

**Botn Þjórsárjökuls; íssjármæling 2024:
Stöðugleiki legu kvísla Þjórsárjökuls.**



Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans

Eyjólfur Magnússon og Finnur Pálsson

Desember 2024

RH-10-24



HÍ | JARÐVÍSINDASTOFNUN

Inngangur

Sporður Þjósárjökuls hefur eins og flestir aðrir jökulsporðar hörfað síðustu áratugi. Við þetta hafa útföll margra kvísla frá Þjósárjökuli hliðrast til, sumar kvíslar þornað alveg en aðrar tekið við meira vatni. Þessar breytingar hafa haft áhrif á heildarrensli til Kvíslaveitna, og þannig á vatnsforða vatnsaflsvirkjana á Þjósársvæðinu. Ljóst er að lögung botns og yfirborðs ræður hvar útföll myndast við jaðar. Til eru nákvæm hæðarlíkon í hárrí upplausn af yfirborði jökuls sem byggð eru á gervitunglamælingum og hægt að endurnýja þau, en fyrirbyggjandi hæðarlíkan af botni Þjósárjökuls er byggt á íssjarmælingum frá árinu 1983, þar sem um 700 m eru milli mæilína.

Þar sem smáatriði í botnlögung geta stjórnað legu vatnsrása við botn, enn frekar þar sem ís er þunnur, og þar með staðsetningu útfalla var talið rétt að endurnýja hæðarlíkan botnsins með nýjum mælingum. Núverandi tækni til íssjarmælinga tekur þeirri eldri fram og óvissa er miklu minni bæði í staðsetningu og botnhæð. Auk þess sem auðvelt er að mæla mun þéttara mælinet með litlum tilkostnaði þegar á annað borð er komið á staðinn.

Mællíðangur

Haldið var til mælinga 3. apríl 2024 og heim aftur þann 6. Meiðhýsi LV (Svítan) var með í för til notkunar sem bækistöð. Jeppi LV dró kerru með vél-sleðum LV og JH og vörubíll HSSR flutti snjóbjól þeirra sem ætlaður var til flutninga og mælinga ef þyrfti.

Bækistöð var staðsett um 10 km frá jökuljaðri, en um 15 km frá þeim stað sem farið var uppá jökul (mynd 1.).

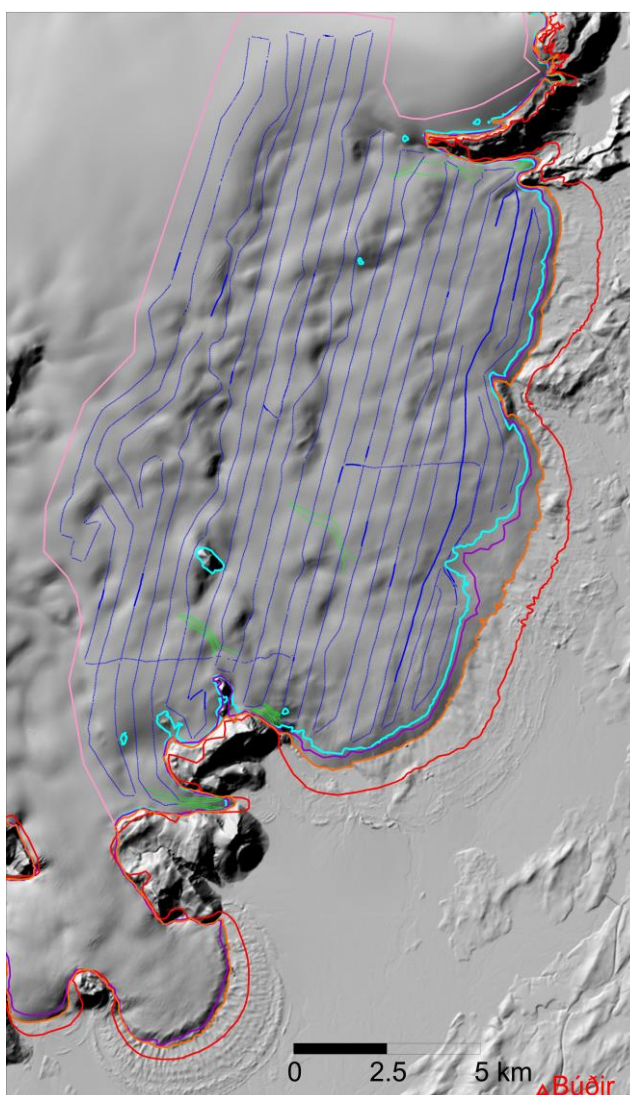
Mældir voru um 400 km af íssjarmælisniðum. Í meginráttum er mælinetið 20 snið með um 500 m millibili og stefnu SSV-NNA. Þrátt fyrir truflanir vegna bilana í mælitækjum tókst með þrautseigju að klára mælingar á þrem löngum vinnudögum, 3-5. Apríl, mest á vélsleðum en snjóbjól nýttur þegar veður var verst og myrkur.

Að mælingunum komu Eyjólfur Magnússon og Sveinbjörn Steinþórsson frá Jarðvísindastofnun Háskólans og Andri Gunnarsson og Eiríkur Finnur Sigursteinsson frá Landsvirkjun.

Mæligögn

Í raun eru mælingarnar tvíþættar: annars vegar skráning á staðsetningu og hæð í yfirborðssniði og hins vegar mæling á ísþykkt með radar, þessum mælingum er tvinnnað saman í eftirávinnslu á grundvelli tímamælinga.

Yfirborðsmæling var gerð með Trimble R9 GNSS tæki og eftiraleiðrétting unnin með Trimble TBC hugbúnaði og viðmiðunargögnum frá GNSS faststöðvum Veðurstofu Íslands; VONC, FJOC, HAFS og STKA.



1. mynd. Lega íssjarmælisniða á Þjósárjökli í apríl 2024 (dökkbláar línur). Jökuljaðrar 1983, 2013 og 2020 er einnig sýndir. Viðbótargögn fyrir gerð botnhæðarlíkans eru sýnd með ljósbláum, grænum og bleikum lit. Í bakgrunni er skuggamynd af mælisvæðinu gerð eftir IslandsDEM 1.0 frá Landmælingum Íslands. Jökulyfirborð er frá árinu 2013, byggt á lidar mælingum.

Áætluð nákvæmi er <10 cm á 3-víðri staðsetningu loftnetsmiðju. Á um 50 km hluta mælisniða (að kvöldi 5. apríl) var R9 tækið ekki í gangi, en lega línanna skráð á leiðsögutæki íssjárinnar. Hæðarupplýsingar á þessum hluta var fengin frá hæðarlíkani byggt á Pléiades gervitunglagögnum, eftir að hæð þess hafði verið leiðrétt skv. GNSS mælingunum sem gerðar voru í leiðangrinum, óvissa í hæð þessa hluta hæðarsniðanna líklega um 0.5 m.

Ísþykkt var mæld með 5 Mhz púlsradar, 2 útgáfur móttakara báðir frá Blue System Integration, IceRadar hugbúnaður útgáfa 4.4 og 6.0. Helsta óvissa í mati ísþykktar er vegna óvissu í ferðahraða rafsegulbylgju í ísnum, hér var notað 168 m/us en er líklega óviss á bilinu +-4 m/us þar í kring (upb. 2% óvissa) einkum vegna breytilegs vatnsinnihalds, og hægbreytileg í fleti líkast til á enn þrengra bili. Óvissan í metrum talið er þannig því meiri sem ísinn er þykkari, á þessu svæði 2-10 m eftir ísþykkt. Aðrar óvissur í þykktarmatinu eru litlar í þessu samhengi.

Mælingar botns og yfirborðs eru tvinnar saman með hugbúnaði sem Eyjólfur Magnússon (EM) hefur skrifað, en þar á eftir eru botnendurkastssniðin mígreruð tvívítt (sjá skýringu neðst á síðunni).

Vegna þess að bara er hægt að mígrera tvívítt er óvíst í hvaða átt innan endurkastsdiskins hin ákvarðaða ísþykkt bendir; þetta veldur nær engri skekkju ef botninn er sléttur en getur verið mjög villandi ef ekið er samsíða brattri hlíð í botninum, þá getur endurkast frá hlíðinni til hlíðar yfirgnæft endurkastið frá botninum beint undir mælitækjunum, og ísþykkt þá vanmetin. Einnig geta fleiri en einn endurkastflötur sýnilegur, en ekki hægt að skera úr hver þeirra er frá botninum beint undir, og hverjir annarsstaðar frá. Til að forðast þessi vandmál er reynt hafa legu mælinna hornrétt á hæðarbreytingar í botni, oft er hægt nota vísbendingar sem eru sýnilegar í jökulyfirborðinu til að velja legu mælinna skynsamlega út frá þessum vanda. Eftir mígreringu er botnendurkastssferillinn (ísþykkt) rakinn, og notaður til þess hugbúnaður sem Eyjólfur hefur þróað.

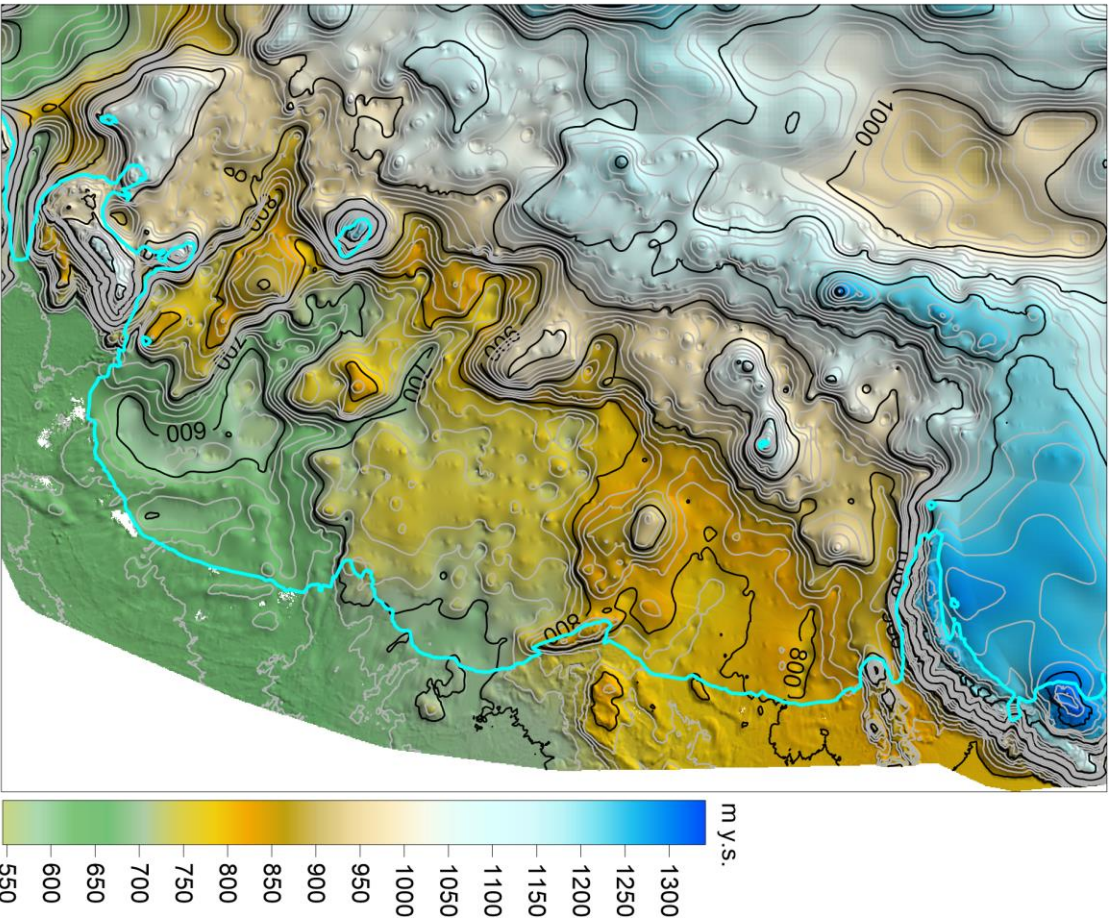
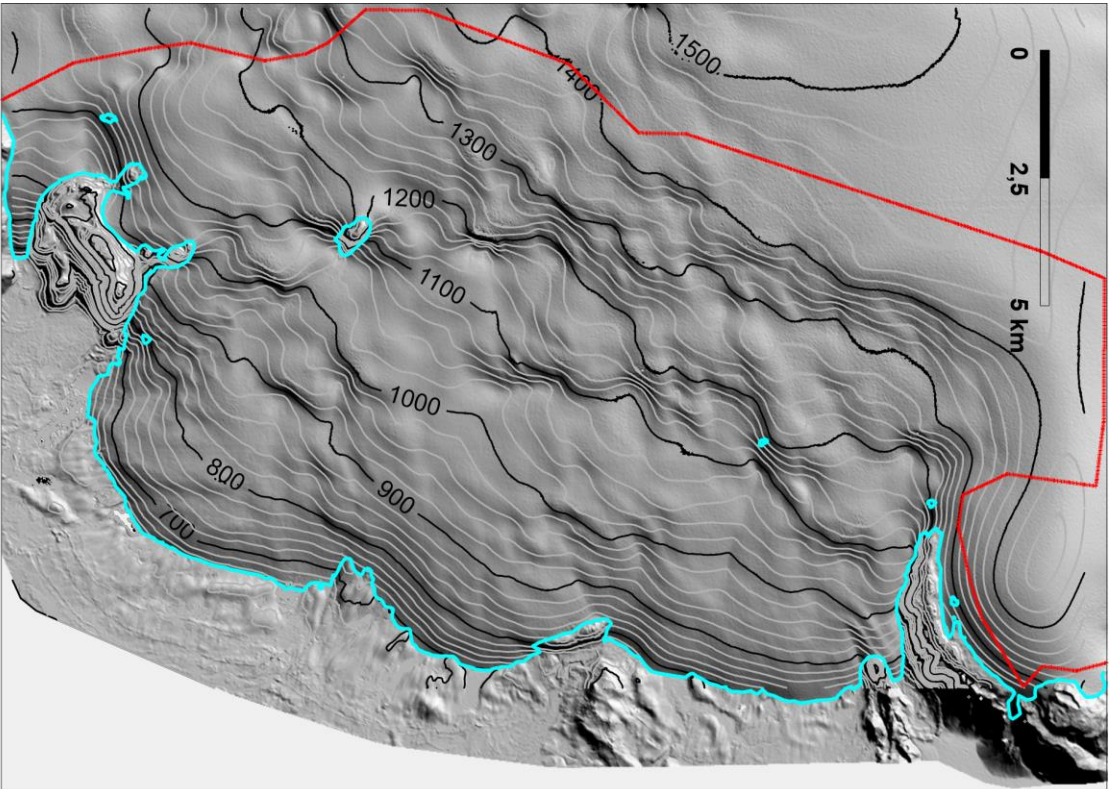
Vegna þess hve botnendurkast í mælisniðum var nær alltaf bæði sterkt og samfellt gekk rakning, sem oft er mjög tímafrek, hratt fyrir sig (sjá sniðmyndir í viðauka).

Vinnsla botnkorts

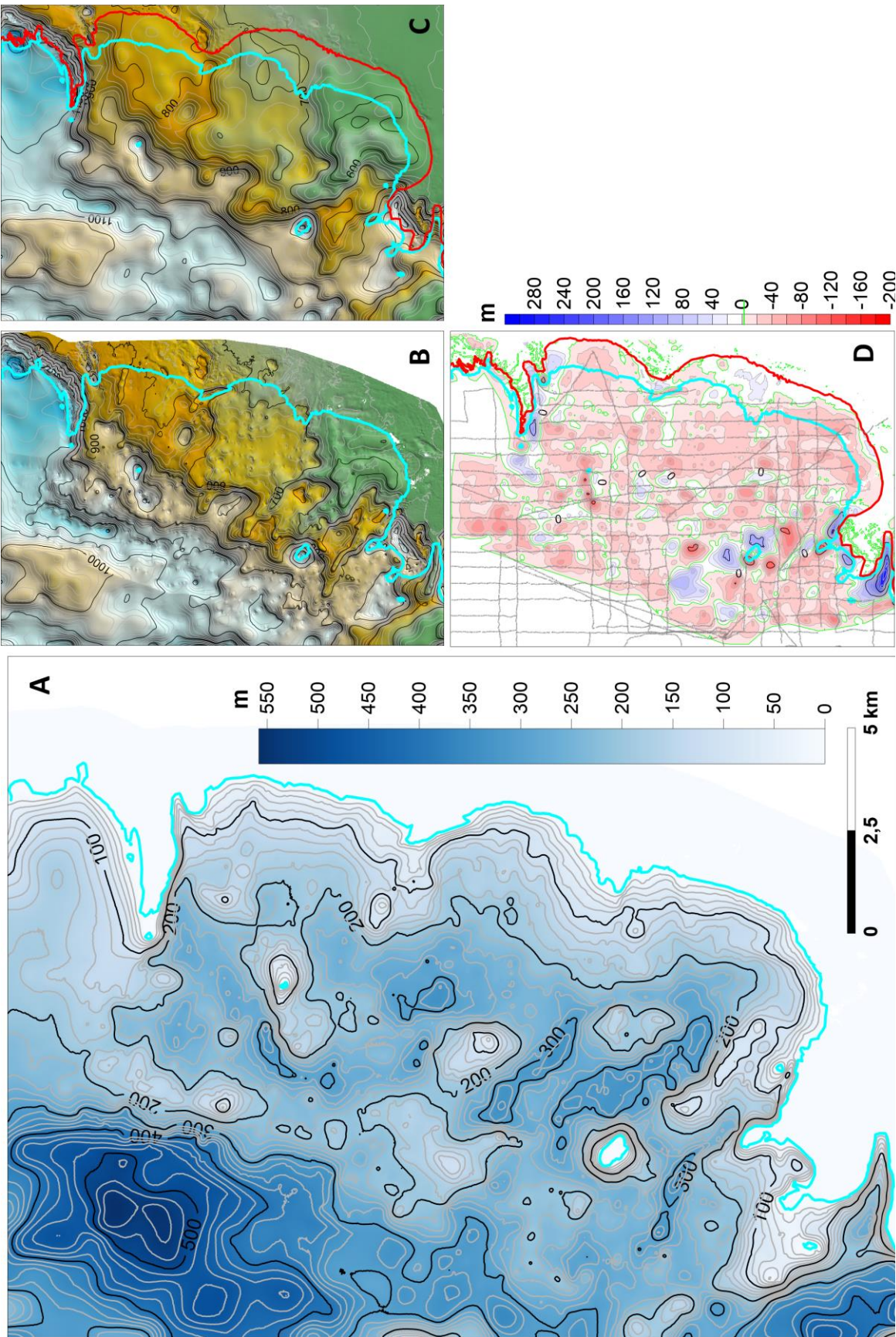
Vegna þess að landslag mælisvæðisins er að mestu hægbreytilegt og mælinlínur þéttar, var í fyrstu talið að reikna mætti botnflötin eingöngu eftir botnhæðum mælisniðanna með því að nota kringing brúunaraðferðina. En það kom í ljós að vegna þess hve hæðargildin eru þétt eftir mælinunum en gisin hornrétt á þær skilar brúunin jafnhæðarlínum sem þvingast til að verða nærri hornréttar á mælinlínur, sem er ankanalegt jafnvel þó hæðarskekkja vegna þessa sé í sjálfu sér ekki veruleg. Þess vegna var á stöku stað skotið inn hjálpargögnum til að sköpulagið væri nær „eðlilegu“ landslagi (sýnt með grænum lit á mynd 1.), auk þess sem hæðargildum í öllum jökulskerjum var bætt við og gögn um hæð landsins við jökuljaðarinn einnig höfð með til að tenging þangað sé eðlileg (merkt með ljósbláum lit á mynd 1.). Þá var einnig bætt við gagnsafnið rönd úr gamla botnhæðarlíkaninu (bleik lína á mynd 1.) norðan mælisvæðisins til að tryggja eðlileg samskeyti þeirra. Síðan var botnhæðarlíkanið reiknað með kringing með þessum viðbótargögnum.

Á mynd 2. eru sýnd kort af yfirborðshæðarlíkani gerðu eftir Pléiades gervitunglagögnum frá hausti 2023 og botnhæðarlíkanið sem útúr þessari vinnslu kom. Þarna hefur nýja botnhæðarlíkaninu verið skeytt inn í það gamla.

Mígreringin er aðferð til að safna orku endurkasts frá tilteknum punkti í endurkastsfleti saman á einn stað; þetta þarf að gera vegna þess að endurkast frá hverjum sendipúlsi kemur frá nærri hringlaga svæði undir sendinum með um 200 m rás og hver punktur þannig margmældur þegar ekið er um. Þetta þýðir í raun að endurköst á tilteknum stað á mælisniðinu geta komið frá endurkastflötum fyrir framan og aftan sendinn en líka til hlíðar og raunar úr öllum áttum. Tvívíð mígrering gerir bara ráð fyrir endurkastflötum eftir mælinunum, sem dugar vel ef botnlandslag er lítið. Í bröttu botnlandslagi er reynt að mæla íssjárnið í stefnu líklegs botnshalla en það dregur mjög úr villum vegna takmarkana tvívíðu mígreringarinnar. Til að hægt sé að mígrera þrívítt þyrfti bil milli mælinna að vera 10 til 20 falt minna en hér er, orka frá sérhverjum punkti í endurkastsfleti væri þá til staðar í 10 til 20 mælisniðum og mígreringin gæti skilað einkvæmri lausn fyrir legu hans.



2. mynd. Hægrí: Yfirborðskort frá hausti 2023 Geri eftir Pléiades gervihnattamyndum. Jökuljarðar og jökulsker sýnd með ljósbláum línum. Vinstri: Hæðarkort umnið eftir íssjámælingum voríð 2024.



3. mynd. A: Ísþykktarkort miðað við yfirborðshæð haustið 2023. B: Botnkort eftir mælingum 2024. C: Botnkort frá 1983. D: Botnkort 1983 mínus eftir mælingunum 2024. Jæðar 2023 sýndur með ljósbláum línunum og jæðar 1983 með rauðm línunum.

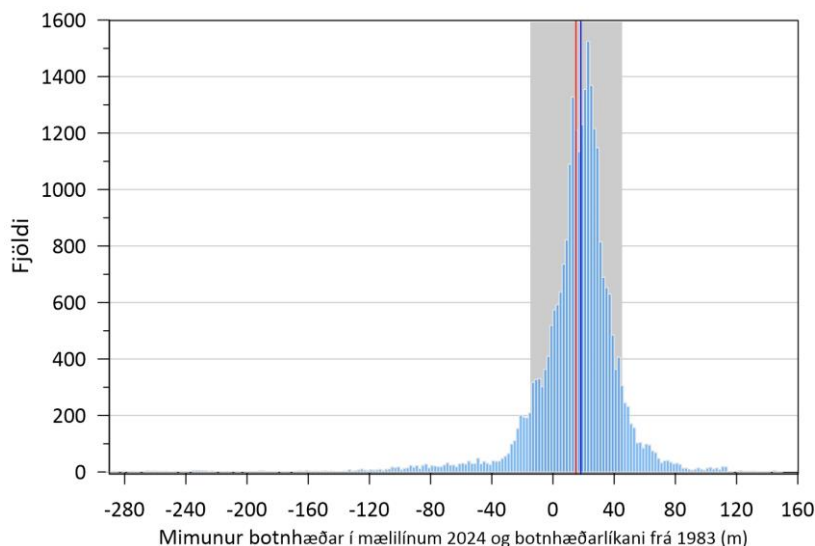
Samanburður nýja botnhæðarlíkansins við hæðarlíkanið frá 1983

Á mynd 3. er sýndur mismunur hæðarlíkansins frá 1983 og þess nýja. Gott samræmi er um alla megindrætti. En verulegu munar þar sem mikill bratti er og háir krappir kollar. Þetta skýrist að hluta ef því að í eldra kortinu voru botnsniðin lágheypisúð áður en brúað var, en annars staðar af því að mælilínur voru fjarri og ekki fyrirleggjandi upplýsingar um hæðir í skerjum og sum þeirra ekki uppúr jökli þá, en sprungið nærri þeim og mælilínur því viljandi ekki nálægt.

Greining mismunar nýja og gamla hæðarlíkansins sýnir að meðalfrávik er -10,5 (botnhæð 1983 hæðarlíkansins að jafnaði lægri en þess nýja) m miðgildi mismunar -11,3 m en staðalfrávik 32 m (lækkar í 25 m ef ekki eru höfð með frávik stærri en 100 m). Flest stærstu frávikin eru á eða nærri jökulskerjum, þar sem hraðar breytingar eru í botnlandslaginu.

Önnur aðferð til að skoða gæði gamla botnkortsins er að bera saman mæligildi botnsniða nýju mælinganna. Tíðnirit þess er sýnt á 4. mynd. Þessi samanburður gefur meðalfrávik -14.9 m (1983 botinn lægri en nýju mælingarnar sýna), miðgildi -18,5 m og staðalfrávik 31,5 m.

Þessi mismunur getur stafað af nokkrum þáttum helst: villu í túlkun gömlu íssjarmælingunum (villa í mati ísþykktar), villu í staðsetningu í gamla mælinetinu (mælt með Loran-C gæti verið algeng villa 50 – 200 m hliðrun yfir langar vegalengdir í mæli sniði), villa í yfirborðshæð í gamla mælinetinu (mælt með mismun loftþrýstings á mælistað og í búðum, nákvæmni metin um 5 m, en er að mestu hliðrun yfir langar samfelldar vegalengd í mælisniði en ekki slemбивilla), og loks villa vegna brúunar gömlu mælinganna.



4. mynd. Tíðnirit mismunar botnhæðargilda í íssjarmælilínum 2024 og botnhæðarlíkans frá 1983. Meðaltal mismunar er sýnt með rauðri línu (14,9 m), miðgildi með blárri (18,5 m) og svæði innan 1. staðalfrávíks frá meðtali með gráu skyggðu svæði.

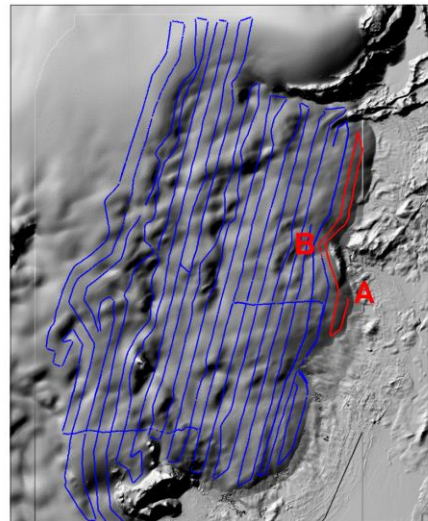
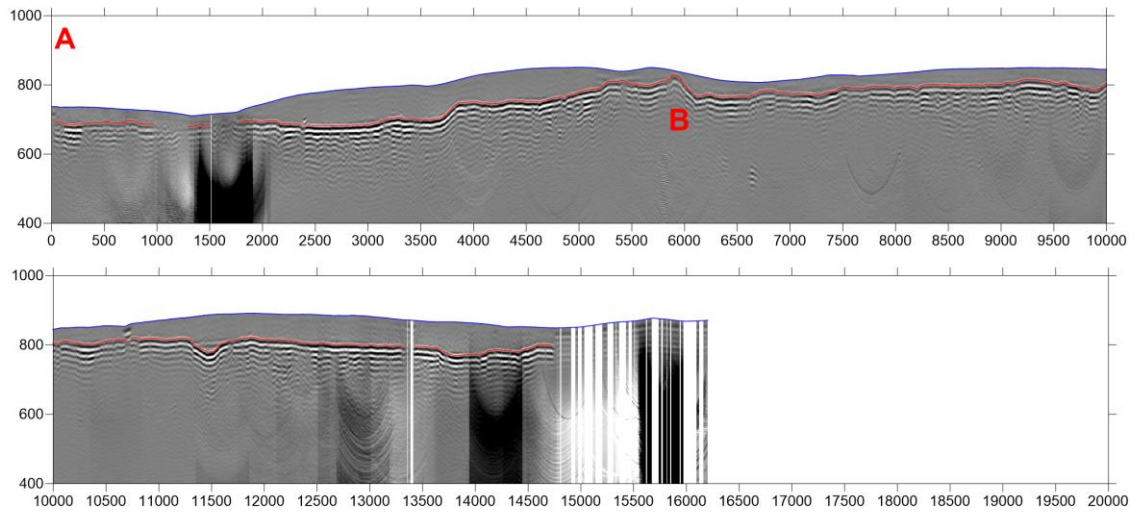
Viðauki I.

Migreruð íssjárnsnið frá mælingum á Þjórsárjökli 3-5. apríl 2024.

Þjórsárjökull íssjarmæling 3. apríl 2024

thjorsarj20240403a.hdf5

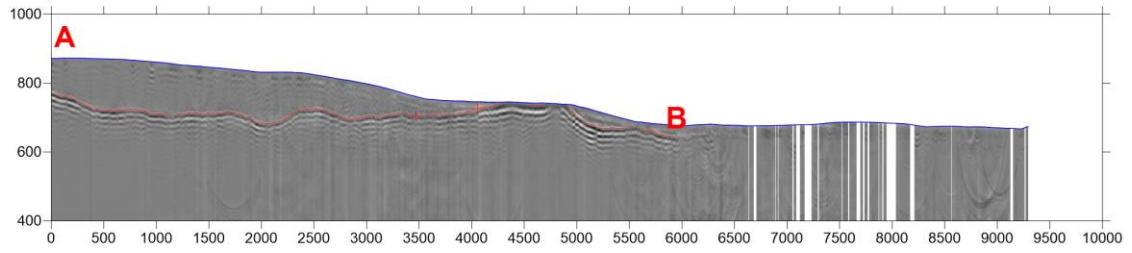
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsarjokull2024\thjorsarj20240403a.h\line_af1_0_to_4_dA_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl_median_cor.grd



Þjorsárjökull issjarmæling 4. apríl 2024

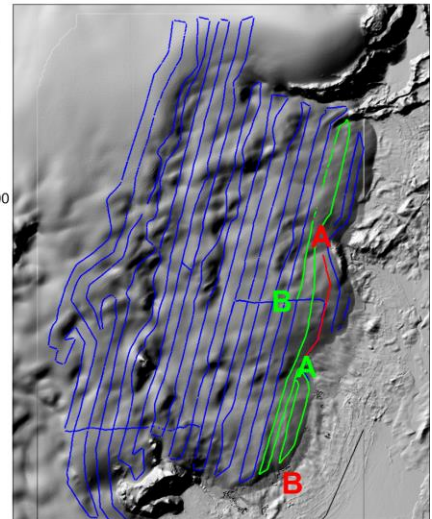
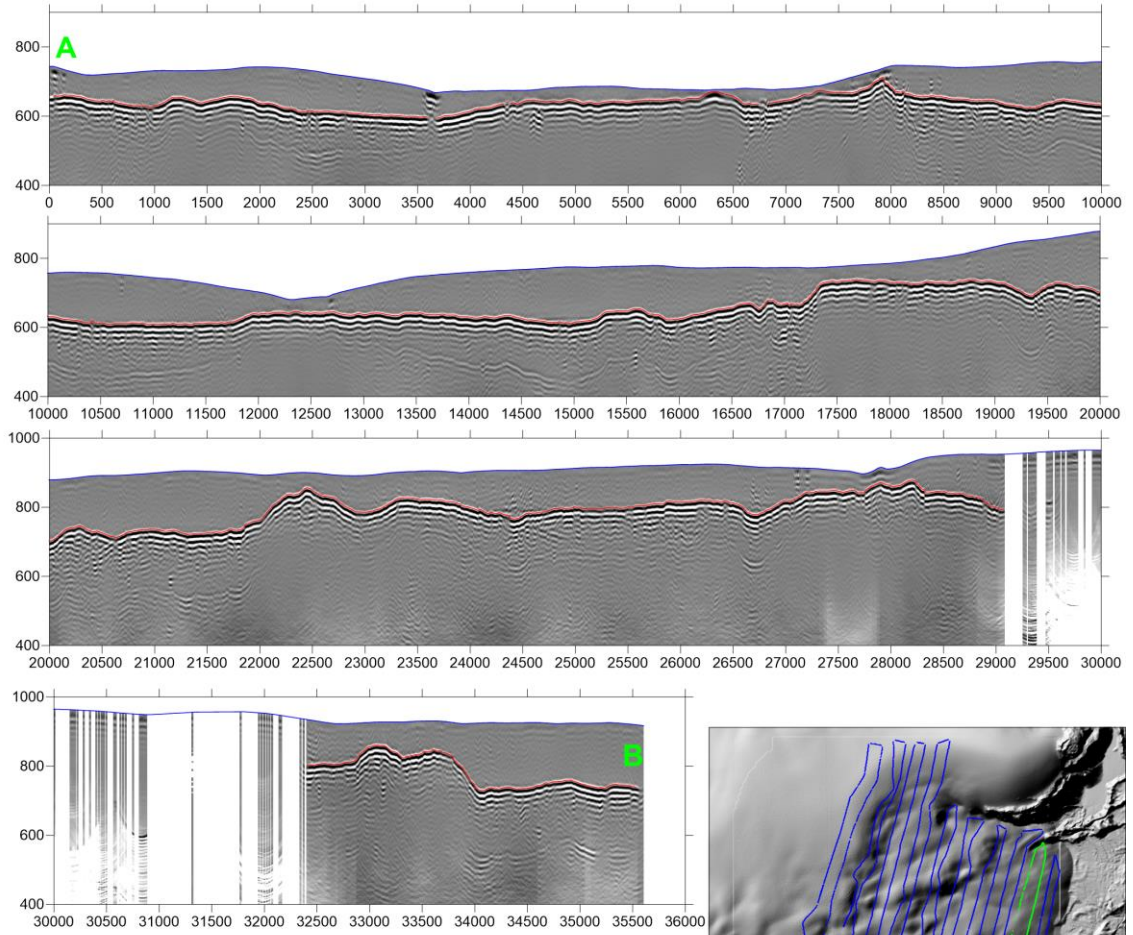
thjorsarj20240404a.hdf5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsarjökull2024\thjorsarj20240404a.h\line_af1_0_to_2_dA_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl_median_cor.grd



thj20240404c.hdf5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsarjökull2024\thj20240404c\line_af1_0_to_5_dA_35\GPS_seinkun_2.2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



Þjórsárjökull issjarmæling 4. apríl 2024

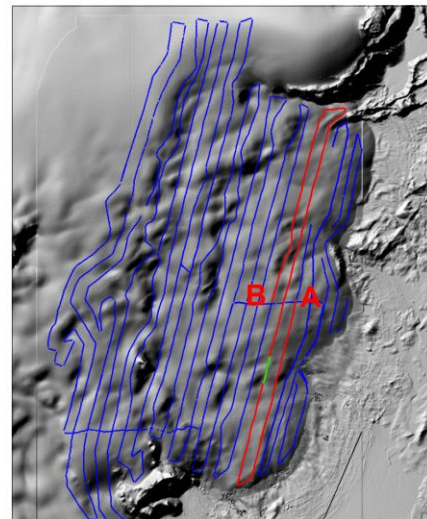
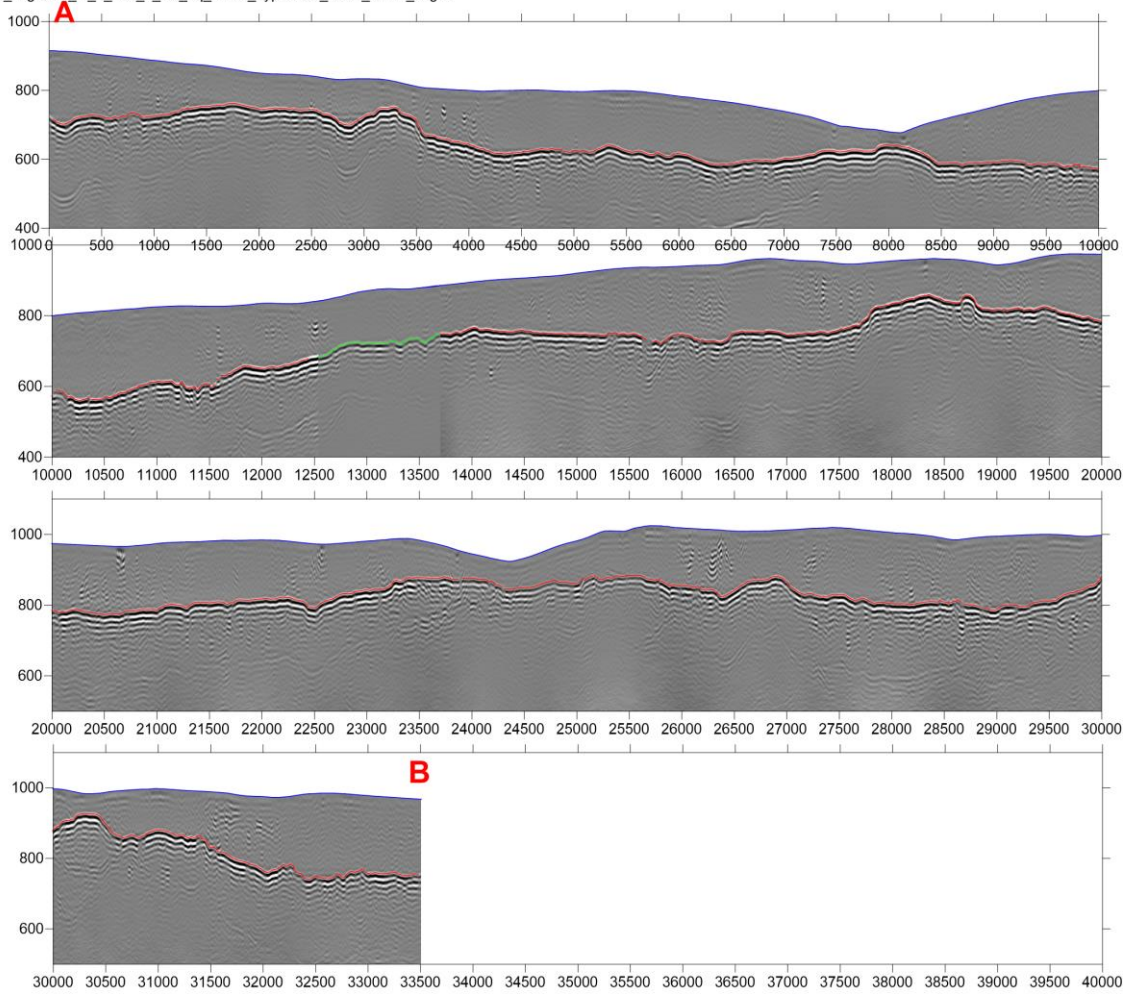
thj20240404c.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thj20240404c\line_aff_6_to_10_dA_35\GPS_seinkun_2.2

amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thj20240404c\line_aff_7_to_7_dA_35\GPS_seinkun_2.2

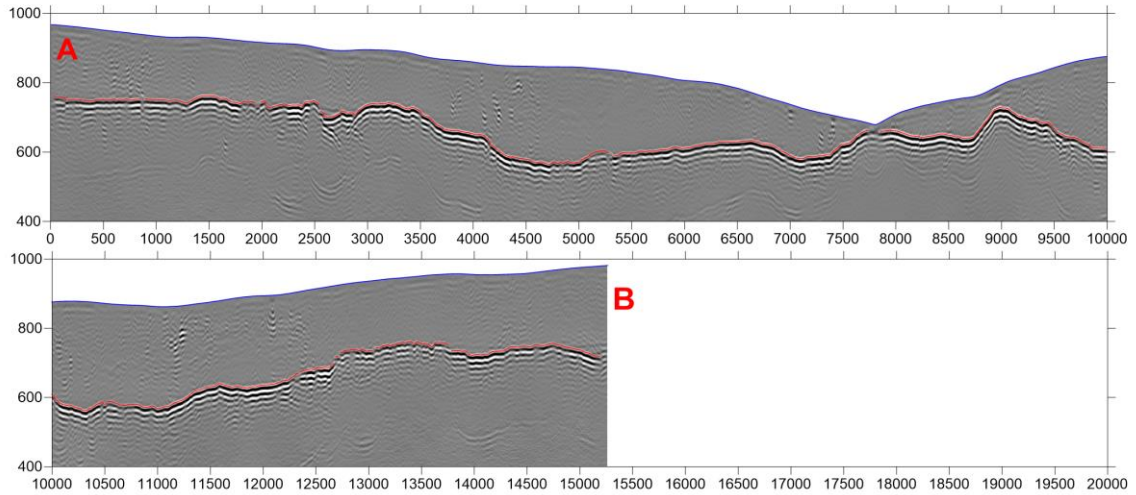
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



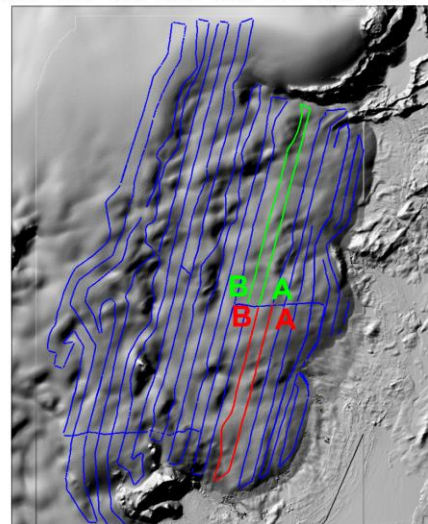
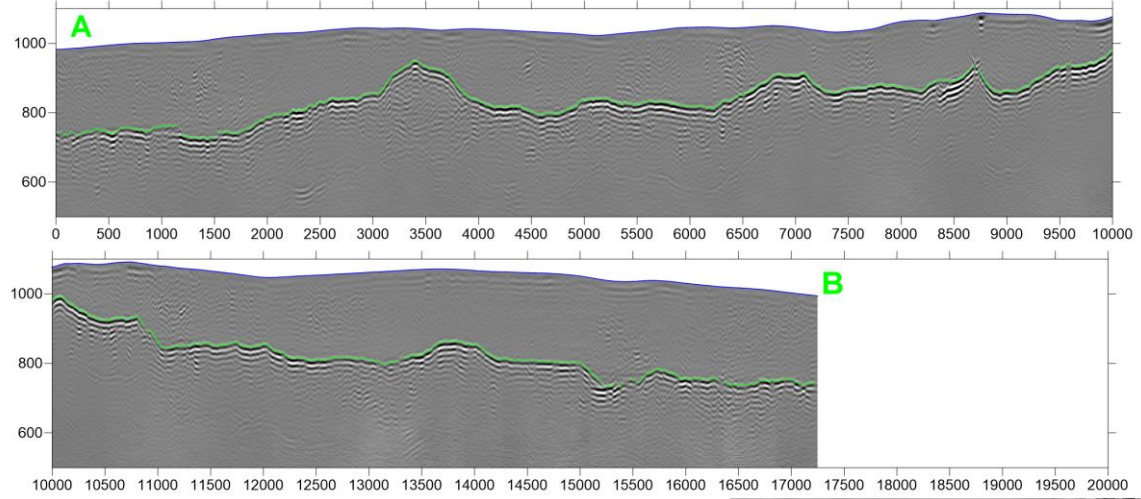
Þjórsárjökull issjarmæling 4. apríl 2024

thj20240404d.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thj20240404d\line_af1_0_to_1_da_35\GPS_seinkun_2.2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



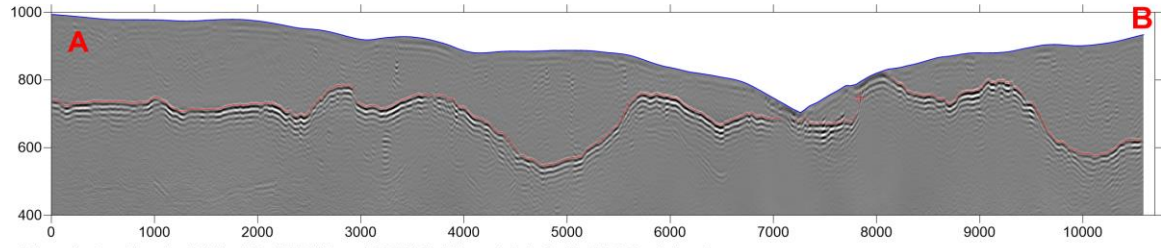
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thj20240404d\line_af1_2_to_2_da_35\GPS_seinkun_2.2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



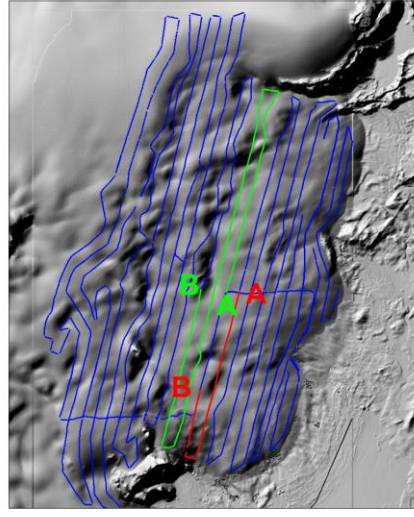
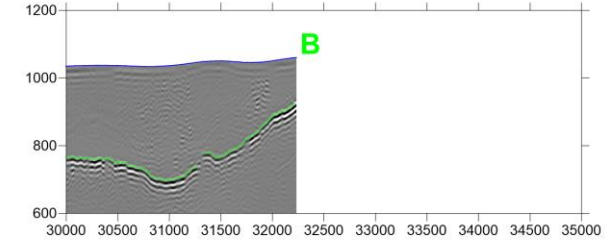
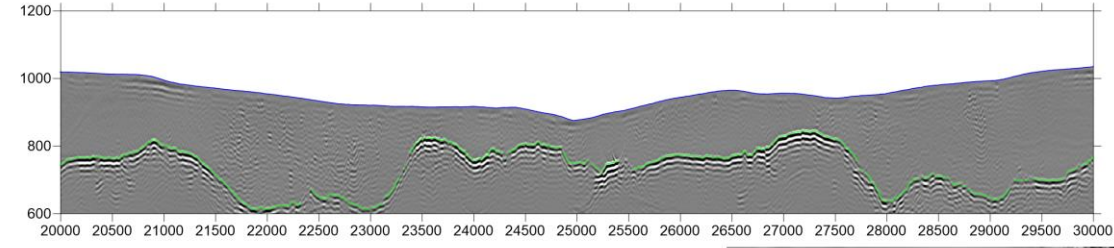
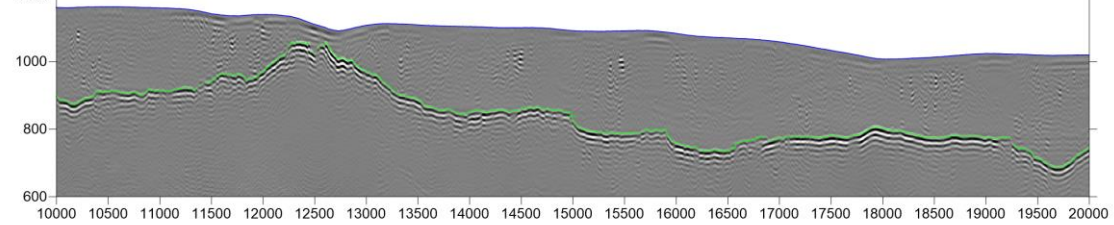
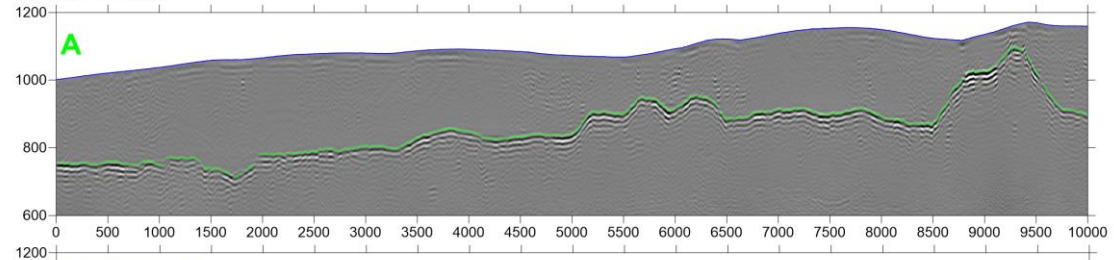
Þjorsárjökull issjarmæling 4. apríl 2024

thj20240404d.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240404d\line_af1_3_to_4_dA_35\GPS_seinkun_2.2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



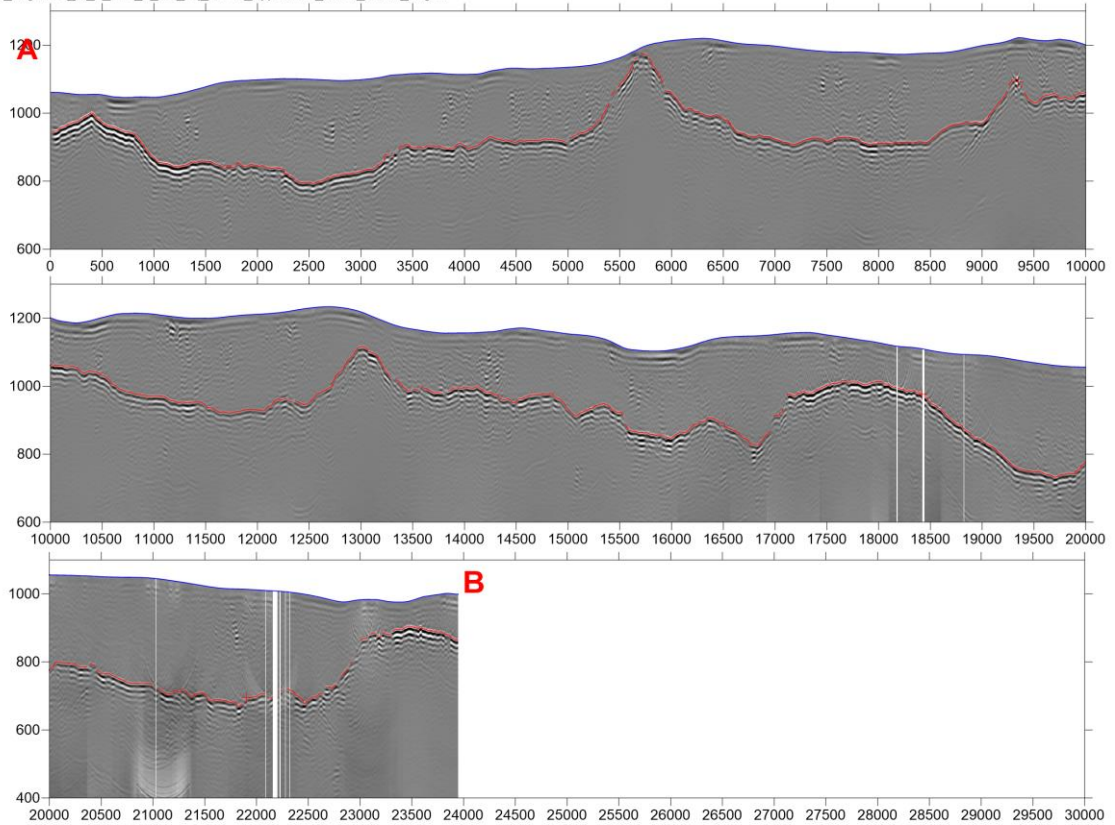
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240404g.h\line_af0_0_to_2_dA_35\GPS_seinkun_0
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd
thjorsarj20240404g.hd5



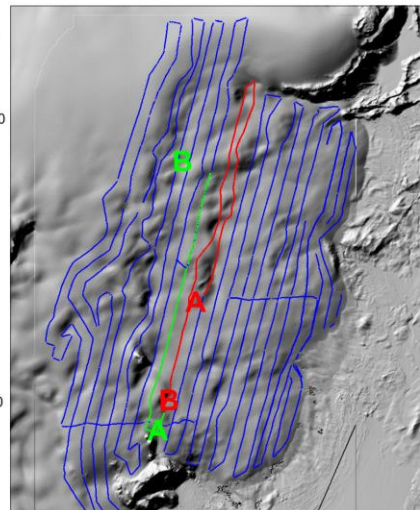
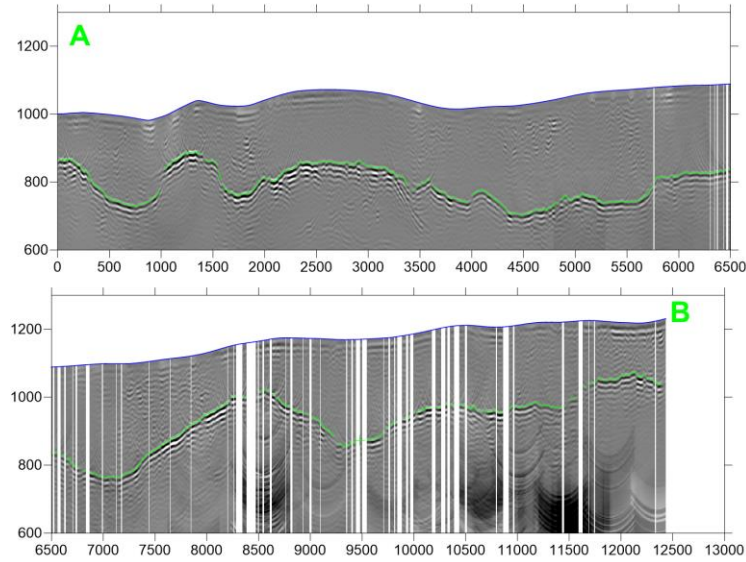
Þjorsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thjorsarj20240405a.hdf

D:\gognlissjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405a.h\line_af1_0_to_1_da_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



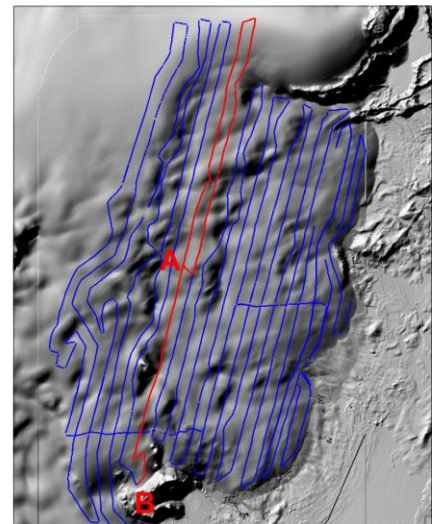
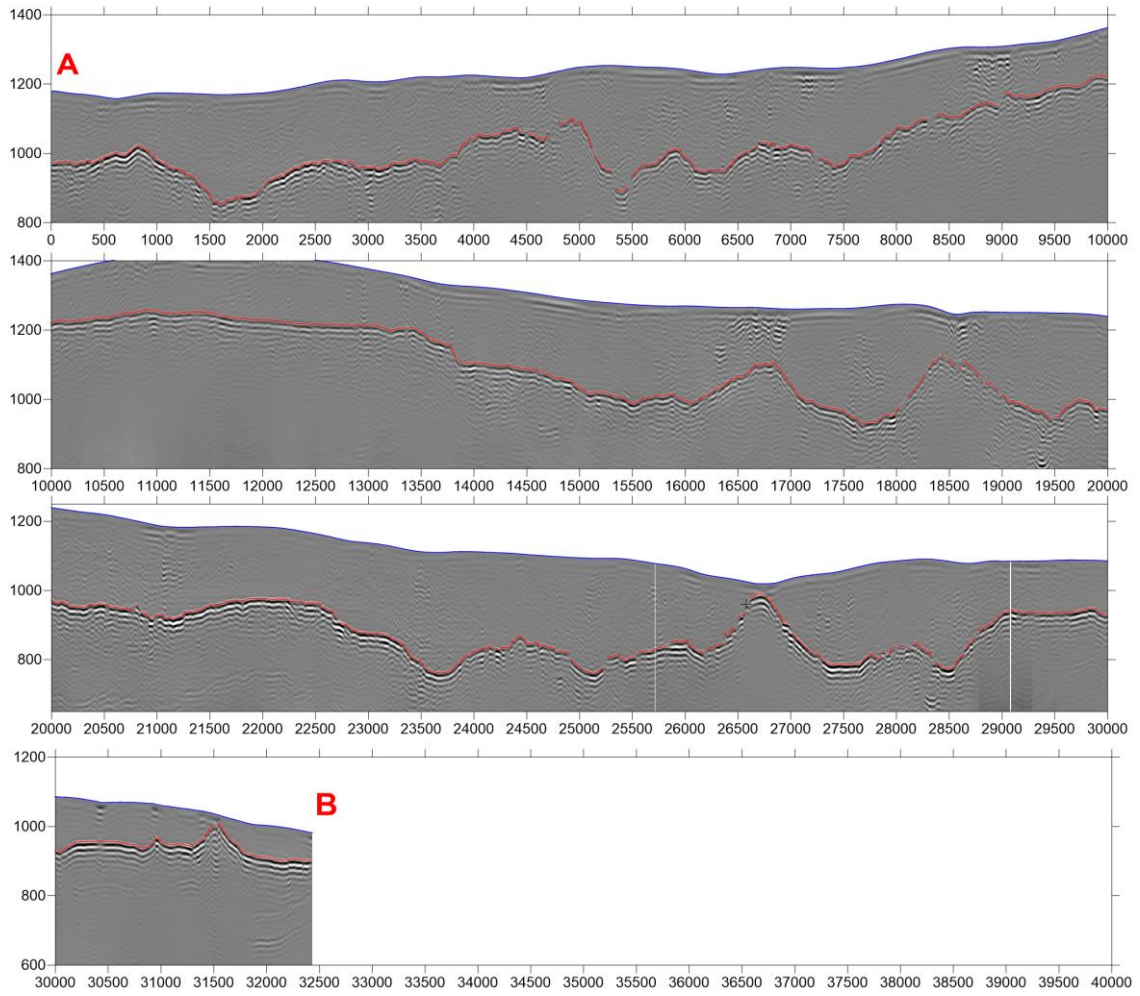
D:\gognlissjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405a.h\line_af2_2_to_4_da_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



Þjórsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thj20240405b.hd5

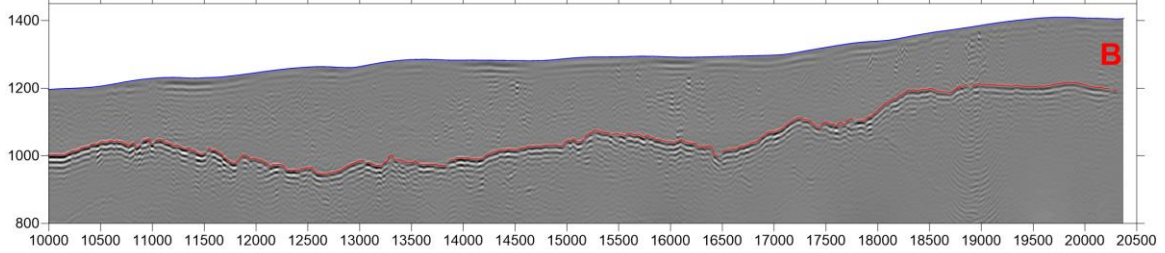
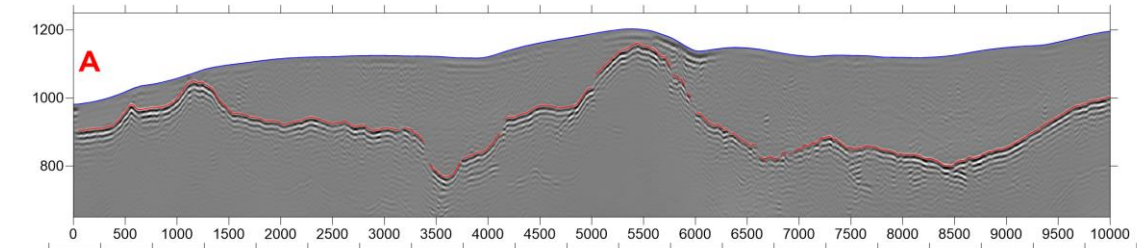
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_0_to_1_dA_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



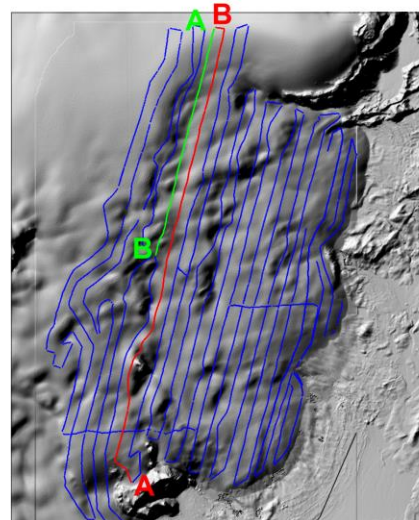
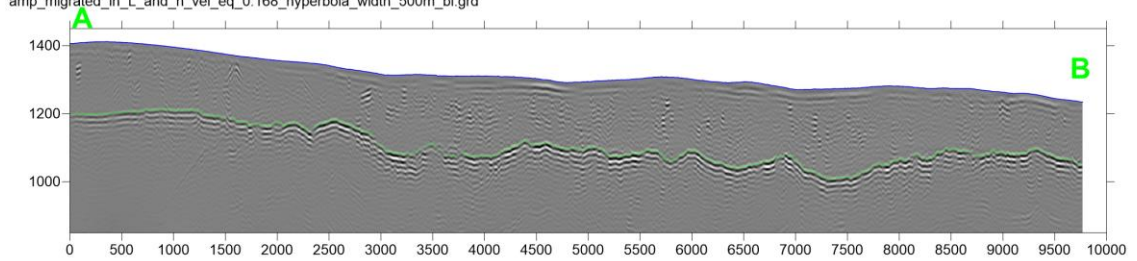
Þjórsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thj20240405b.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_2_to_4_dA_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



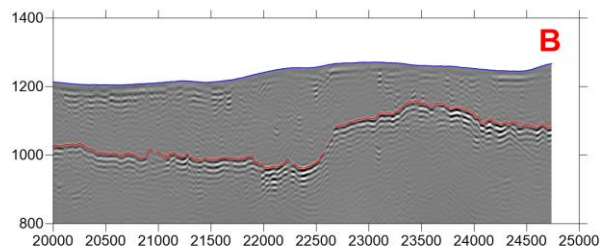
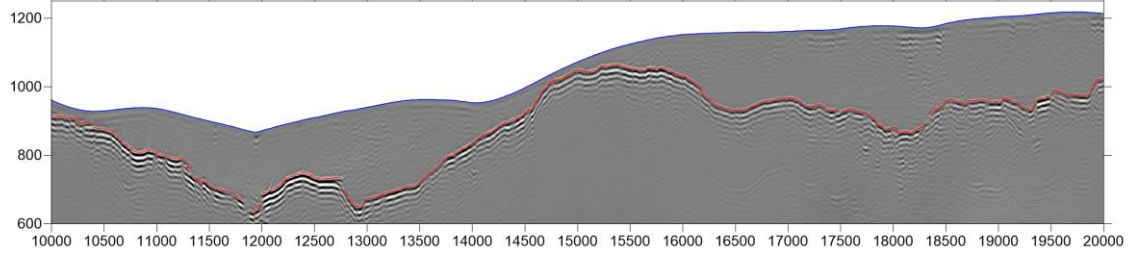
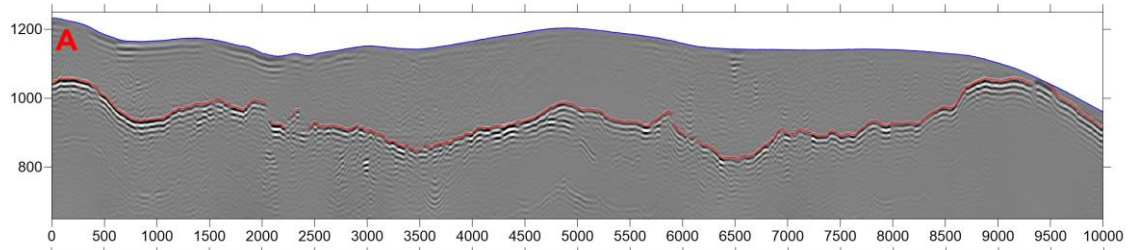
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_5_to_5_dA_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



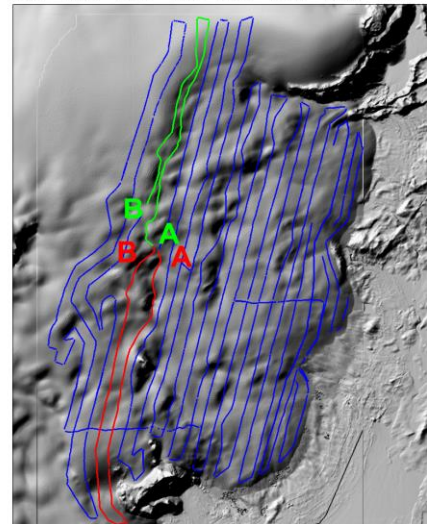
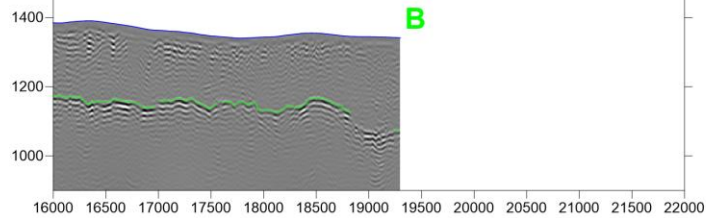
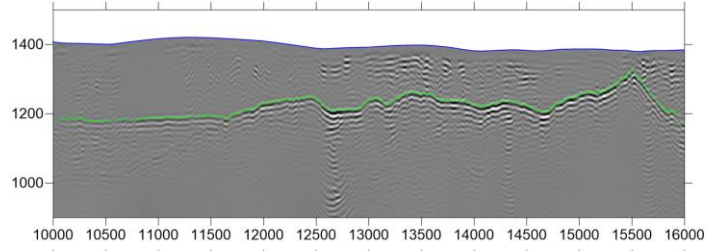
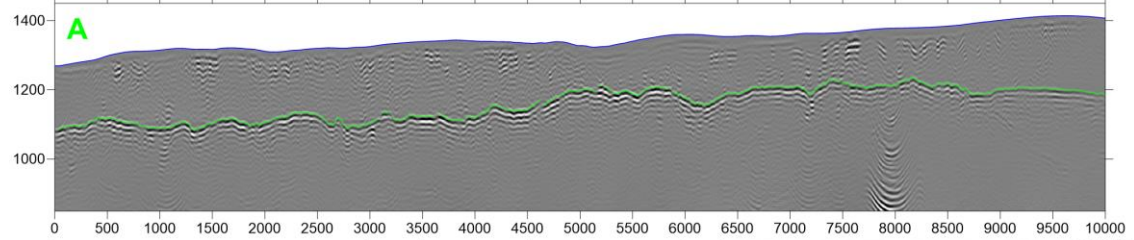
Þjorsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thj20240405b.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_6_to_6_da_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



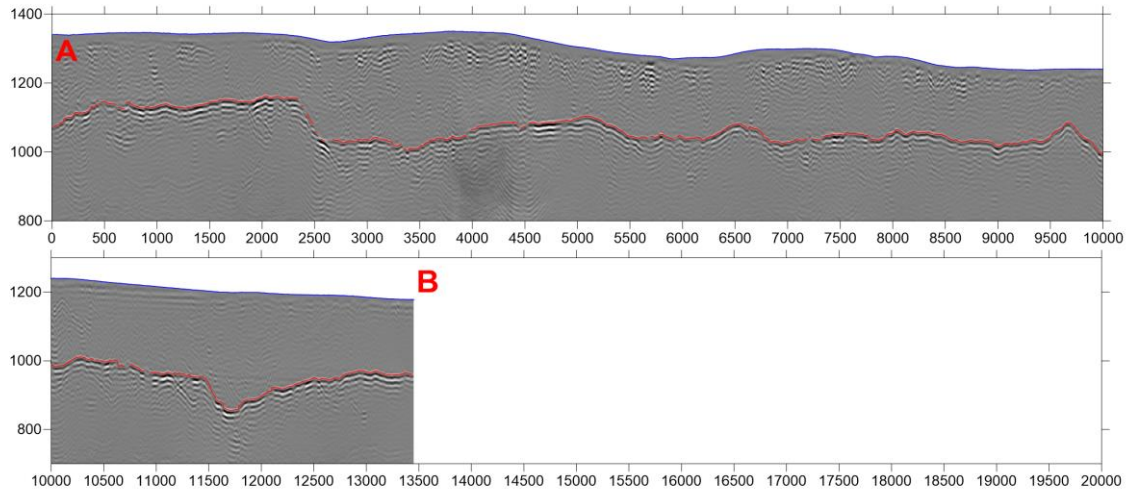
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_7_to_8_da_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



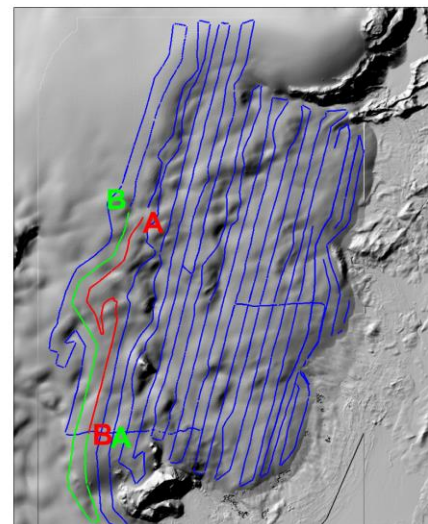
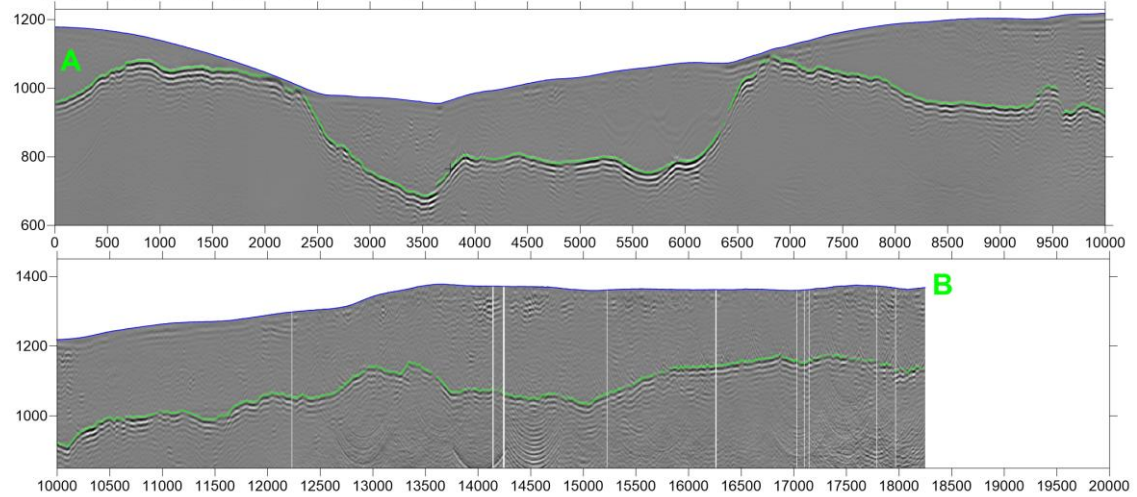
Þjorsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thj20240405c.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_0_to_2_da_35\GPS_seinkun_0
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



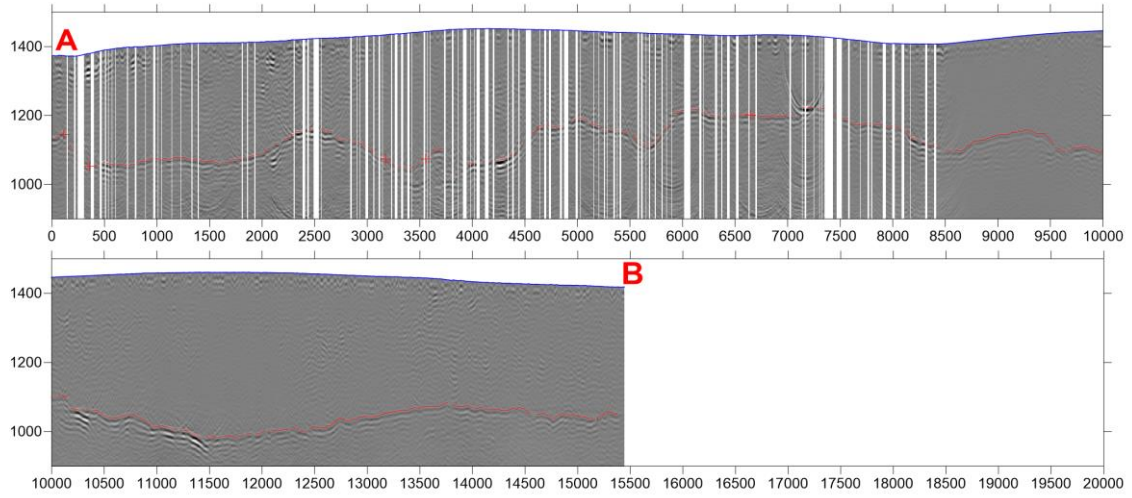
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_0_to_2_da_35\GPS_seinkun_0
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



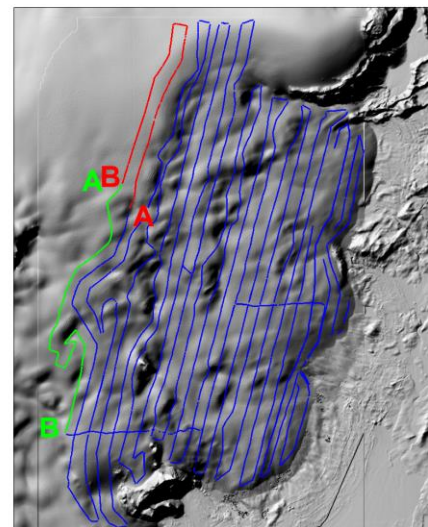
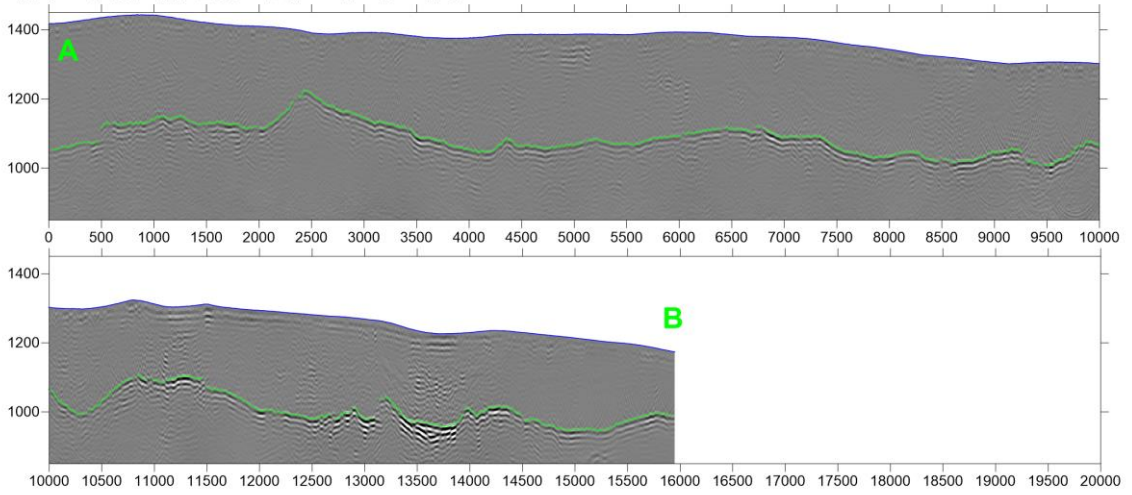
Þjórsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thj20240405b.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thjorsarj20240405c.h\line_af1_4_to_5_dA_35\GPS_seinkun_0
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



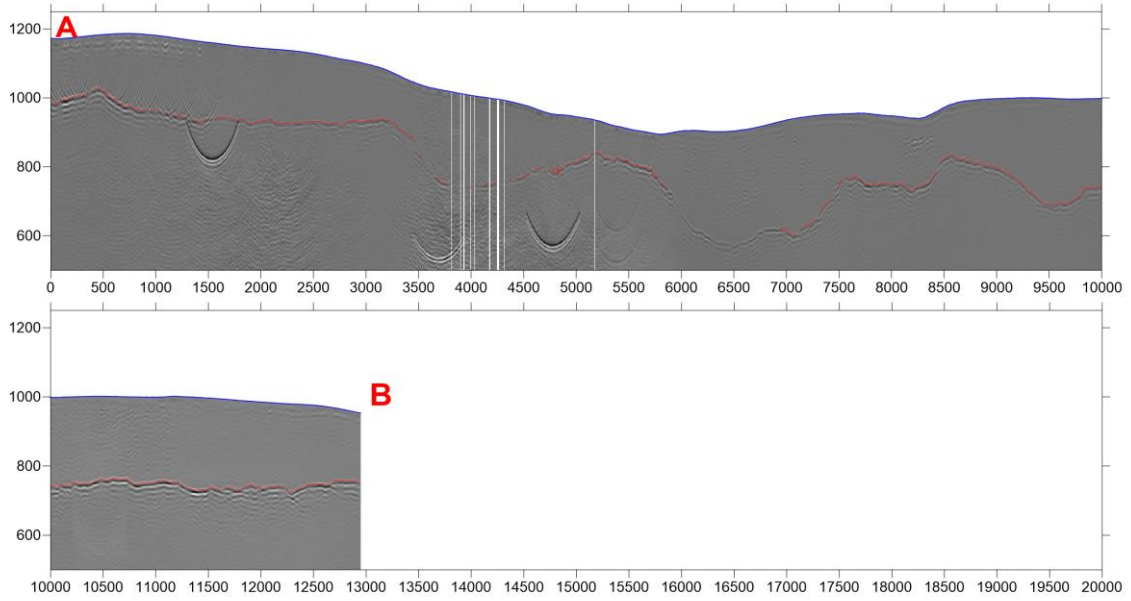
D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjórsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_6_to_7_dA_35\GPS_seinkun_0
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



Þjorsárjökull issjarmæling 5. apríl 2024

thj20240405b.hd5

D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_6_to_6_da_35\GPS_seinkun_2
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd



D:\gogn\issjarsnid_urvinnsla\þjorsárjökull2024\thjorsarj20240405b.h\line_af1_10_to_10_da_35\GPS_seinkun_0
amp_migrated_in_L_and_h_vel_eq_0.168_hyperbola_width_500m_bl.grd

