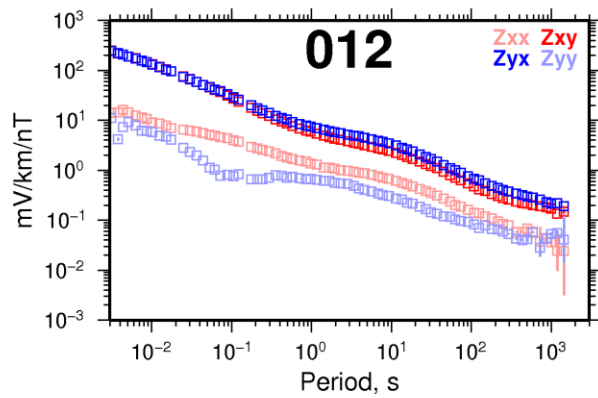
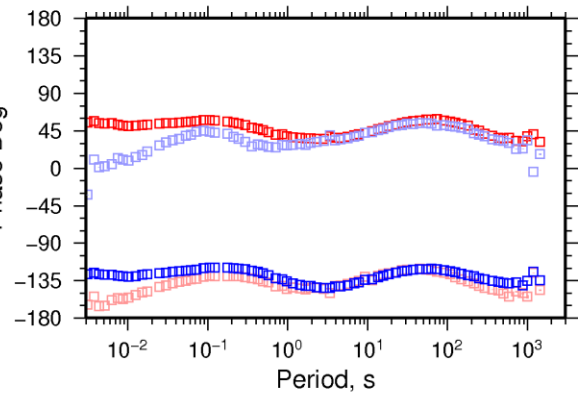
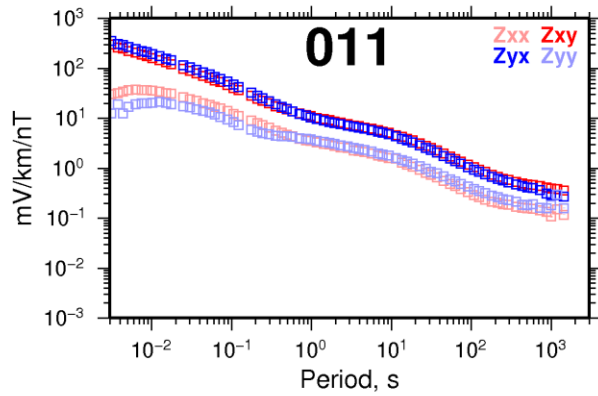
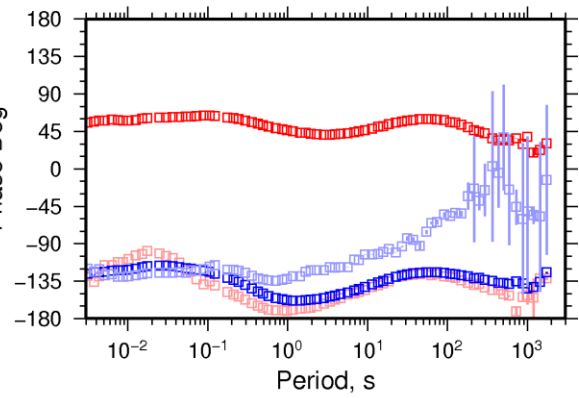
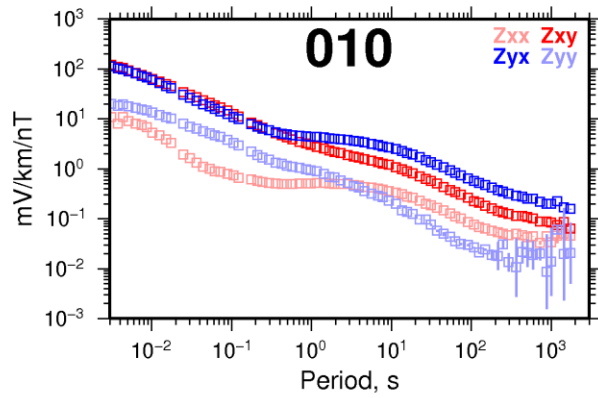
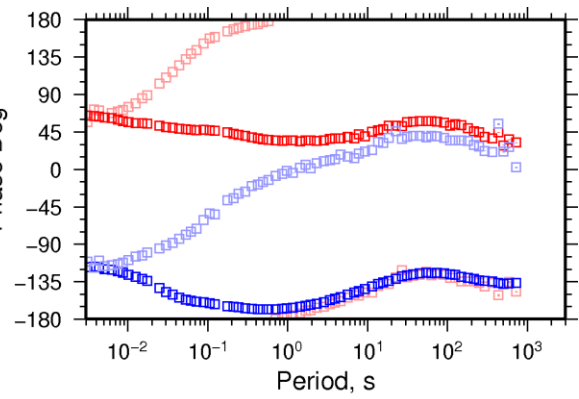
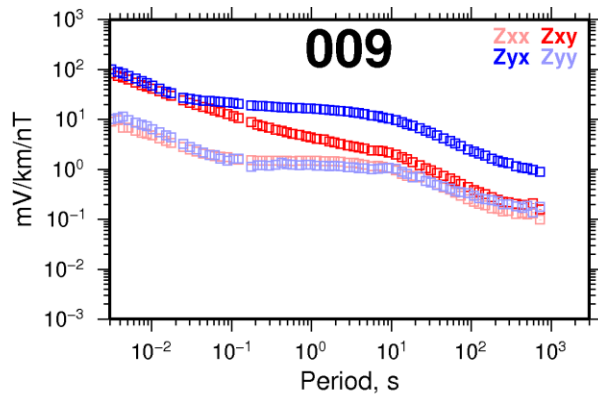
Stök tvinntölu-tensorsins Z , teiknuð sem stærð og fasi sem fall af sveiflutíma í sekúndum. Z er í mældri stefnu þar sem x er segulnorður og y segulaustur.

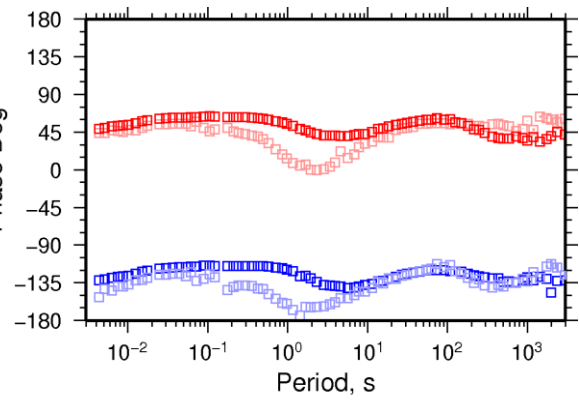
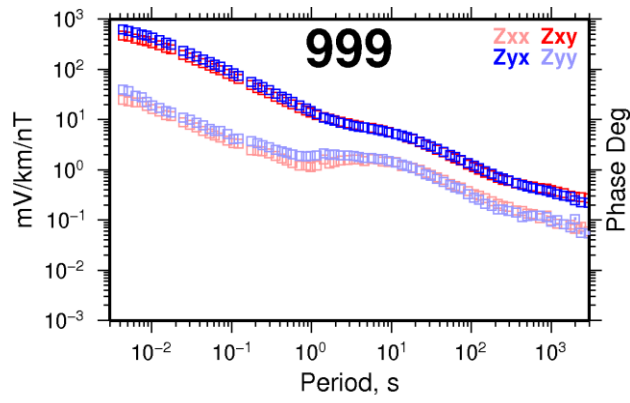
MT-1



GM 2009 Sep 30 10:50:33







GM 2009 Sep 30 10:50:50

MT-2

Viðnáms- og fasaferlar ásamt öðrum MT-breytum. Allir ferlar eru sýndir í mældri stefnu sem er X í segulnorður (15° vestan við norður), Y er í segulaustur og Z niður.

Fyrir hverja mælistöð kemur eftirfarandi fram:

1v: Sýndarviðnám ρ_{xy} og ρ_{yx} í Ωm

1h: Fasinn í gráðum, θ_{xy} og θ_{yx} . Í raun er sýndur $\theta_{yx}+180^\circ$

2v: Fylltir hringir sýna ZSTRIKE sem er sú stefna sem lágmarkar $|Z_{xx}|^2+|Z_{yy}|^2$ við snúning á impedans-tensornum. Stefnan er gráður austan við segulnorður sem er 15° vestan við norður. Fyrir tvívíða jörð er þessi stefna fasti og segir til um raffræðilega stefnu jarðar. Tvær lausnir koma til greina, þessi sem sýnd er eða 90° frá henni. Ekki er hægt út frá impedansinum einum sér að skera úr um hvor þeirra er raffræðileg strik-stefna. Ófylltir hringir segja til um þá x-stefnu sem viðnáms- og fasaferlarnir í 1v og 1h eru reiknaðir í.

2h: Þessi mynd sýnir annars vegar gildi á þremur þrívíddarbreytum, sem allar eiga að vera nærri núlli ef jörðin er ein- eða tvívíð, og hins vegar „multible coherence“ fyrir Ex og Ey sem segir til hversu vel mæld gögn passa við jöfnuna sem lýsir sambandi milli raf- og segulsviðanna, gildi nærri einum sýna mjög góða fylgni. Þrívíddarbreyturnar eru:

Swift skew = $\left| \frac{Z_{xx}+Z_{yy}}{Z_{xy}-Z_{yx}} \right|$, sýnt með fylltum, svörtum hringjum. Óháð snúningsstefnu.

Bahr skew = $\frac{\sqrt{|\text{Im}(Z_{xx}Z_{yy}^*+Z_{xx}Z_{yy}^*)|}}{|Z_{xy}-Z_{yx}|}$, sýnt með ófylltum hringjum. * merkir complex conjugate. Óháð snúningsstefnu.

Ellipticity = $\left| \frac{Z'_{xx}-Z'_{yy}}{Z'_{xy}+Z'_{yx}} \right|$, þar sem Z' er í Zstrike-stefnu. Sýnt með fylltum, gráum hringjum. Segir til um hlutfall skamm- og langás rafsviðs ellipsunnar.

Fyrir þær mælistöðvar þar sem einnig var mælt lóðréttur þáttur segulssviðs (Hz) er einnig sýnt:

3v: Tipper. Samband lóðréttra og láréttra þátta segulssviðs er $H_z=T_x H_x + T_y H_y$. Tipper er skilgreindur sem summa T_x og T_y . Myndin sýnir stærð þessara breyta.

3h: Fasi tipper-breyta.

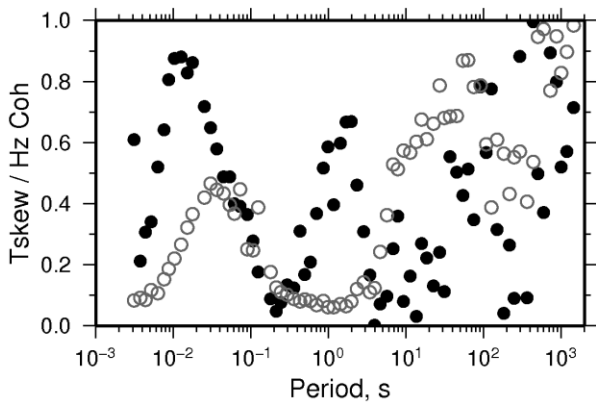
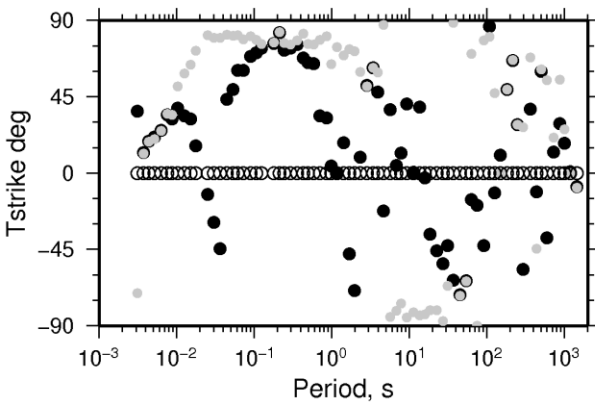
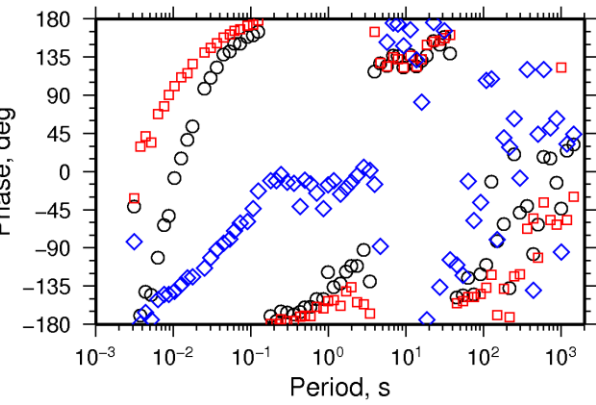
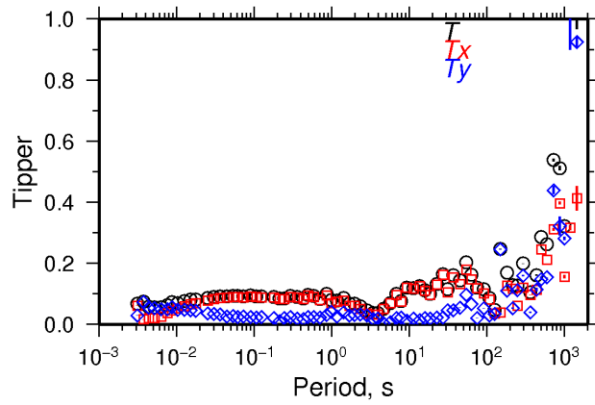
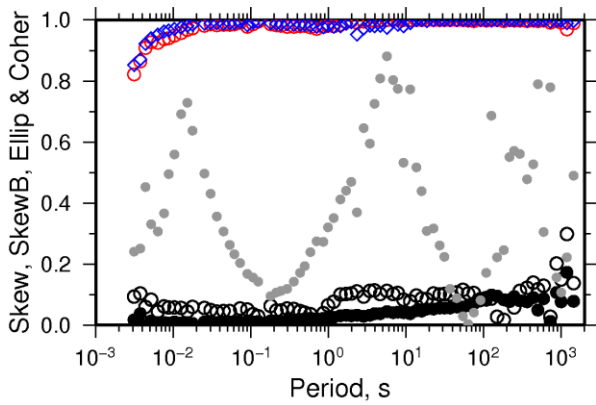
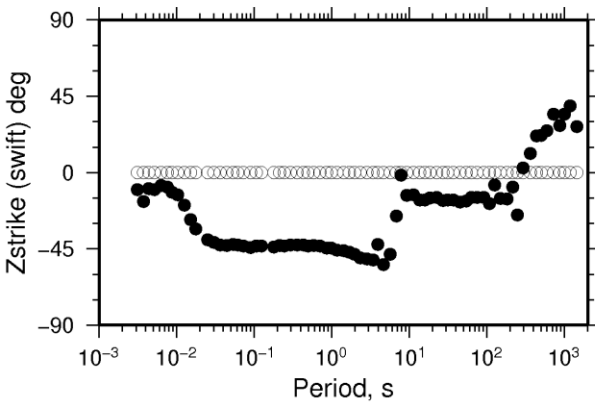
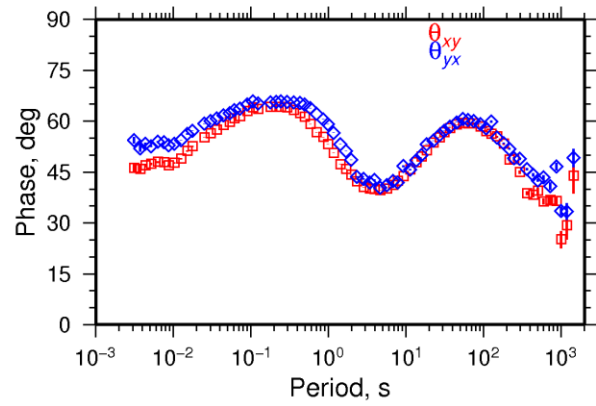
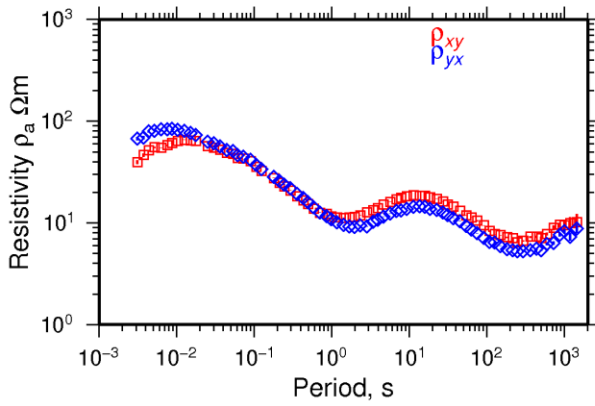
4v: TSTRIKE segir til um raffræðilega snúningsstefnu tippersins. Þessi stefna er reiknuð út á tvennan hátt, annars vegar út frá vegnu meðaltali á hlutfalli $\text{real}(T_y)/\text{real}(T_x)$ og $\text{imag}(T_y)/\text{imag}(T_x)$ (fylltir, svartir hringir) og hins vegar sú stefna sem lágmarkar $|T_x|$ þar sem $T_x=0$ fyrir tvívíða jörð (fylltir, grár hringir). Ófylltir hringir segja til um stefnuna á x fyrir tipperinn á myndum 3v og 3h.

4h: Tipper skew (fylltir hringir) og tipper „multible coherency“ (ófylltir hringir). Tipper skew segir til um þrívíðaleikann og á að vera nærri núlli fyrir einvíða og tvívíða jörð, skilgreindur sem:

Tipper skew = $2 \frac{\text{imag}(T_x^* T_y)}{|T_x|^2+|T_y|^2}$, þar sem * táknar complex conjugate. Óháð snúningsstefnu.

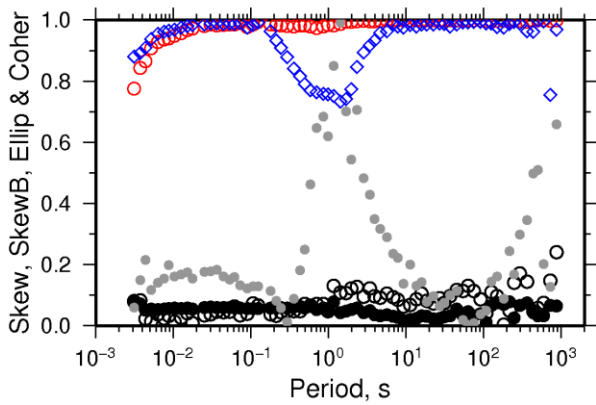
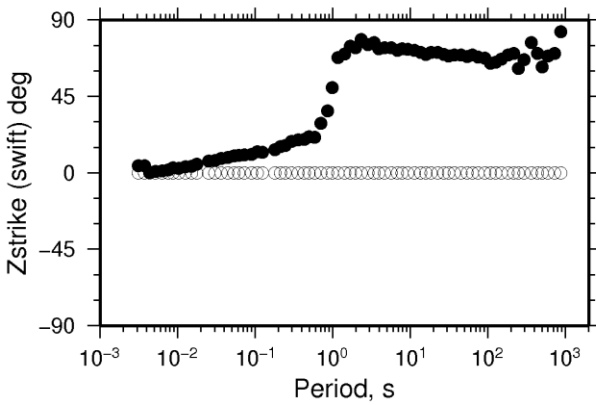
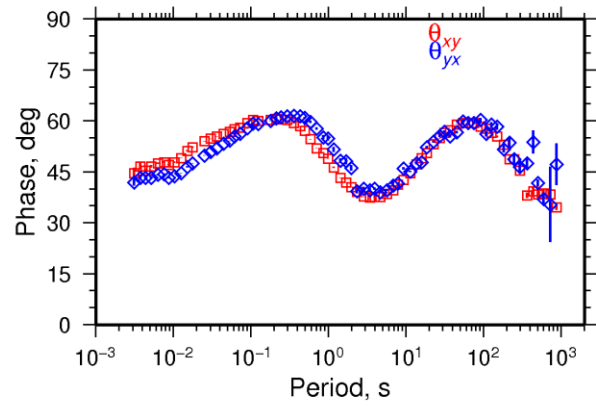
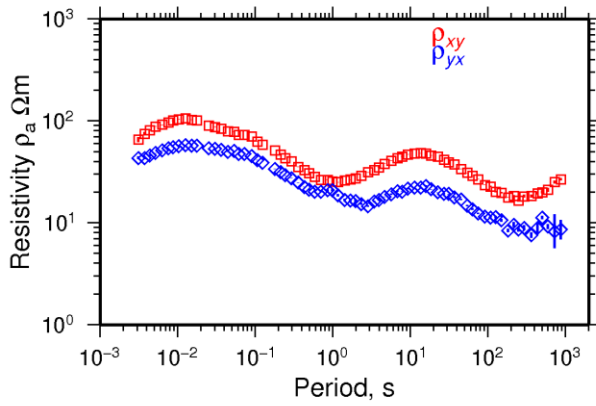
001

Skrá: 001.EDI



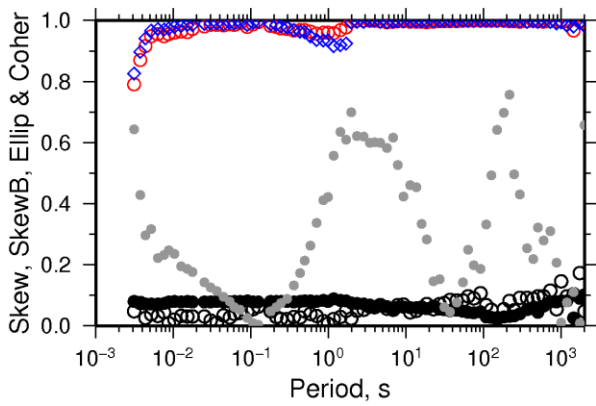
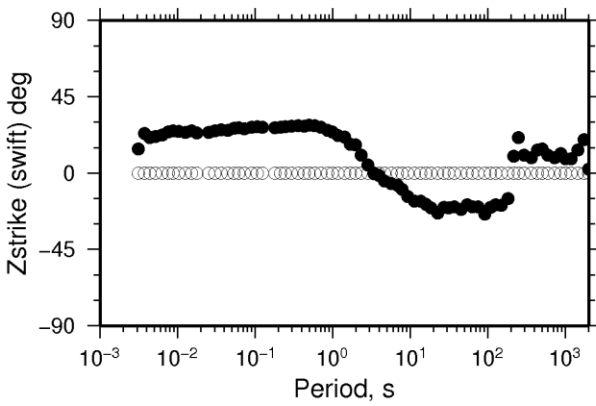
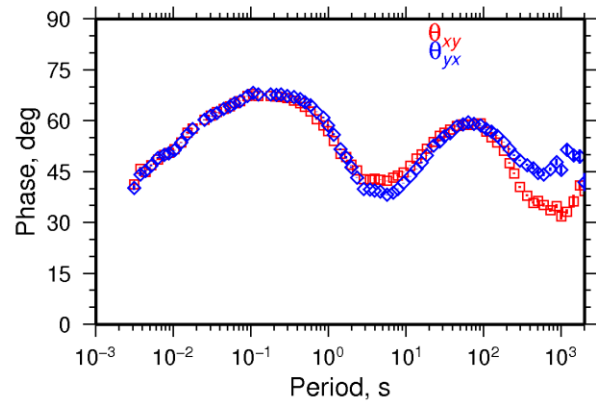
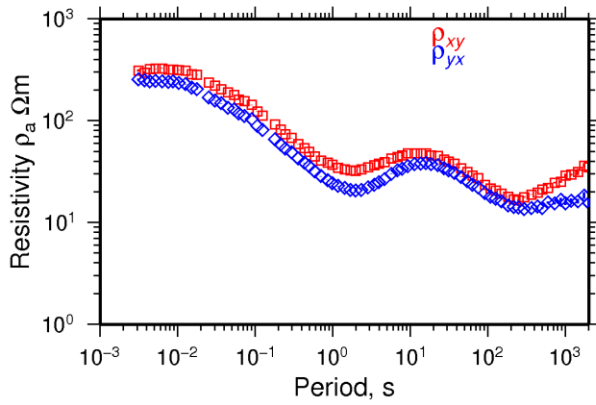
002

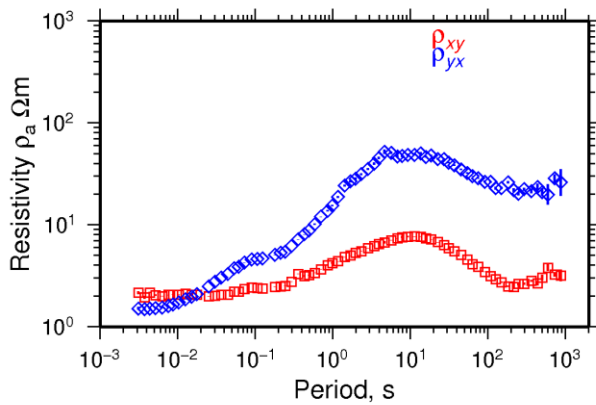
Skrá: 002.EDI



003

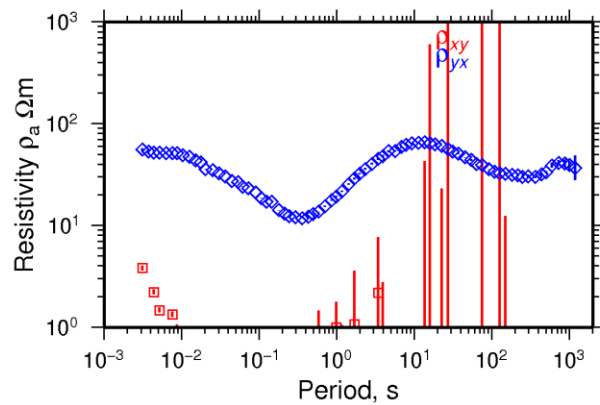
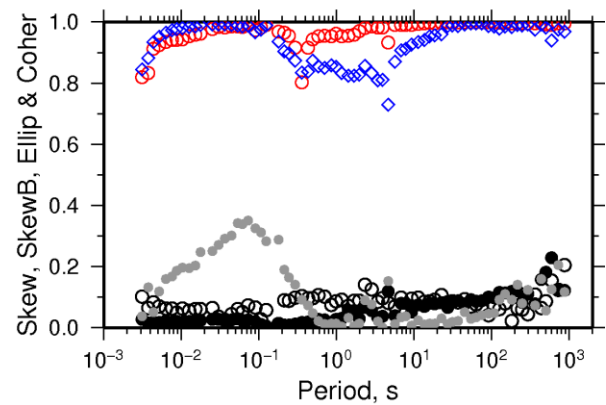
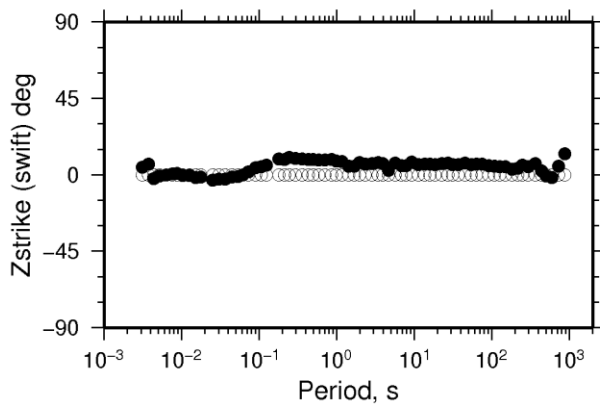
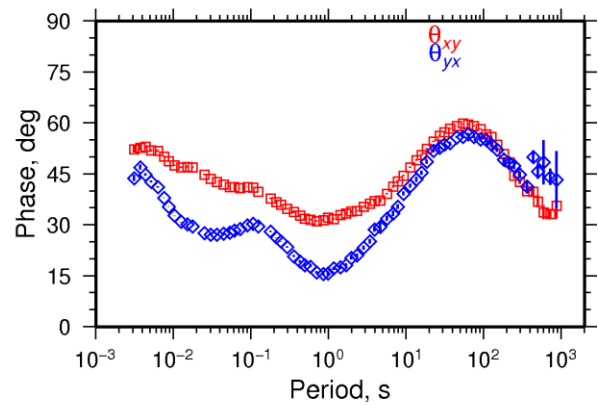
Skrá: 003.EDI





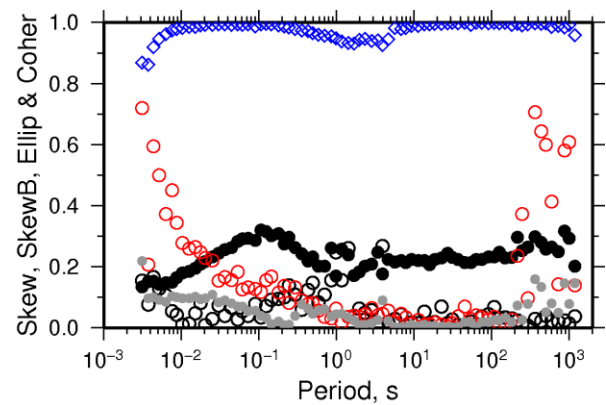
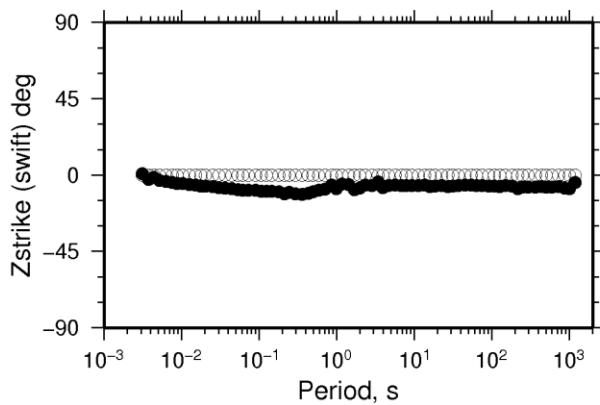
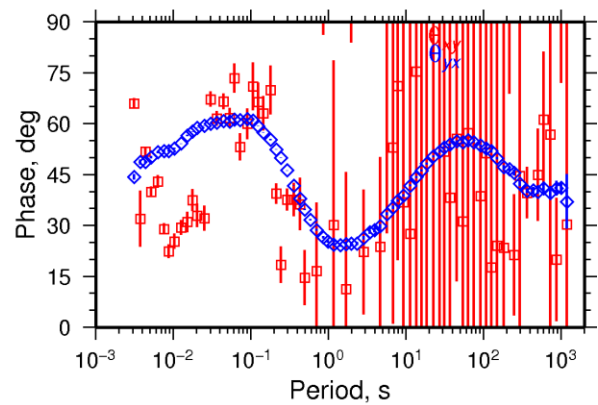
004

Skrá: 004.EDI



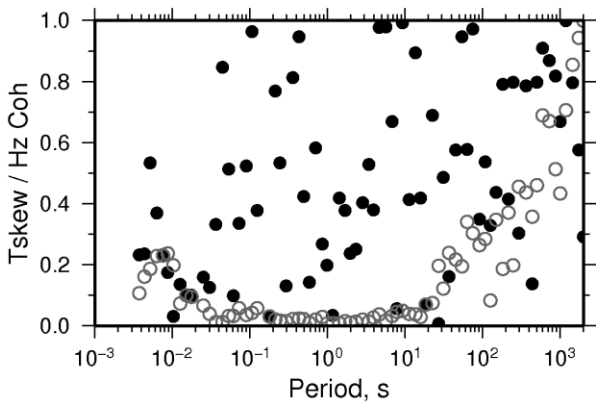
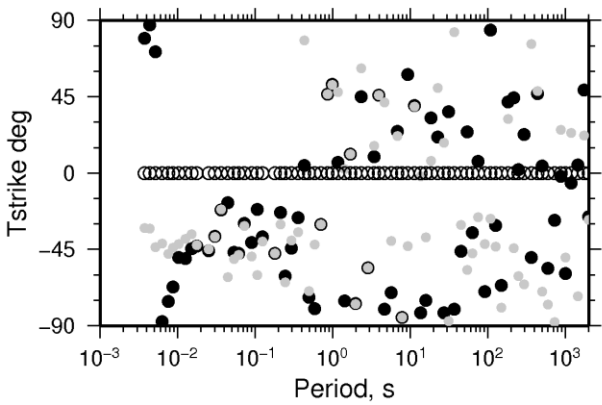
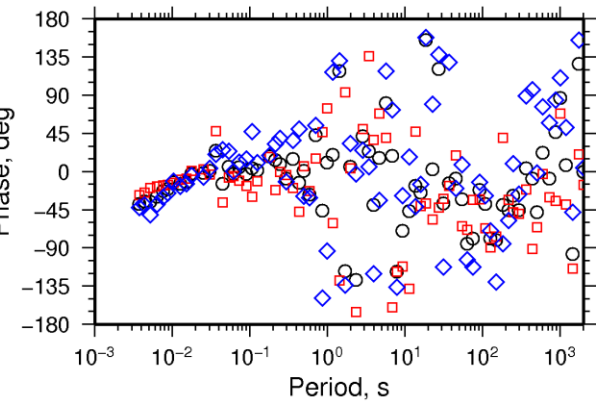
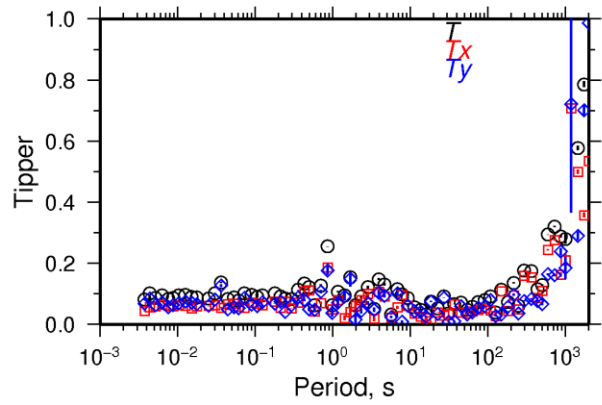
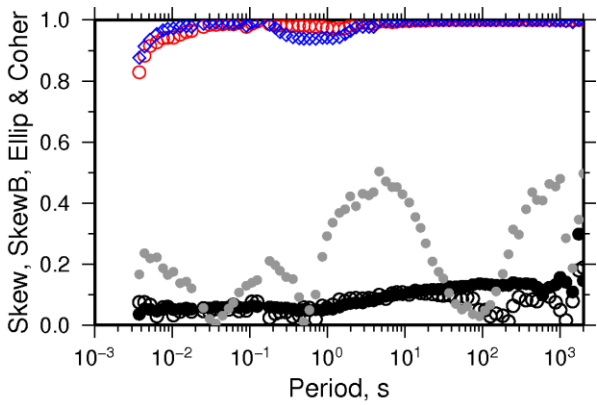
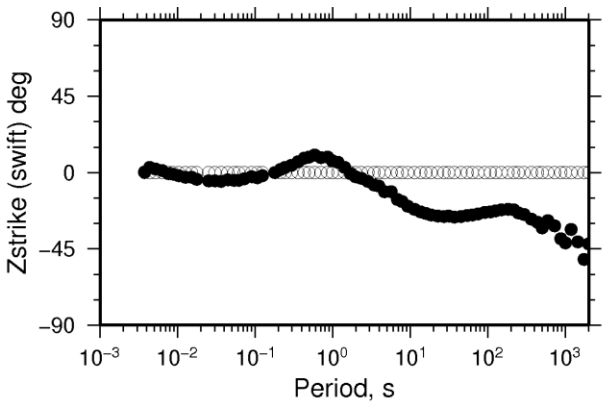
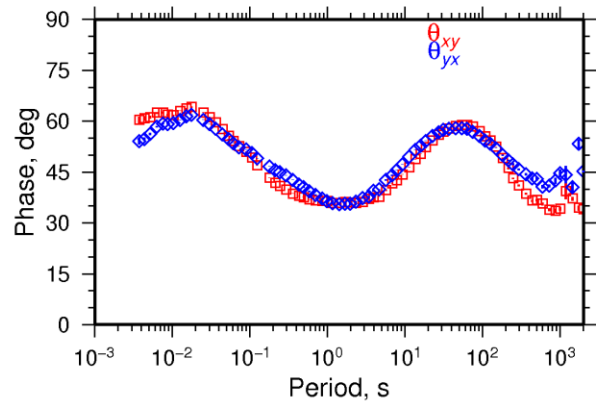
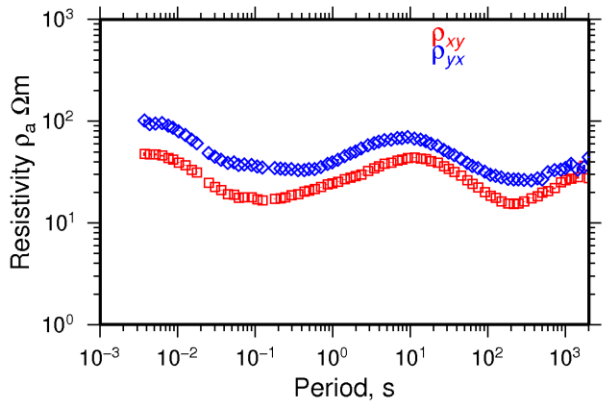
005

Skrá: 005.EDI



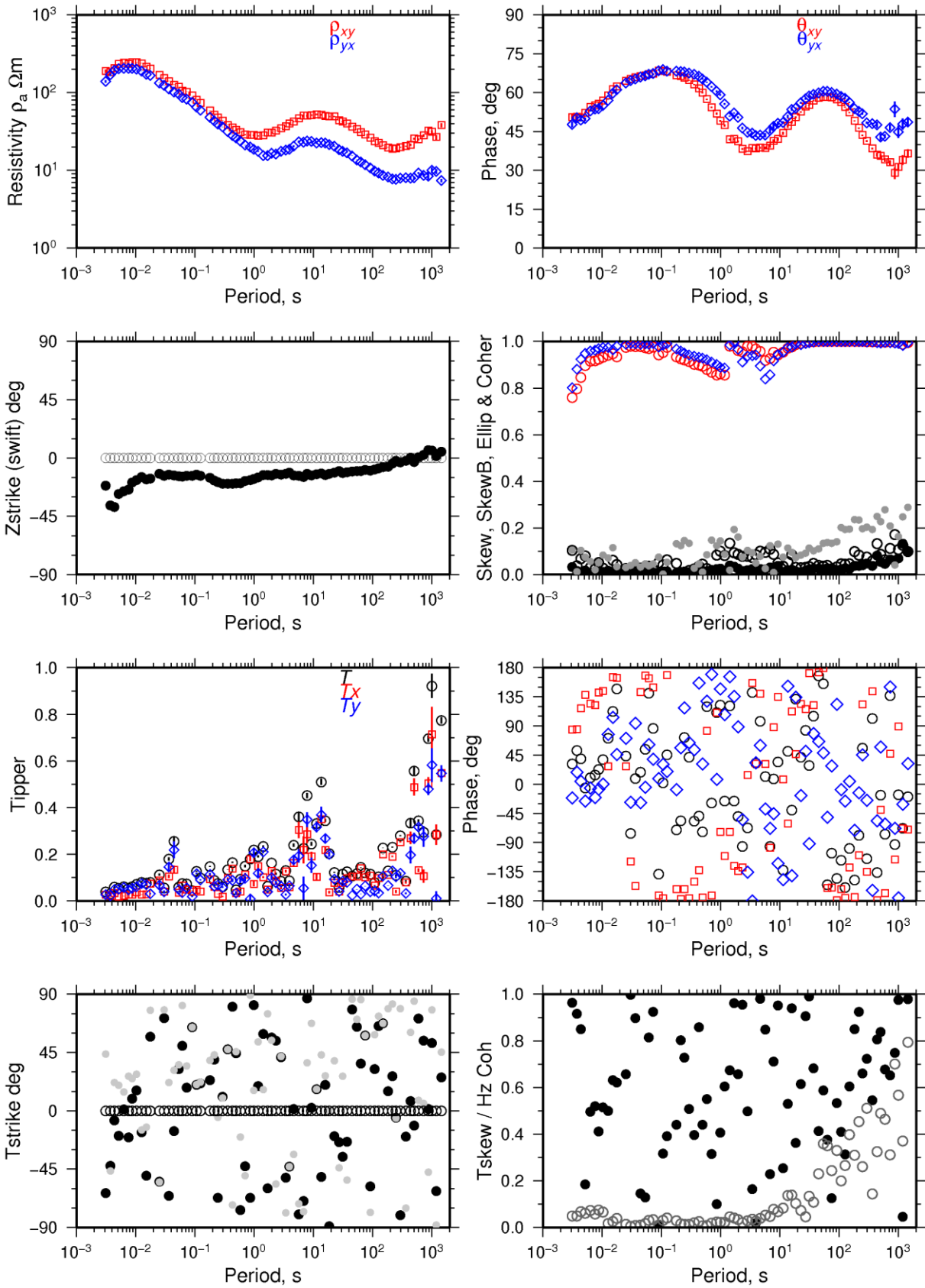
006

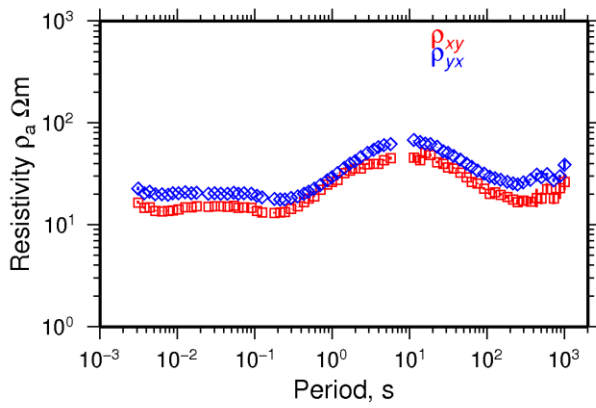
Skrá: 006.EDI



007

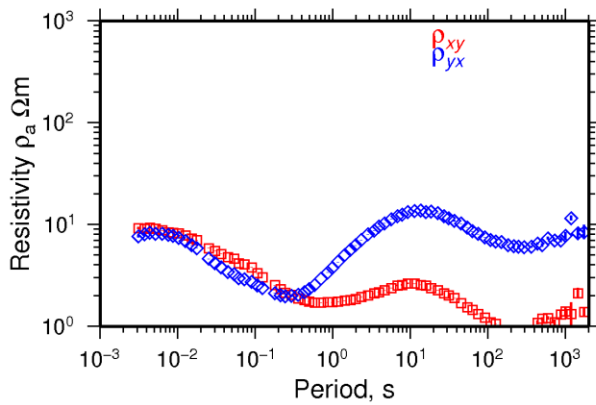
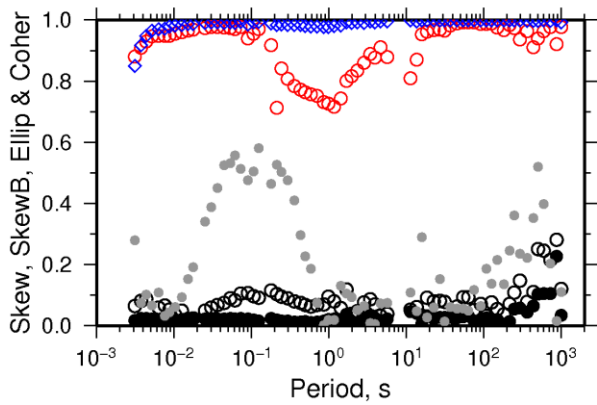
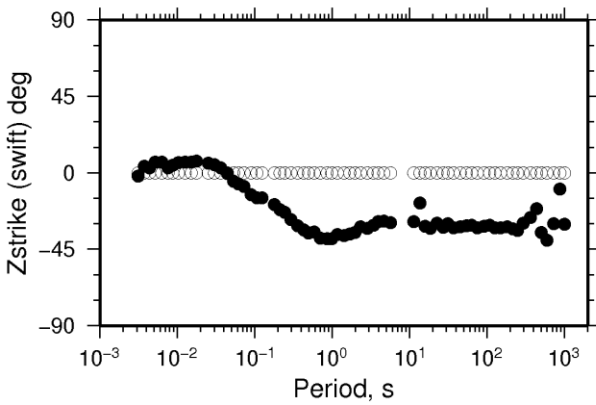
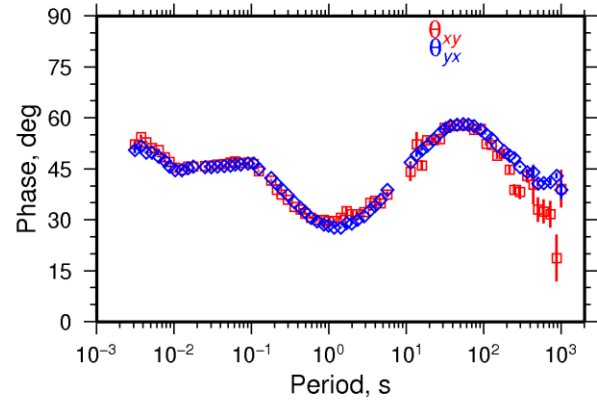
Skrá: 007.EDI





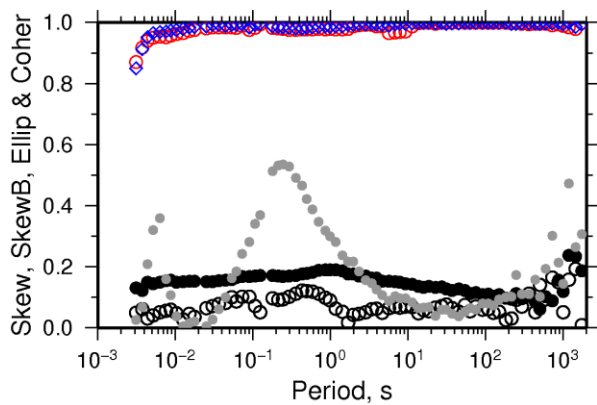
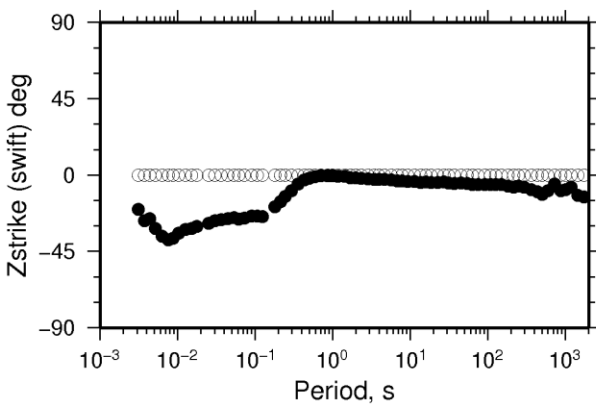
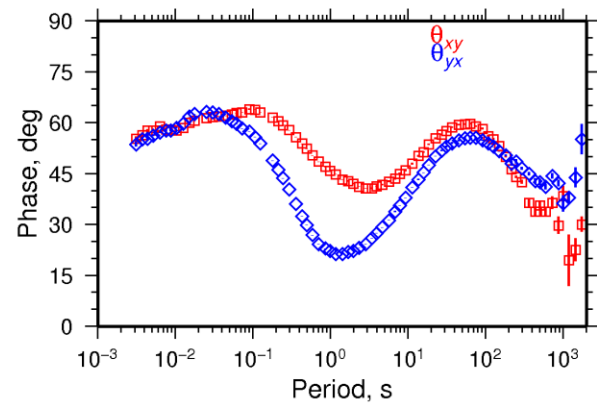
008

Skrá: 008.EDI



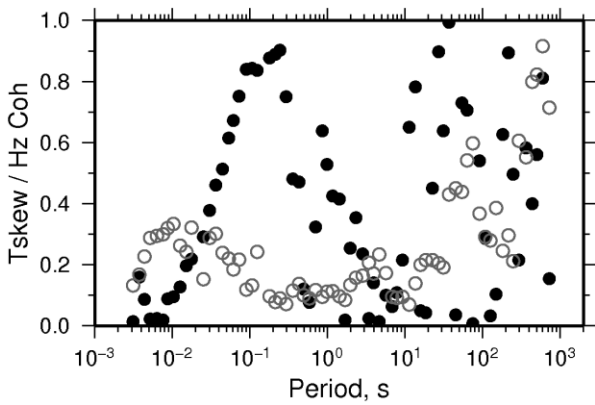
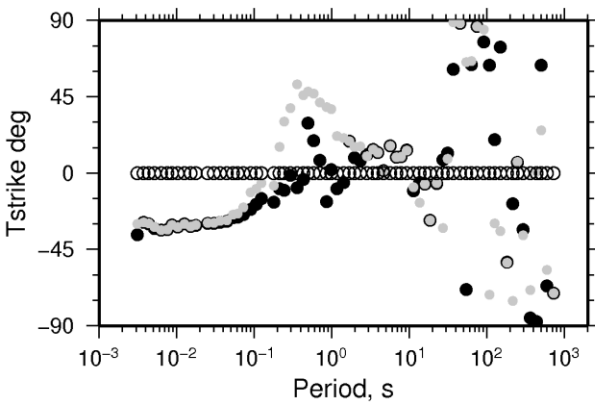
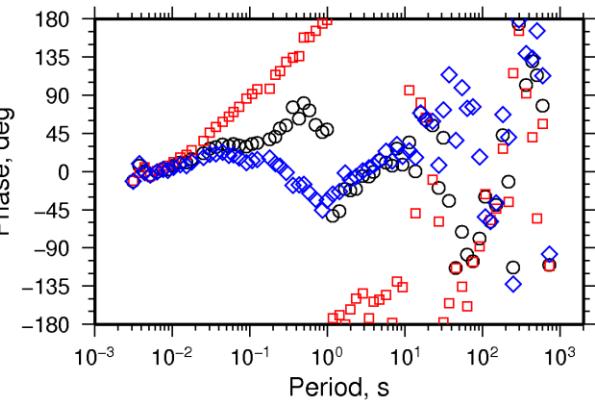
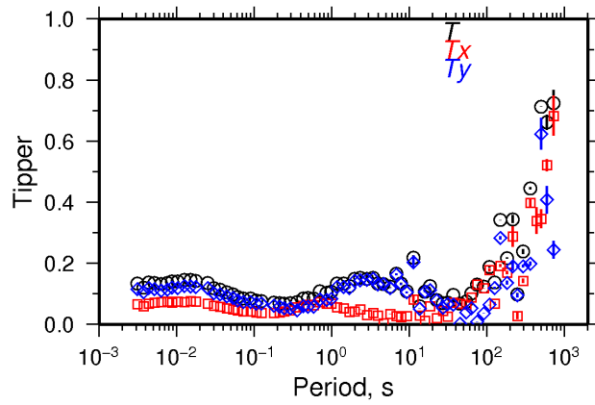
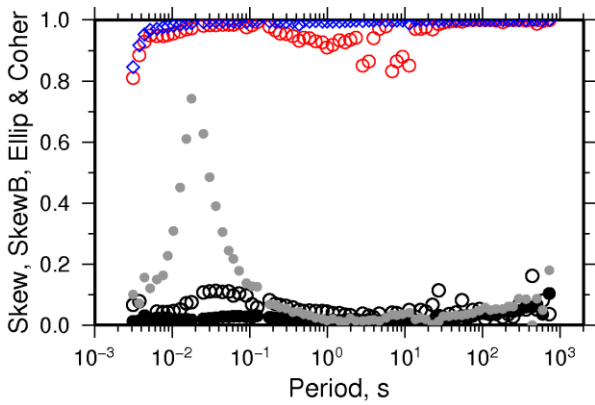
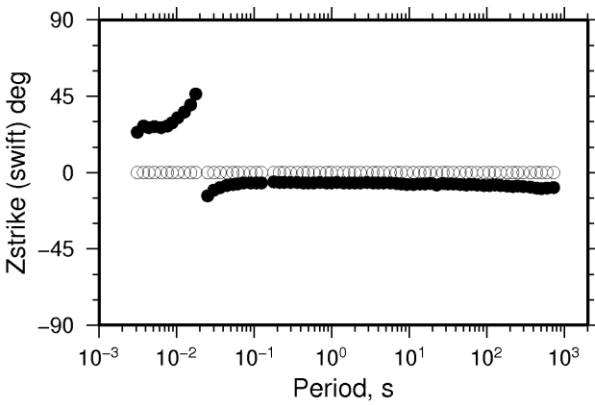
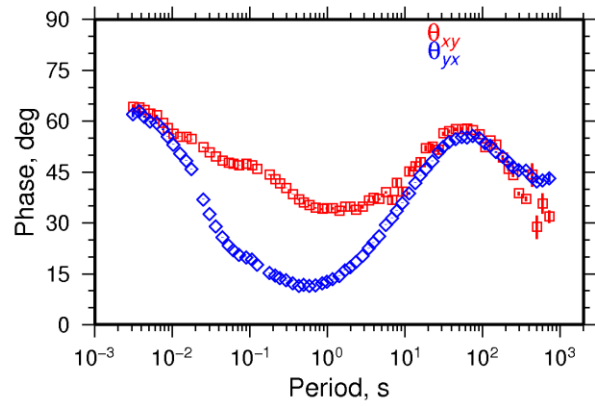
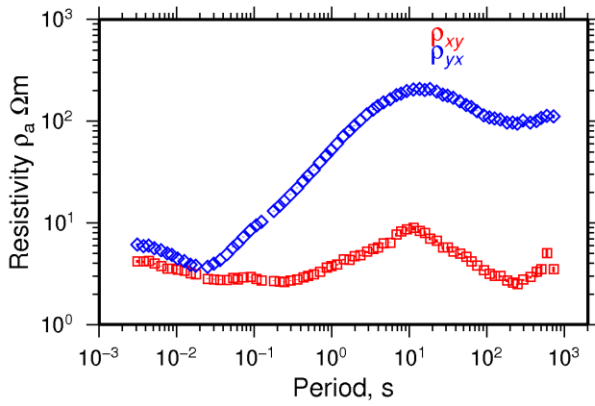
010

Skrá: 010.EDI



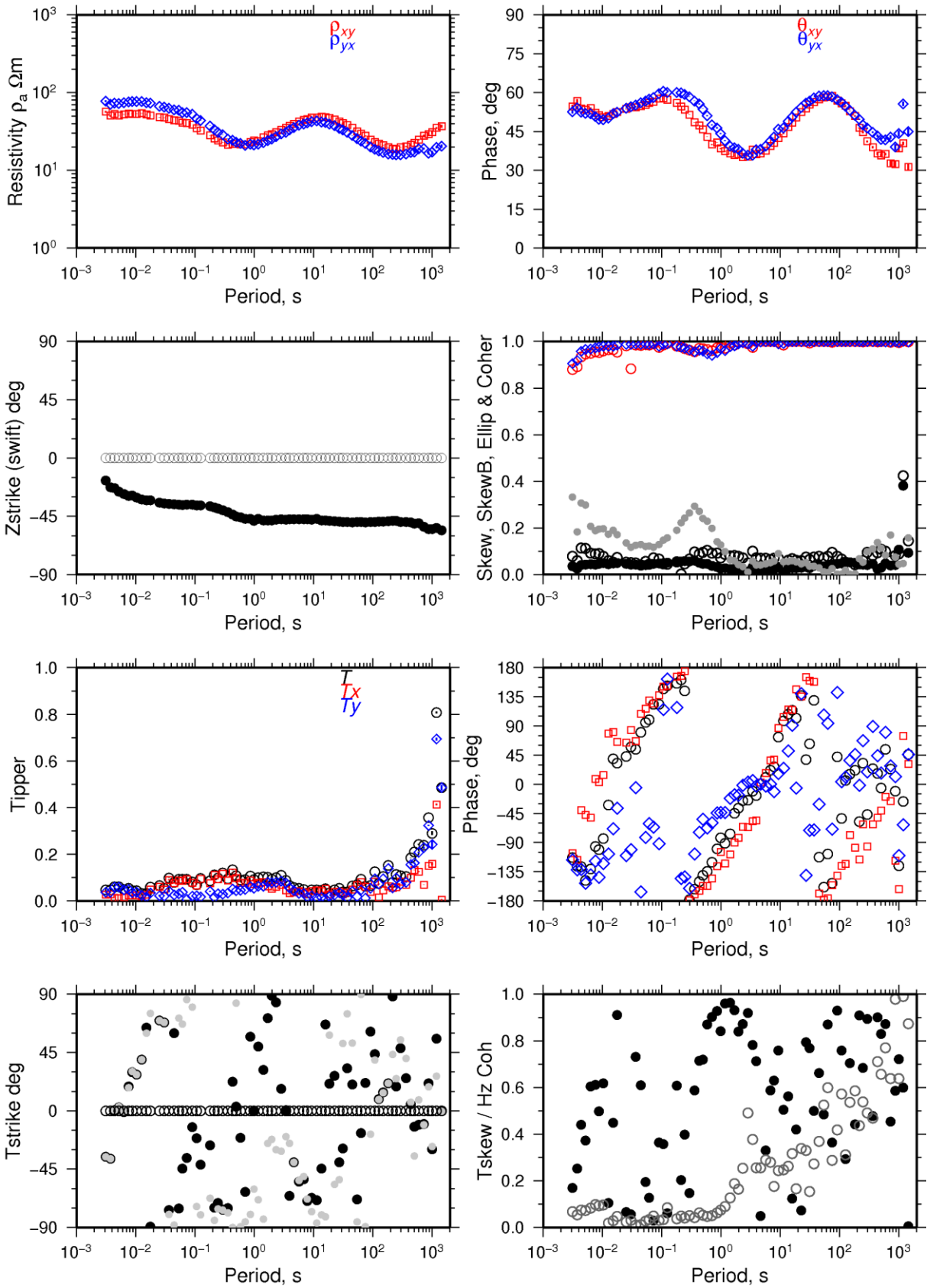
009

Skrá: 009.EDI



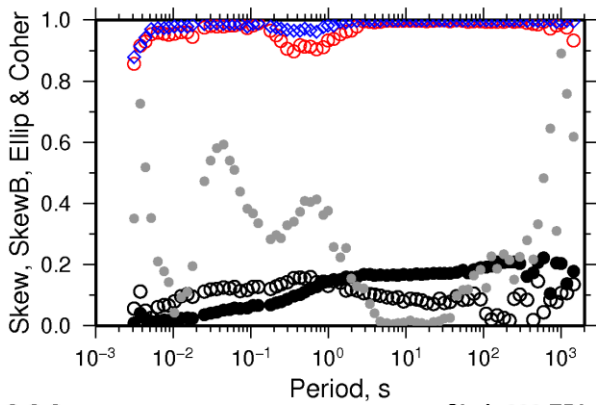
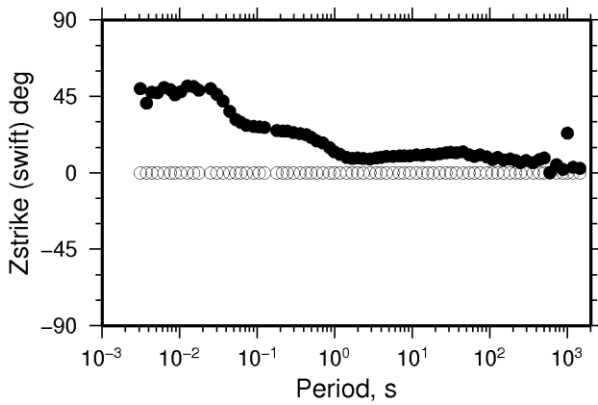
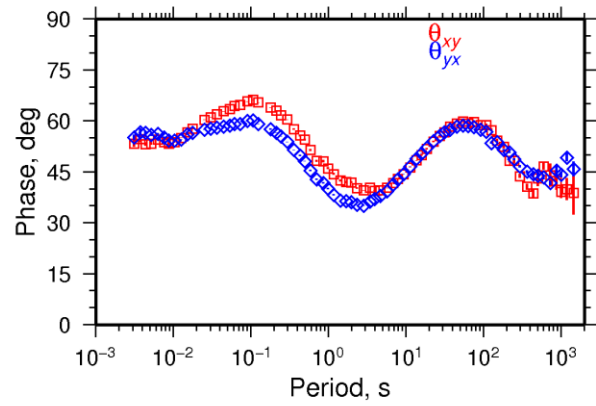
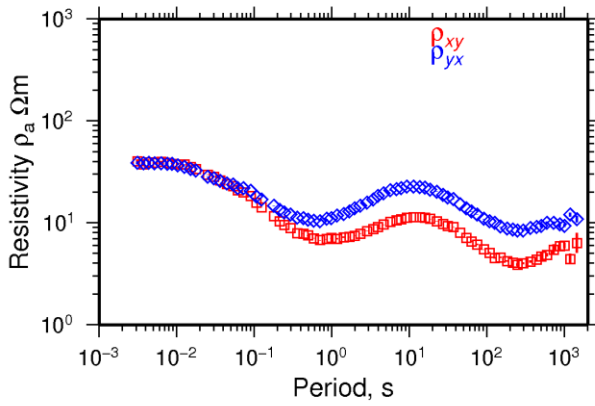
011

Skrá: 011.EDI



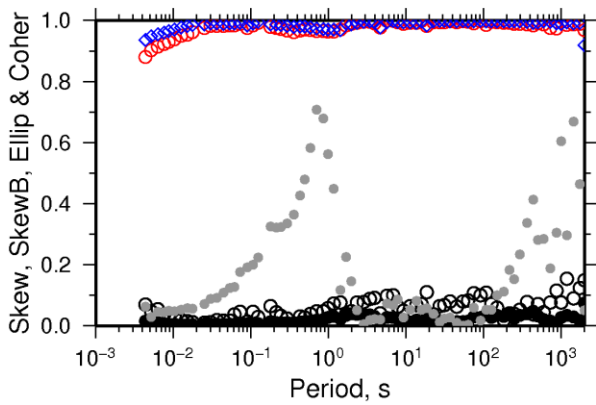
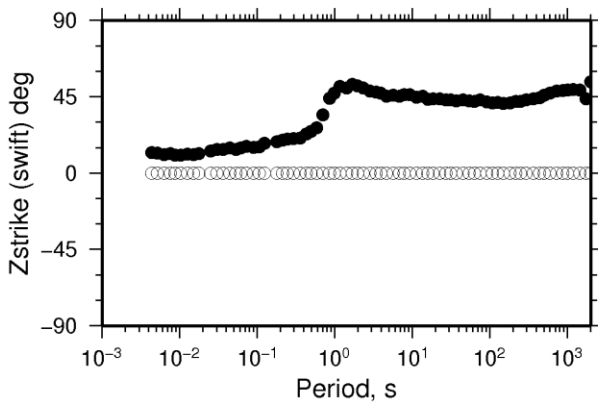
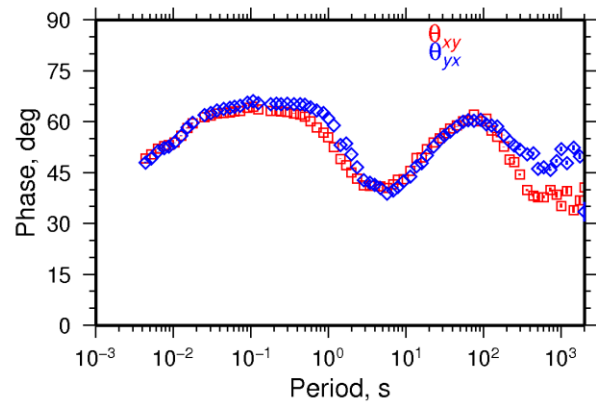
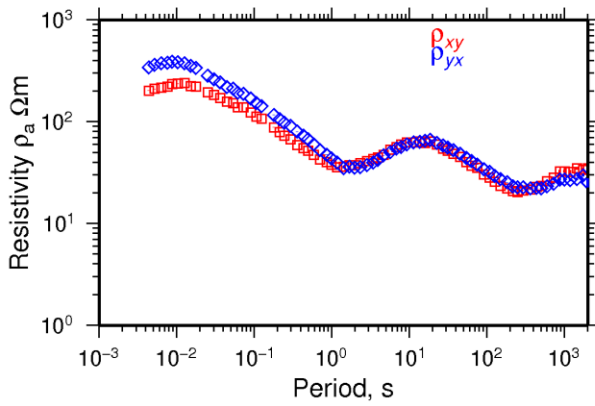
012

Skrá: 012.EDI



999

Skrá: 999.EDI



MT-3. Samtúlkun MT- og TEM-gagna

Fyrir hverja mælingu eru sýndar tvær myndir. Efri myndin sýnir samtúlkun MT og viðeigandi TEM-mælingar og sú neðri sýnir túlkun hvorrar mælingar óháð hinni þar sem notaður er hliðrunarstuðull MT-mælingarinnar úr samtúlkuninni á efri myndinni.

Í öllum mælingum er túlkað determinant sýndarviðnám og fasi að undanskilinni MT-mælingu 005 þar sem einungis YX-par er til.

Heiti viðeigandi TEM-mælingar kemur fram í efra, vinstra horni sýndarviðnáms myndarinnar þar sem einnig kemur fram fjarlægð milli MT- og TEM-mælingarinnar ásamt hæðarmun hvorrar tveggja í metrum. Staðsetning og hæð er fengin með hand GPS-tæki og því nákvæmni í staðsetningu ekki meira en 10 m, og í hæð líklegast ekki betri en nokkrir metrar.

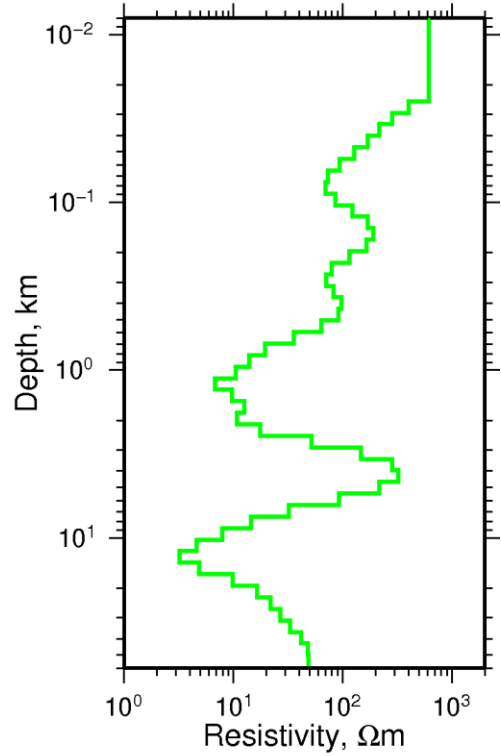
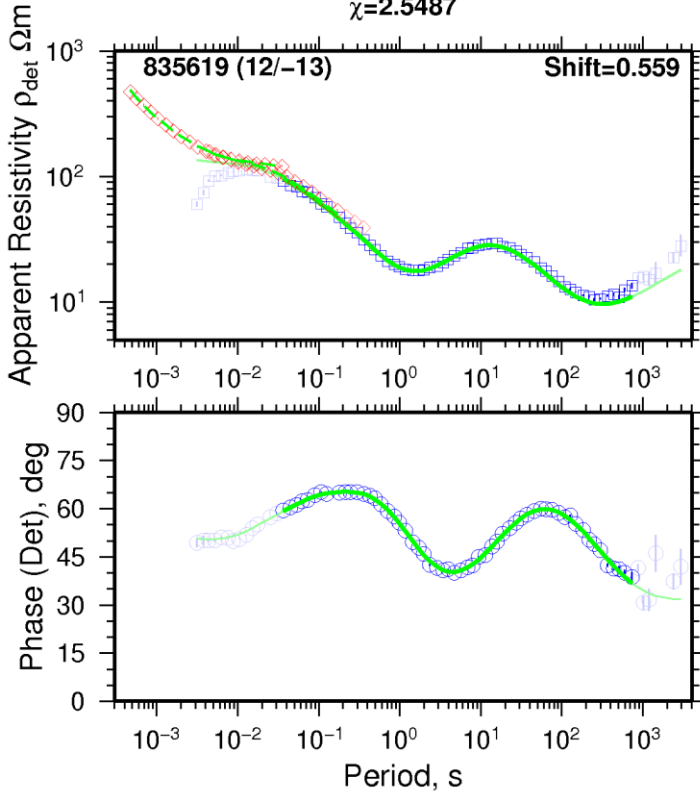
Hliðrunarstuðull MT-mælingarinnar (shift) er sýndur í efra, hægri horni sýndarviðnámsmyndarinnar. Hliðrun sýndarviðnámsins er $\rho_{\text{leiðrétt}} = \rho_{\text{mælt}} / \text{shift}$.

Mæld TEM-gögn eru sýnd með rauðum tígum og MT-gögn með bláum hringjum. Þau gögn sem ekki eru notuð við túlkunina eru sýnd með ljósrauðum og ljósbláum lit fyrir TEM og MT. Niðurstaða samtúlkunarinnar er sýnd með grænu líkani til hægri á efri myndinni þar sem lóðrétti ásinn er dýpi í lógaritmískum skala. Svörun þessa einvíða líkans er sýnt með grænum ferli á viðnáms- og fasamyndinni.

Tilgangur neðri myndarinnar er að sýna hversu vel TEM- og MT-gögnin passa saman. Bæði MT- og TEM-mælingarnar eru túlkaðar sér og eru niðurstöður þeirra sýndar með viðeigandi lit í einvíðu líkónunum. Oftast gefa þær nokkurn veginn sama líkanið fyrir utan mælingar 005, 008 og 010.

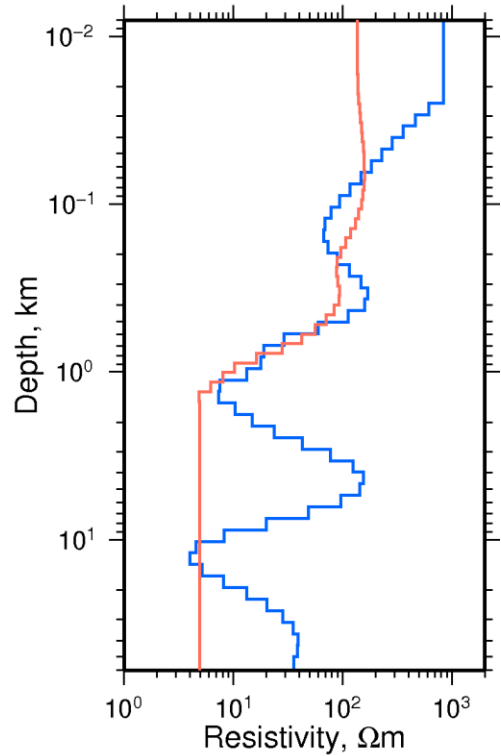
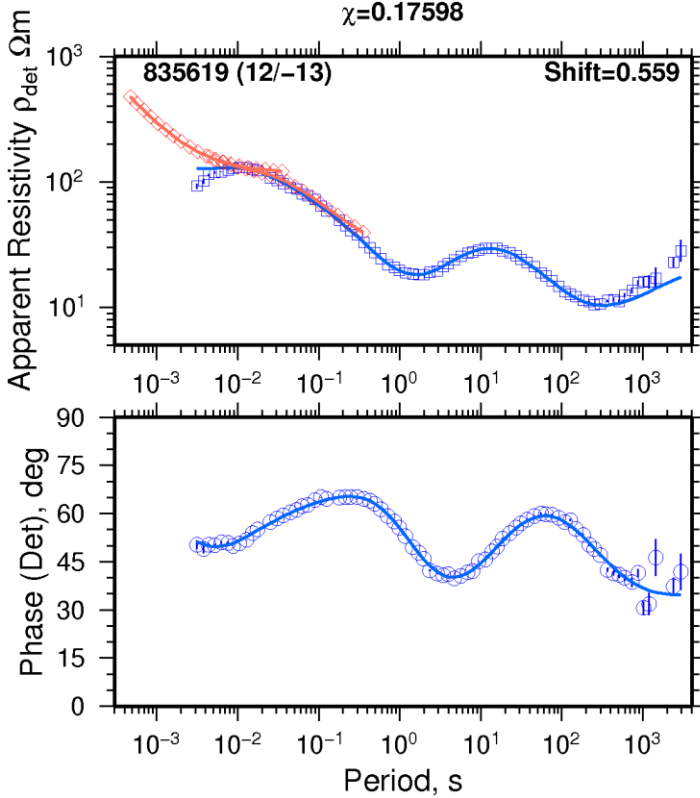
001

$\chi=2.5487$



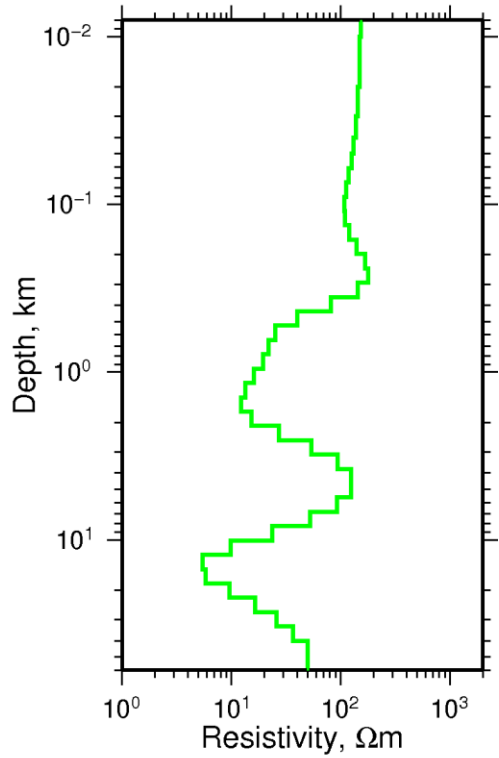
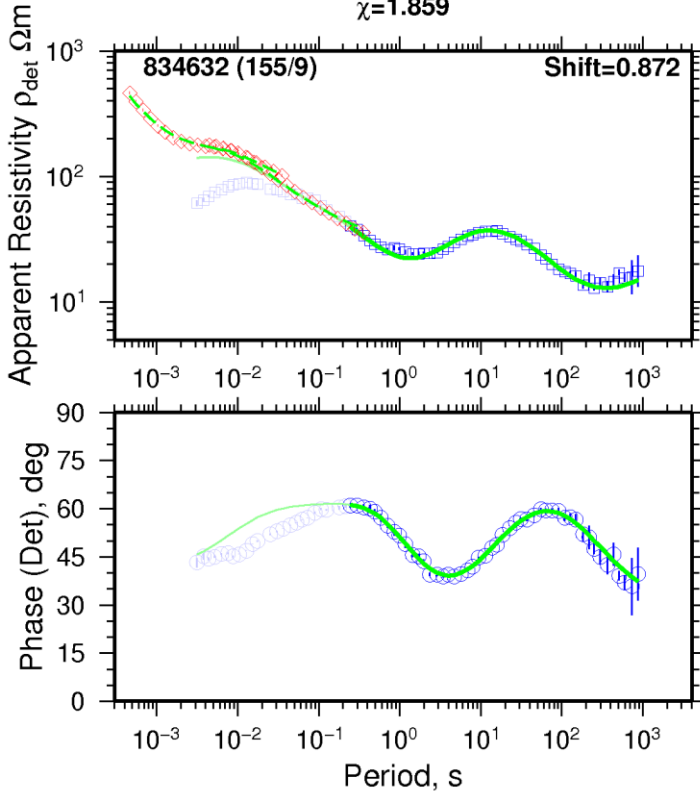
001 835619

$\chi=0.17598$



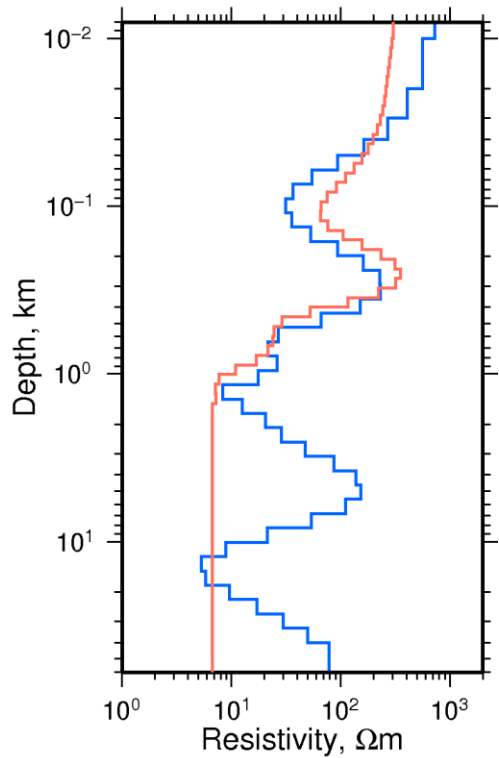
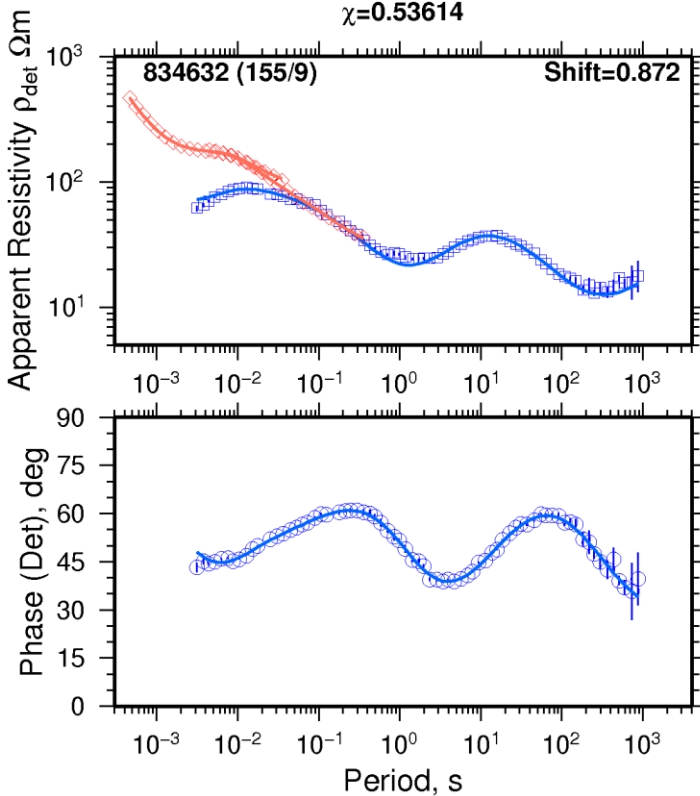
002

$\chi=1.859$



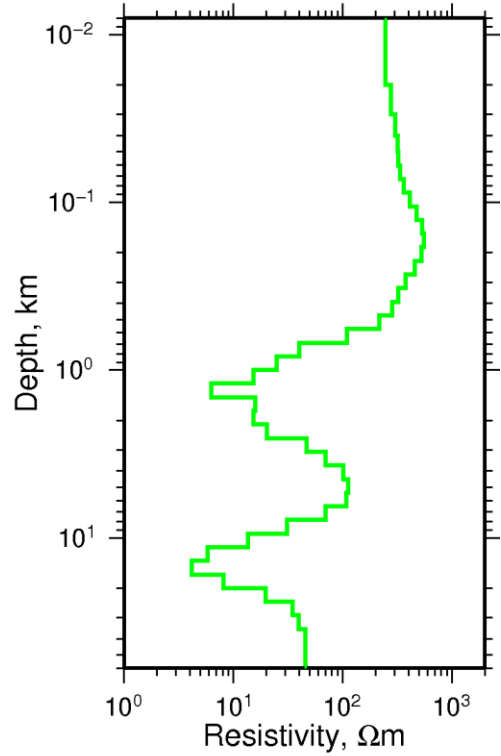
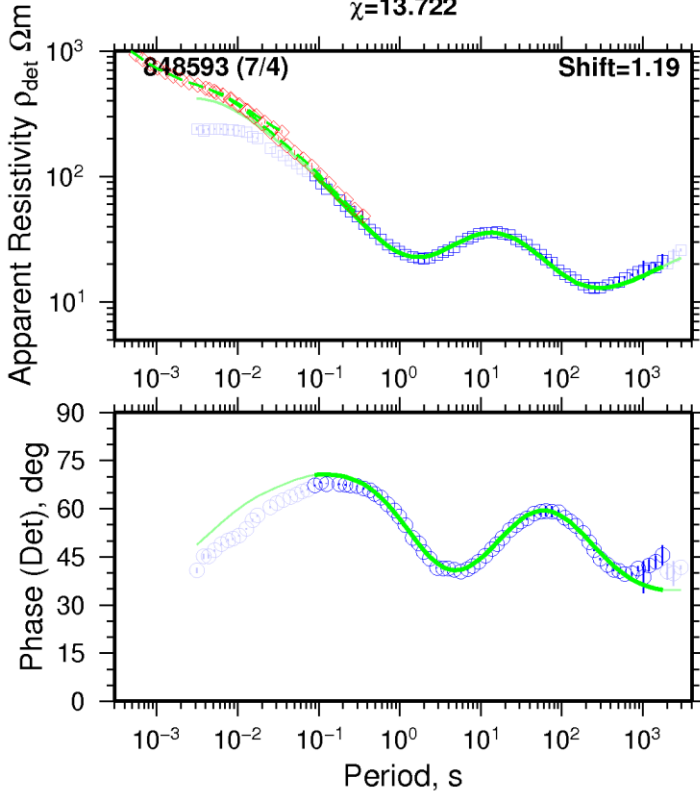
002 834632

$\chi=0.53614$



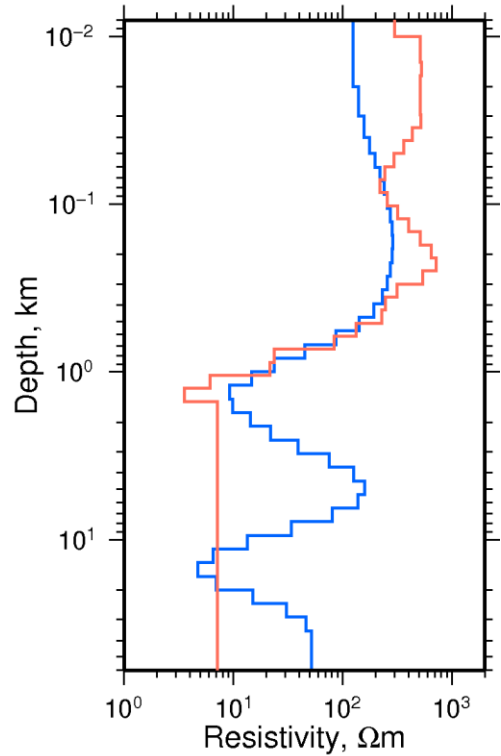
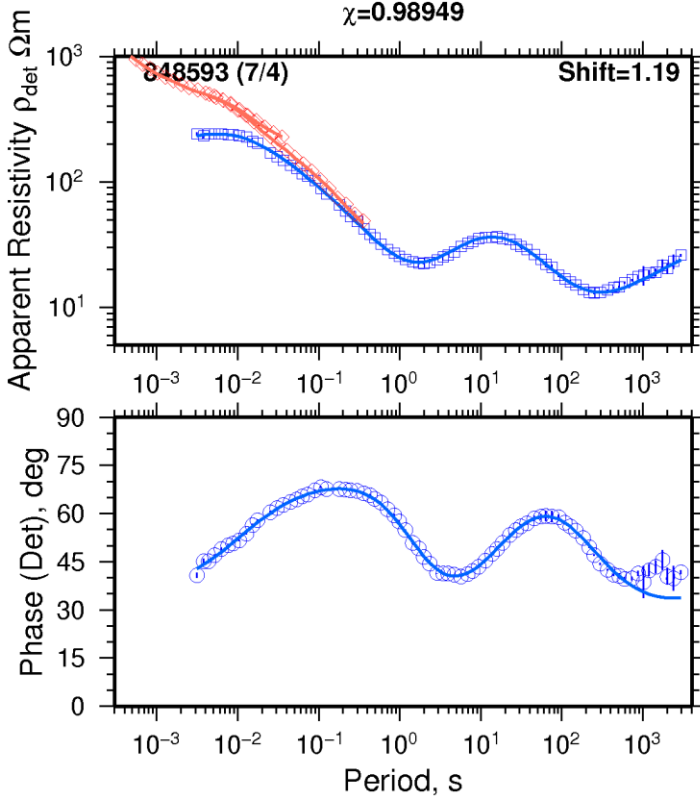
003

$\chi=13.722$



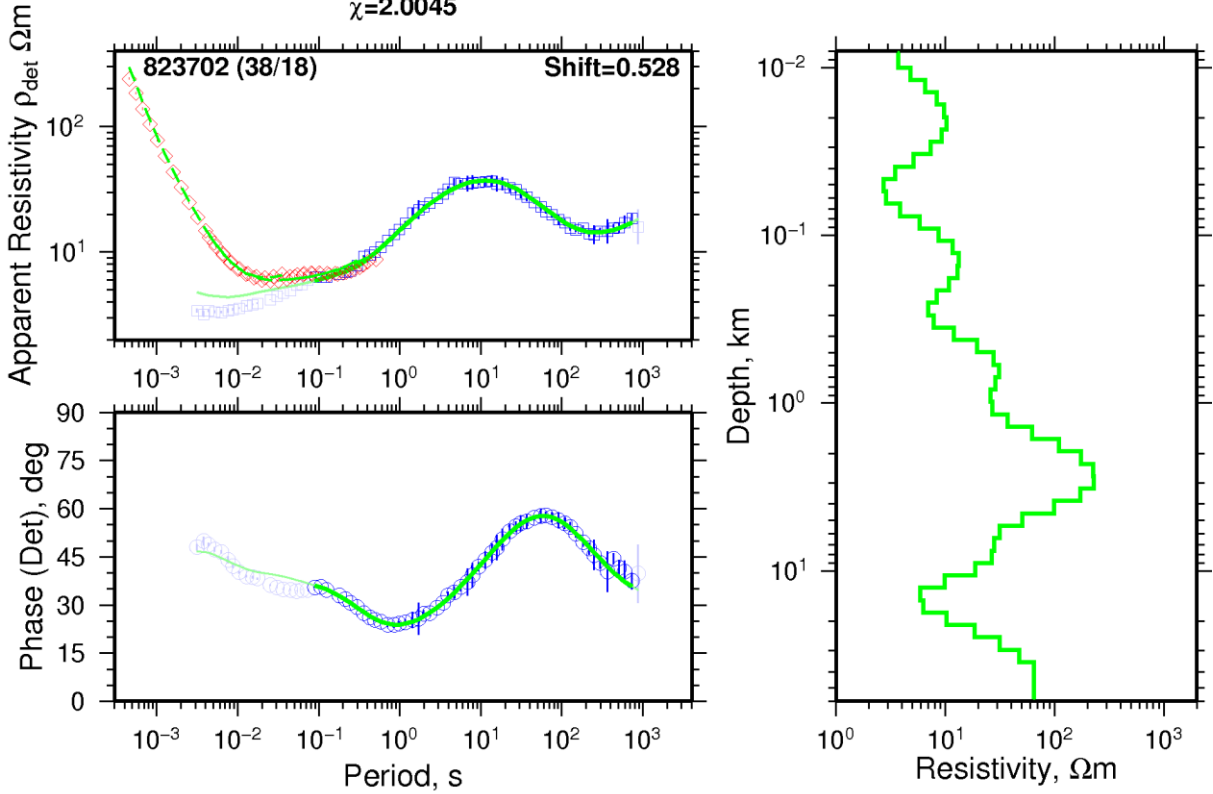
003 848593

$\chi=0.98949$



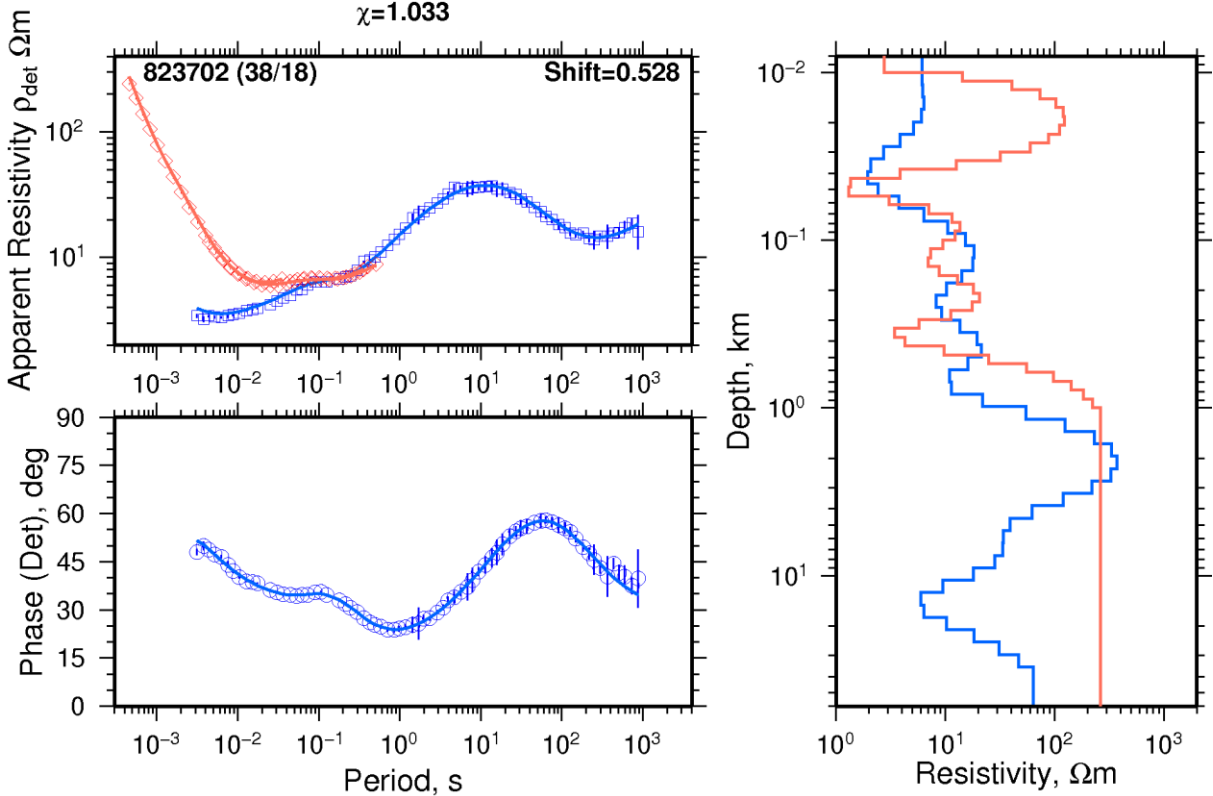
004

$\chi=2.0045$



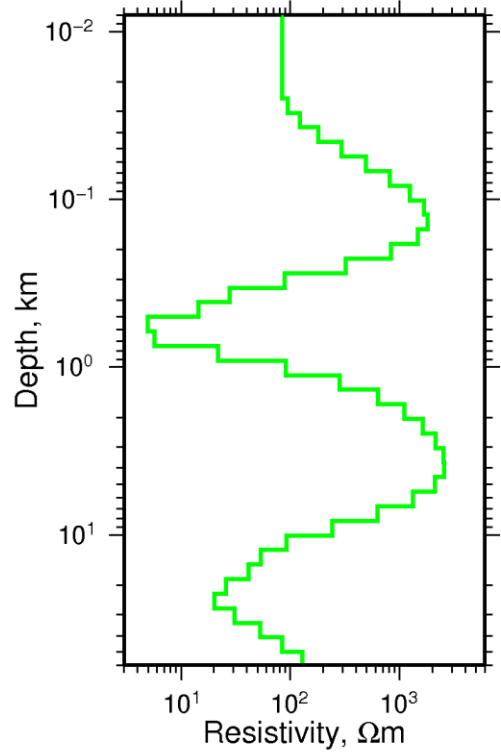
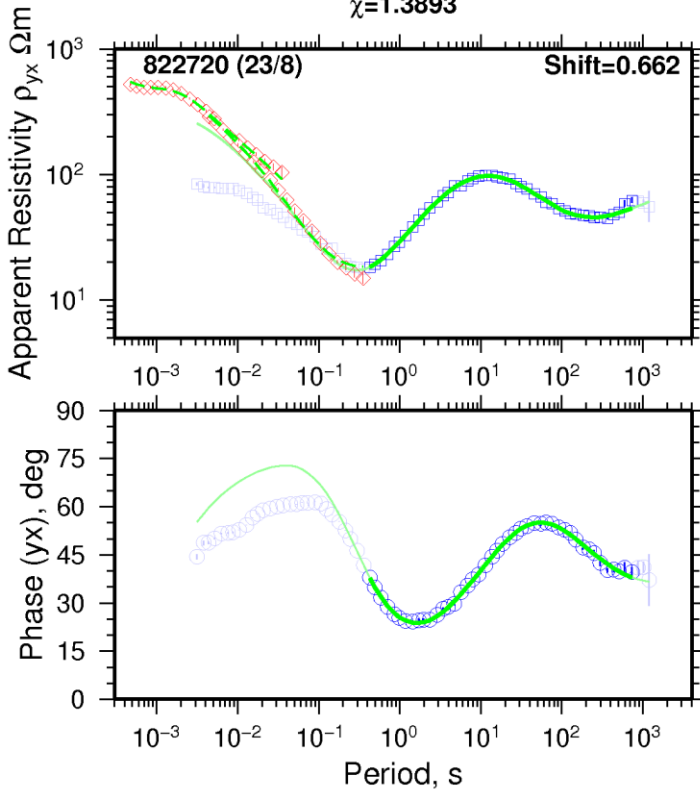
004 823702

$\chi=1.033$



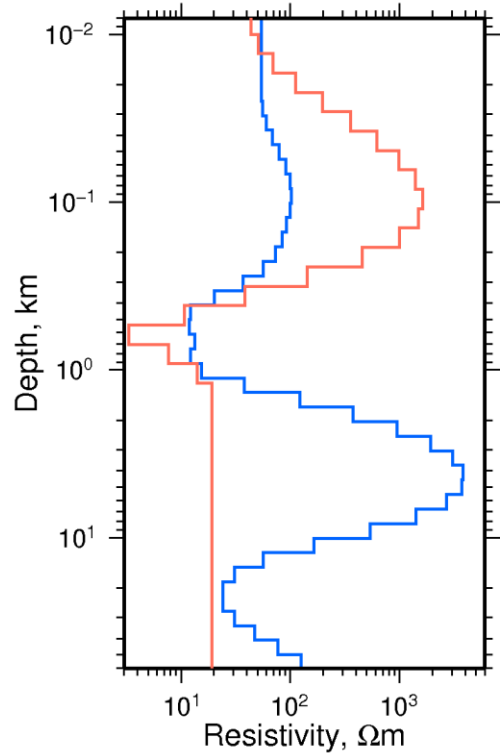
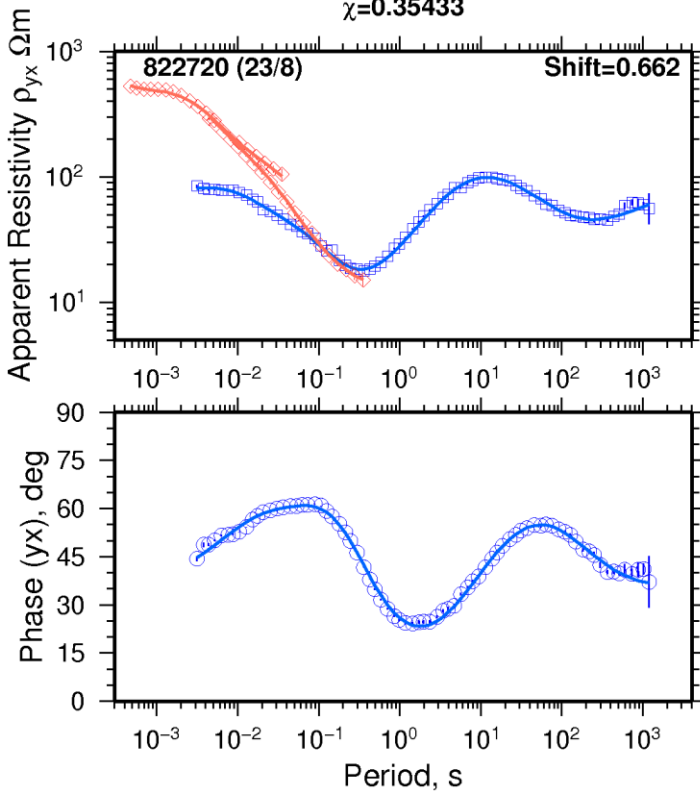
005

$\chi=1.3893$



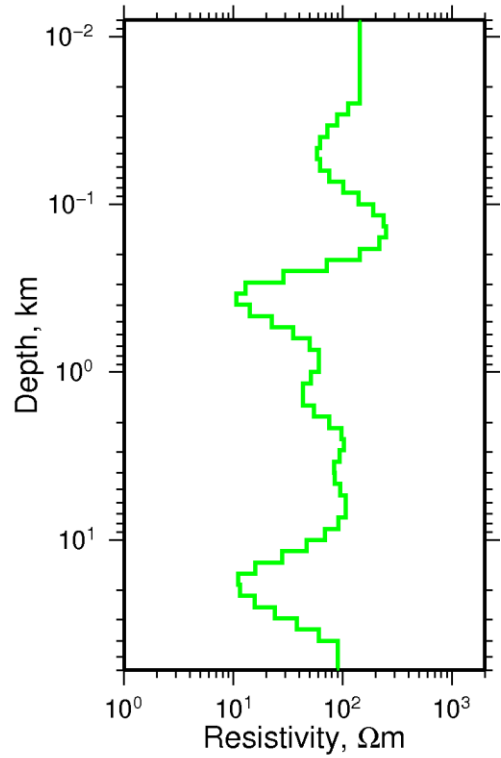
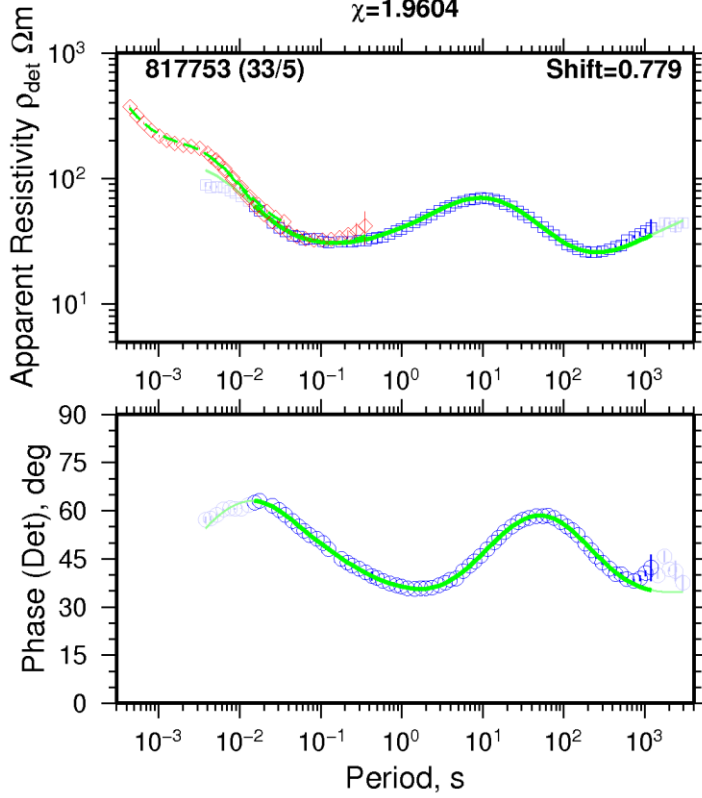
005 822720

$\chi=0.35433$



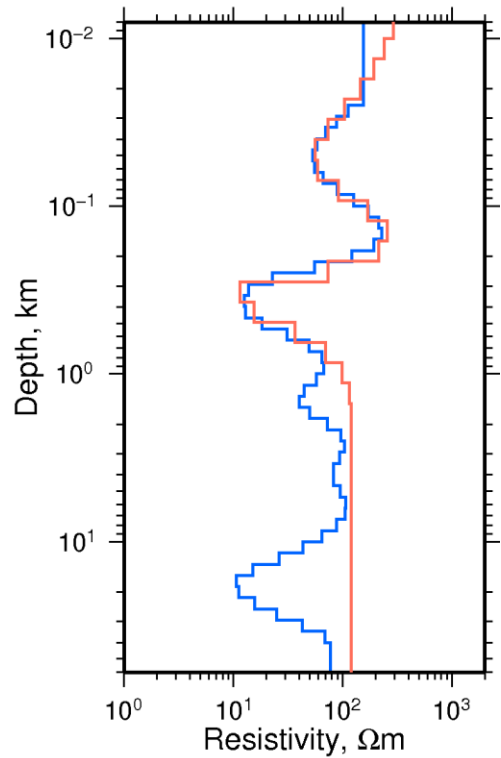
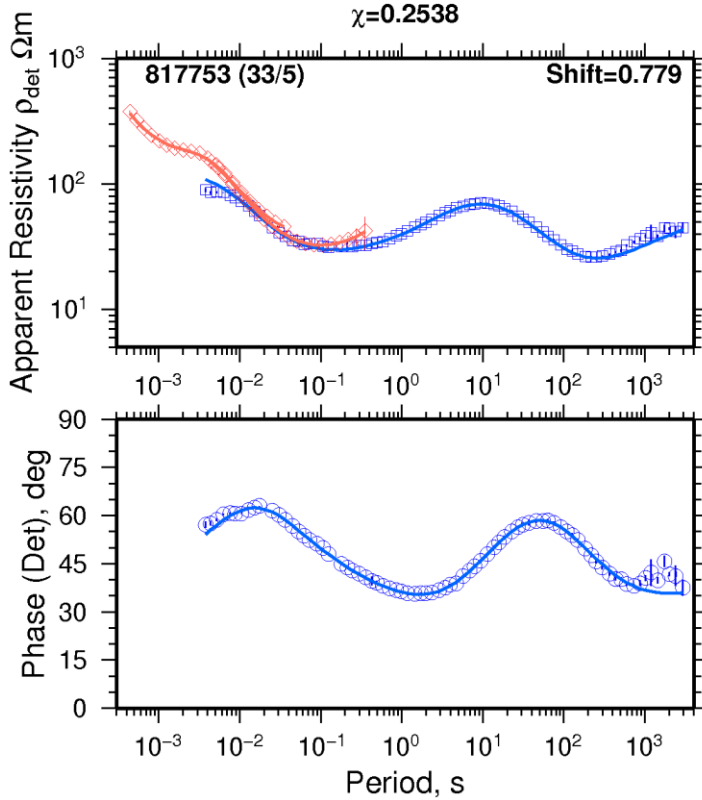
006

$\chi=1.9604$



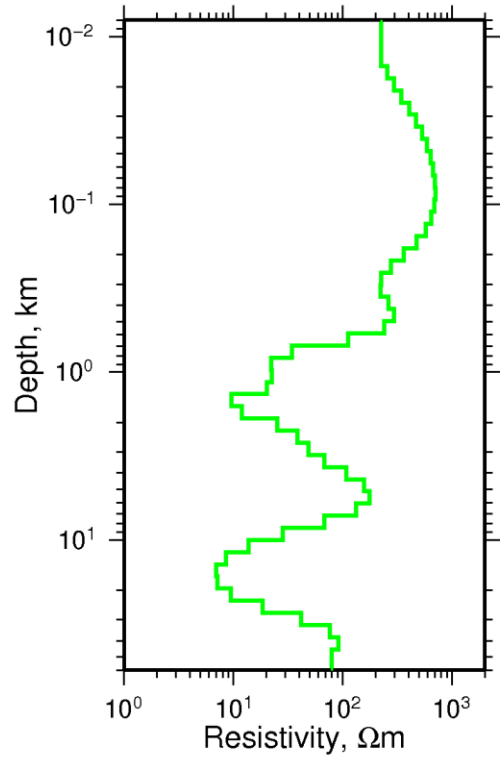
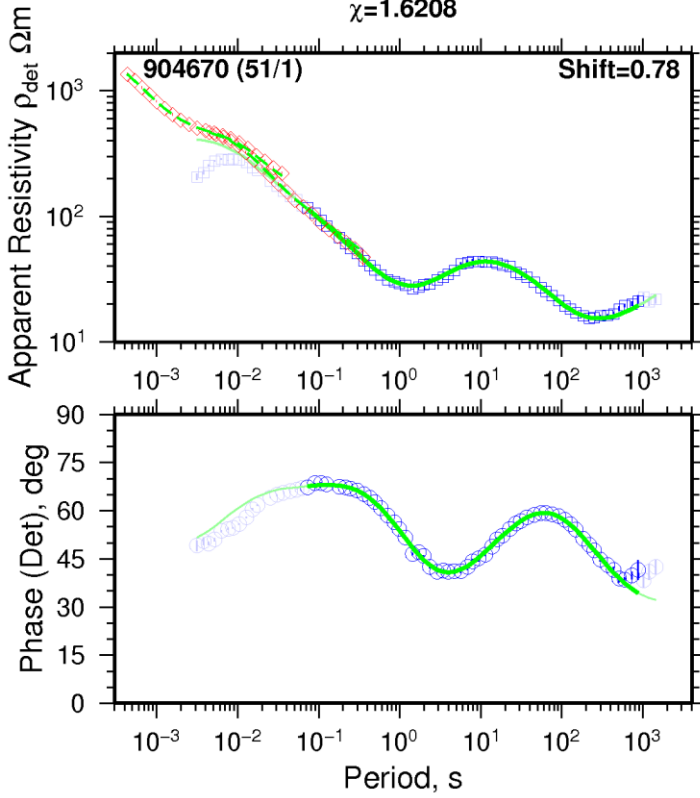
006 817753

$\chi=0.2538$



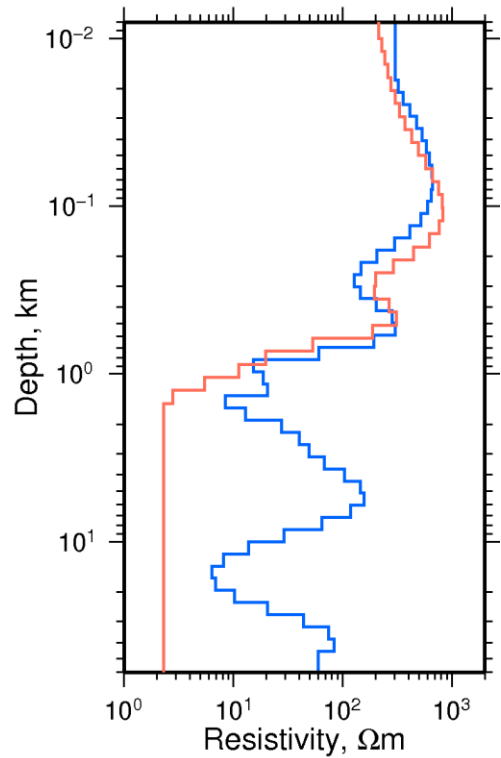
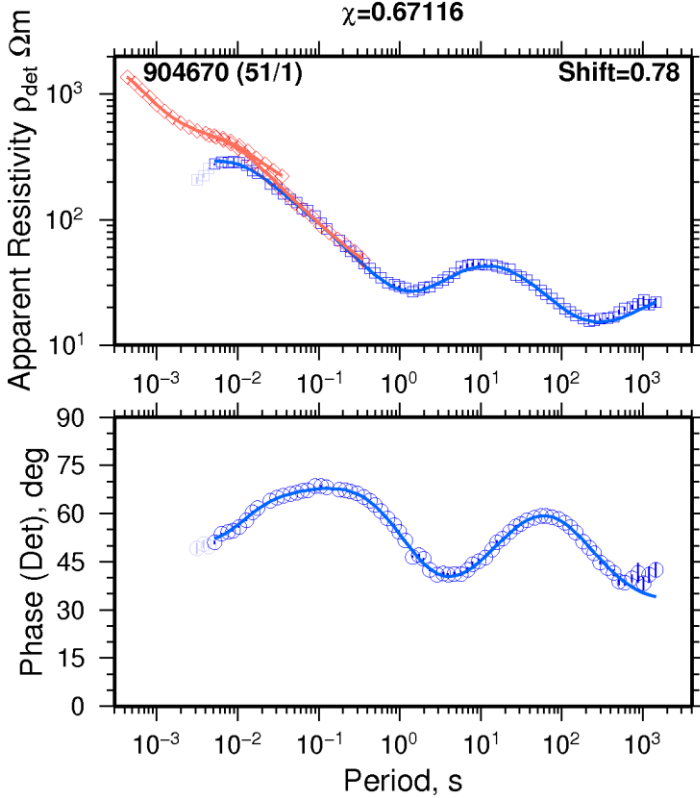
007

$\chi=1.6208$



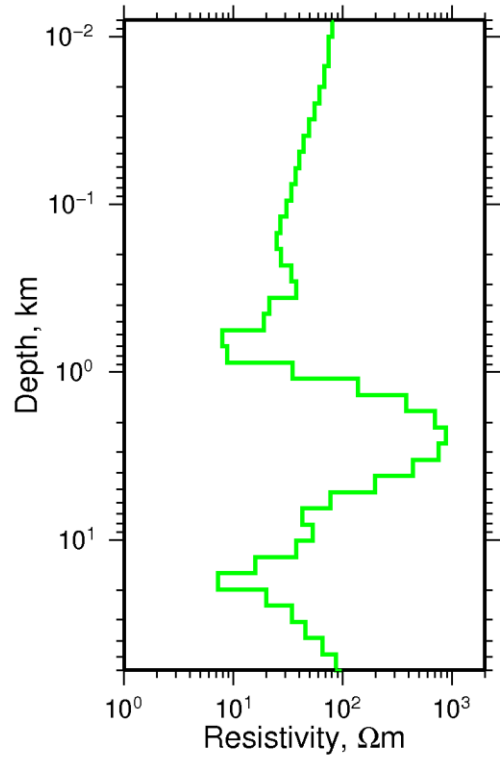
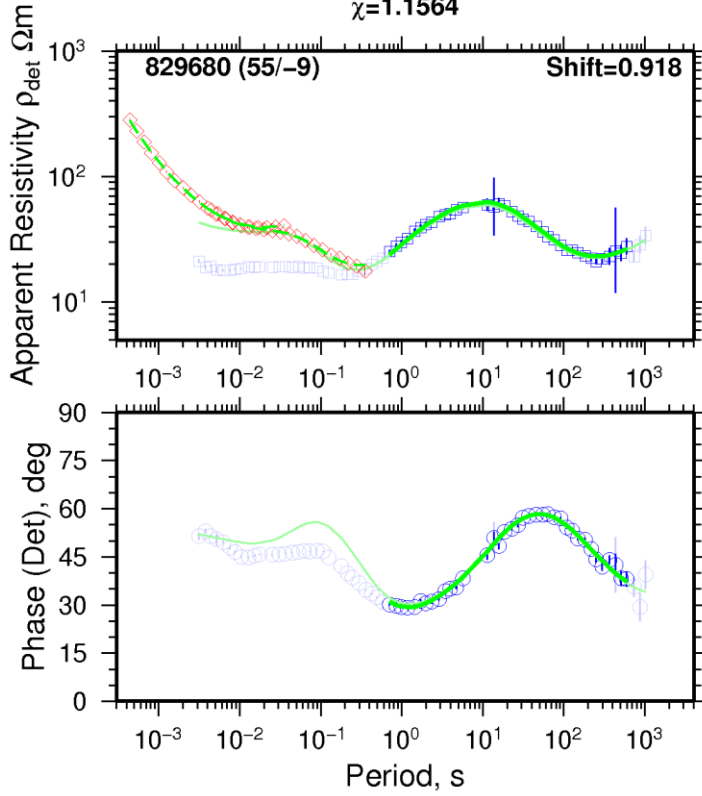
007 904670

$\chi=0.67116$



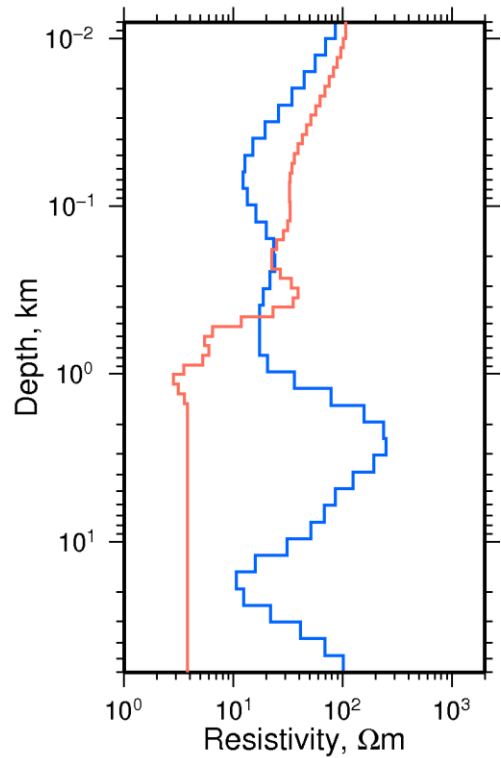
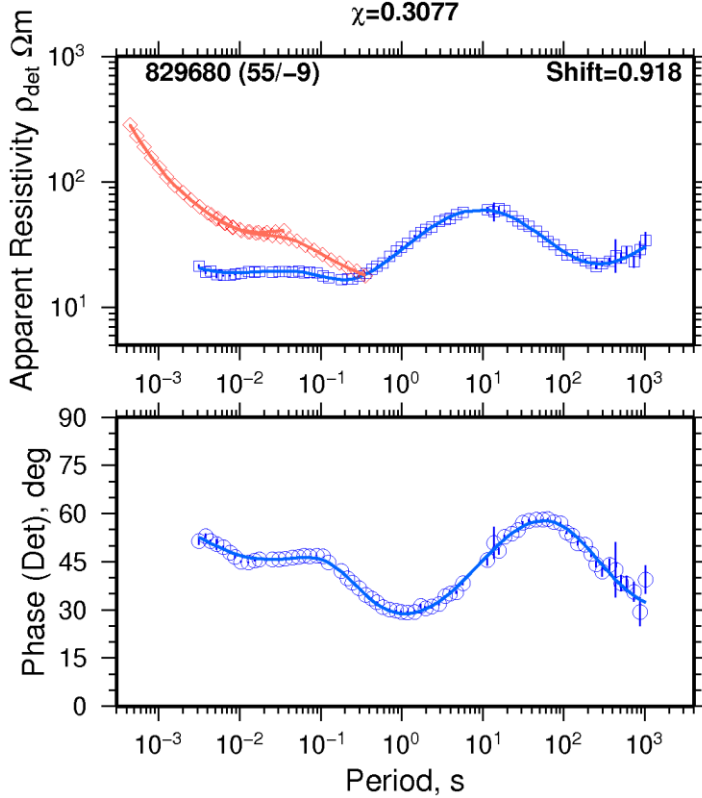
008

$\chi=1.1564$



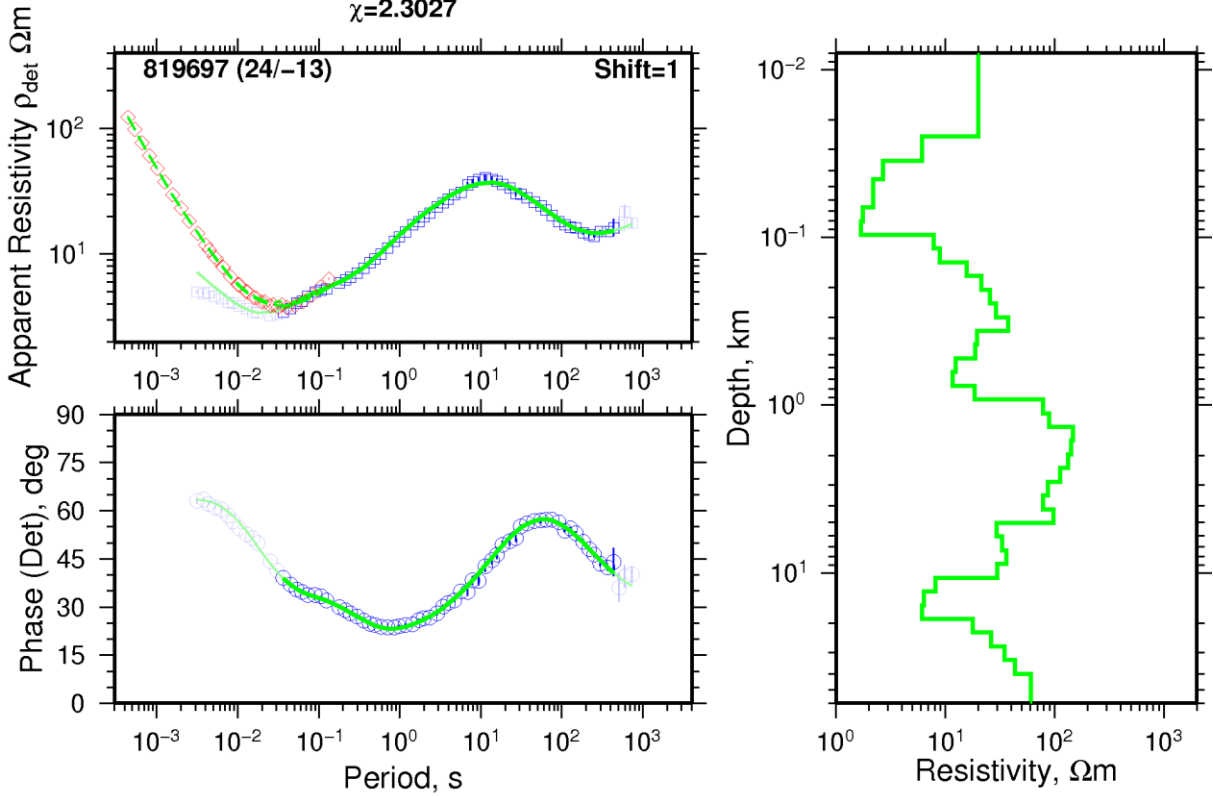
008 829680

$\chi=0.3077$



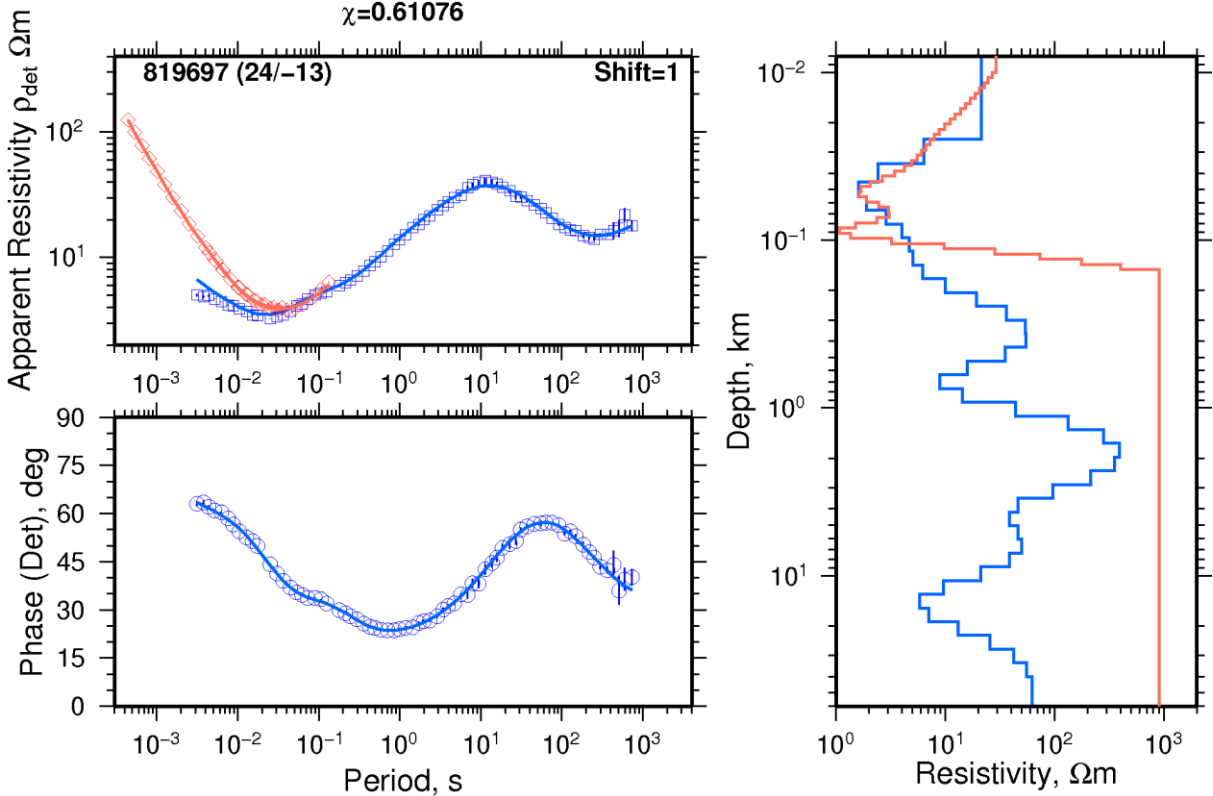
009

$\chi=2.3027$



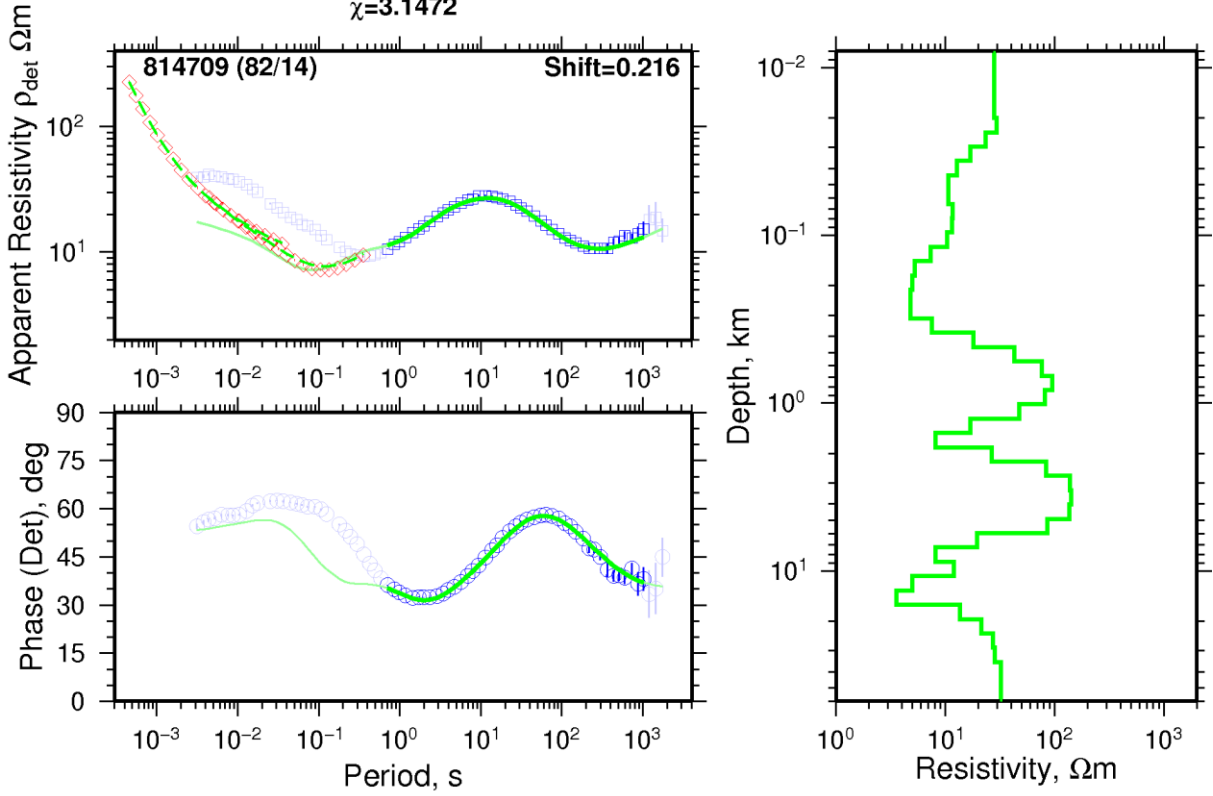
009 819697

$\chi=0.61076$



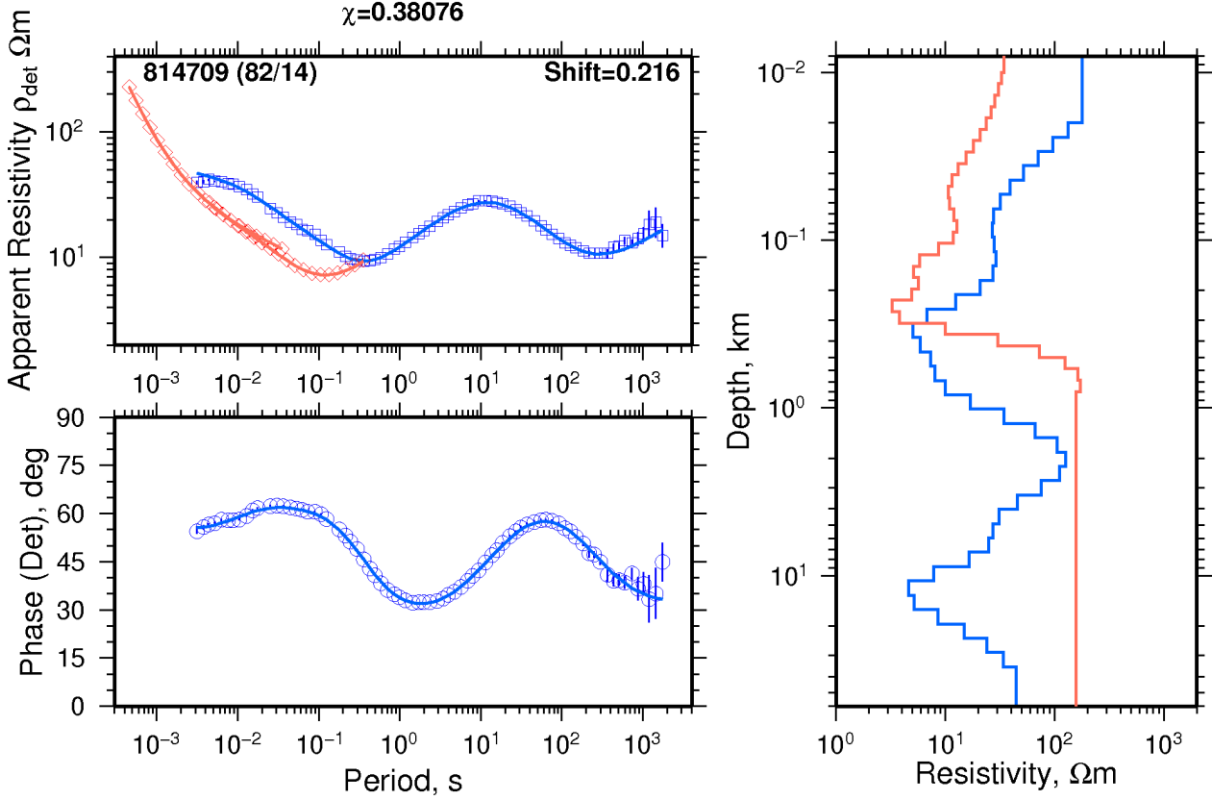
010

$\chi=3.1472$



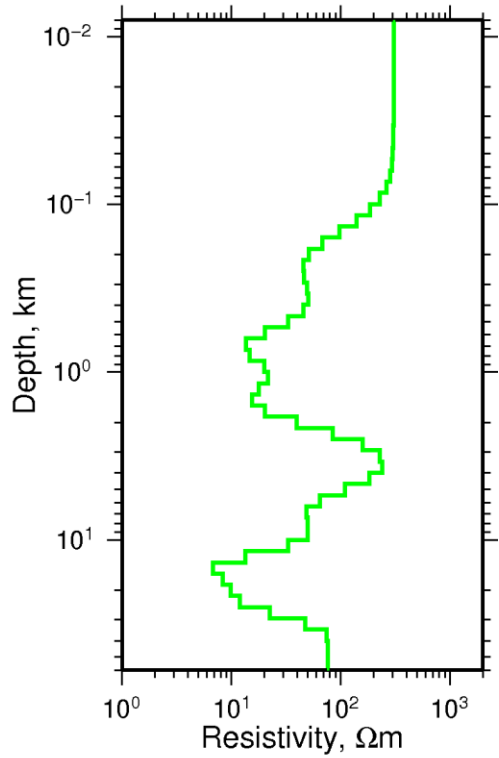
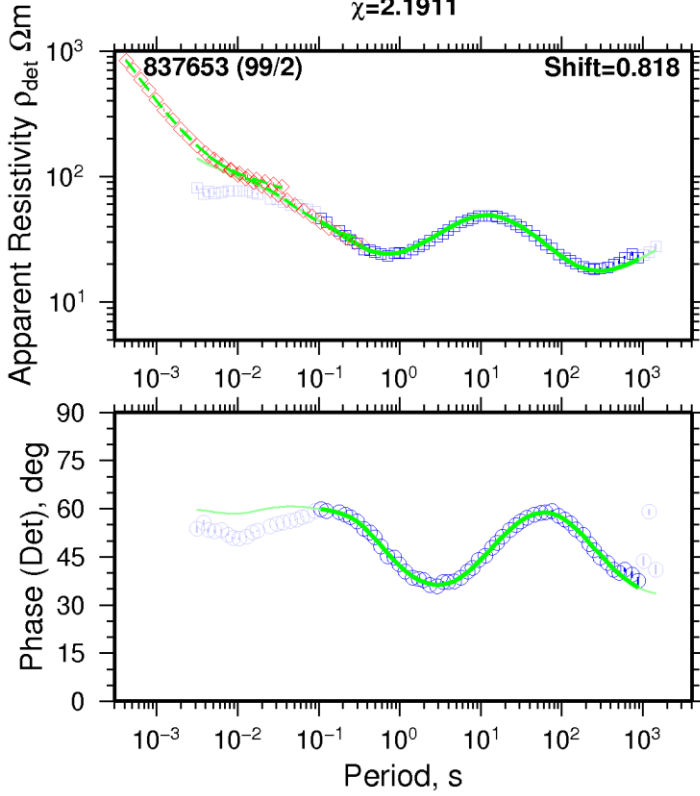
010 814709

$\chi=0.38076$



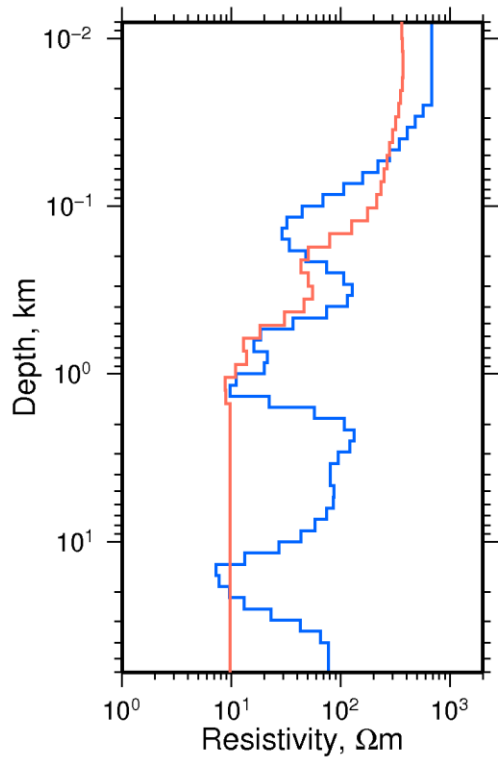
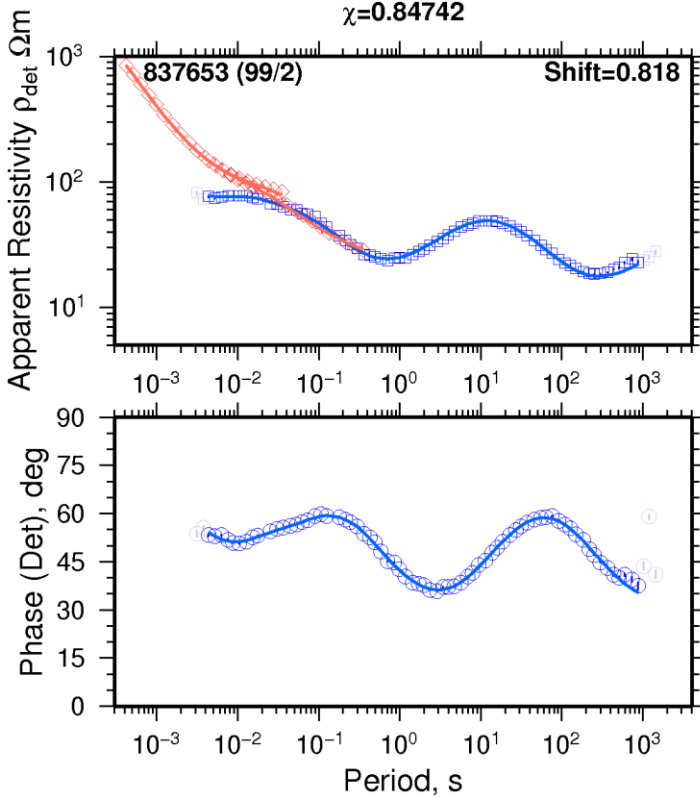
011

$\chi=2.1911$



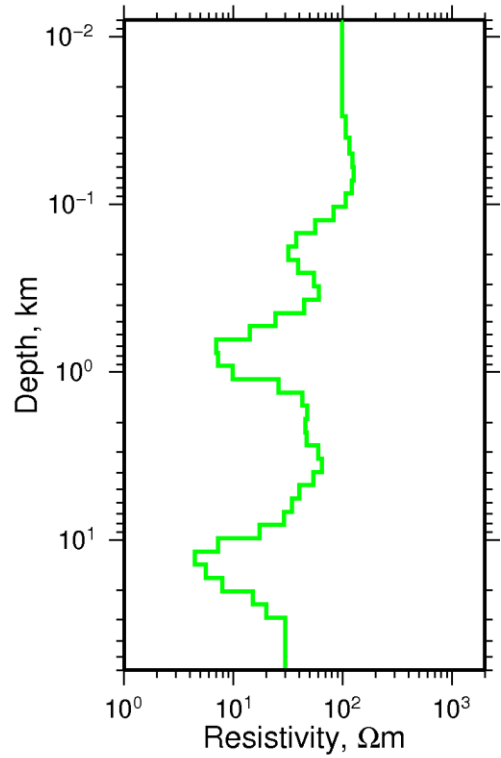
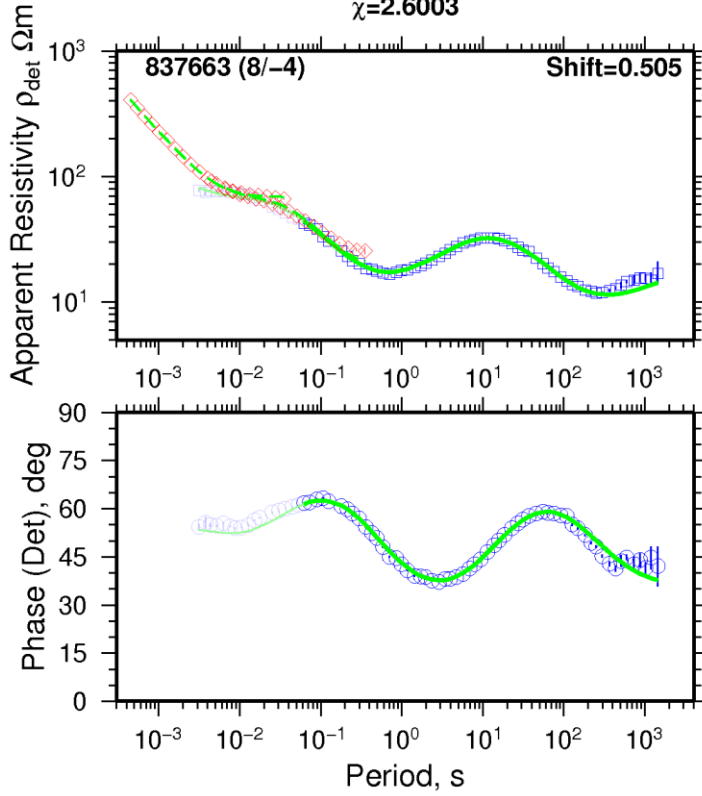
011 837653

$\chi=0.84742$



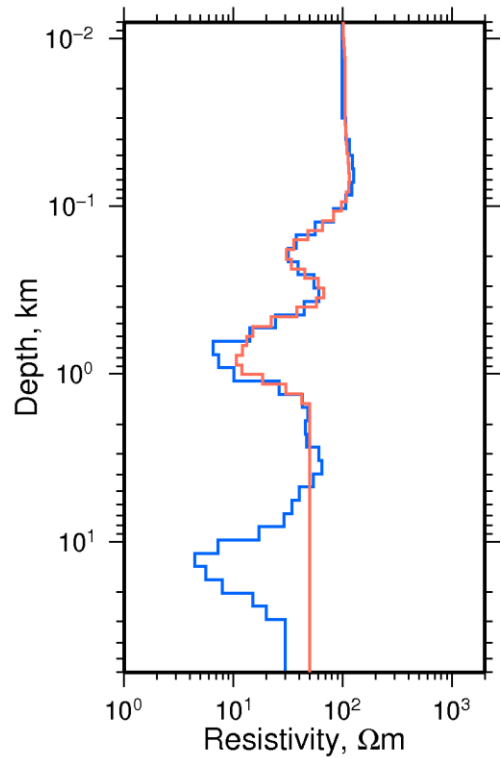
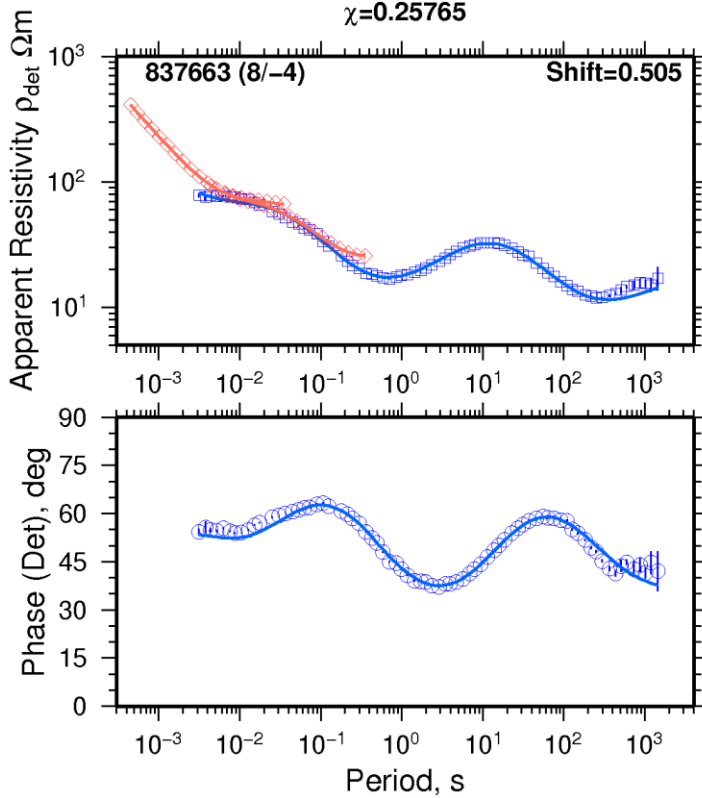
012

$\chi=2.6003$



012 837663

$\chi=0.25765$



999

