

Landmótun og innri bygging jökulrænna landforma á Norðausturlandi

Ummerki eftir forna ísstrauma



Nína Aradóttir
Jarðvísindastofnun
Mars 2024

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Þessi rannsókn fjallar um ummerki og hegðun fornra ísstrauma á Norðausturlandi. Tilgátur hafa áður verið settar fram um ísstrauma í hinum íslenska meginjökli á síðasta jökulskeiði en takmarkaðar rannsóknir hafa verið gerðar á landmótun þeirra. Markmið verkefnisins var því að auka skilning á landmótun, útbreiðslu og virkni fornra ísstrauma og þróun þeirra á síðasta jökulskeiði með því að kortleggja og rannsaka jökulræn landform og setlög. Verkefnið hefur hagnýt gildi í formi ítarlegrar kortlagningar á landformum og setlögum ásamt aukinni þekkingu á jarðfræði og jarðgrunni svæðisins sem geta nýst sem uppspretta efnis í vegagerð og til skipulagsvinnu. Enn fremur geta niðurstöður verkefnisins nýst sem fræðsluefni til almennings um náttúrufar svæðisins og útbreiðslu meginjökulsins á Íslandi og stuðlað þar af leiðandi að aukinni umhverfisvitund og náttúruvernd.

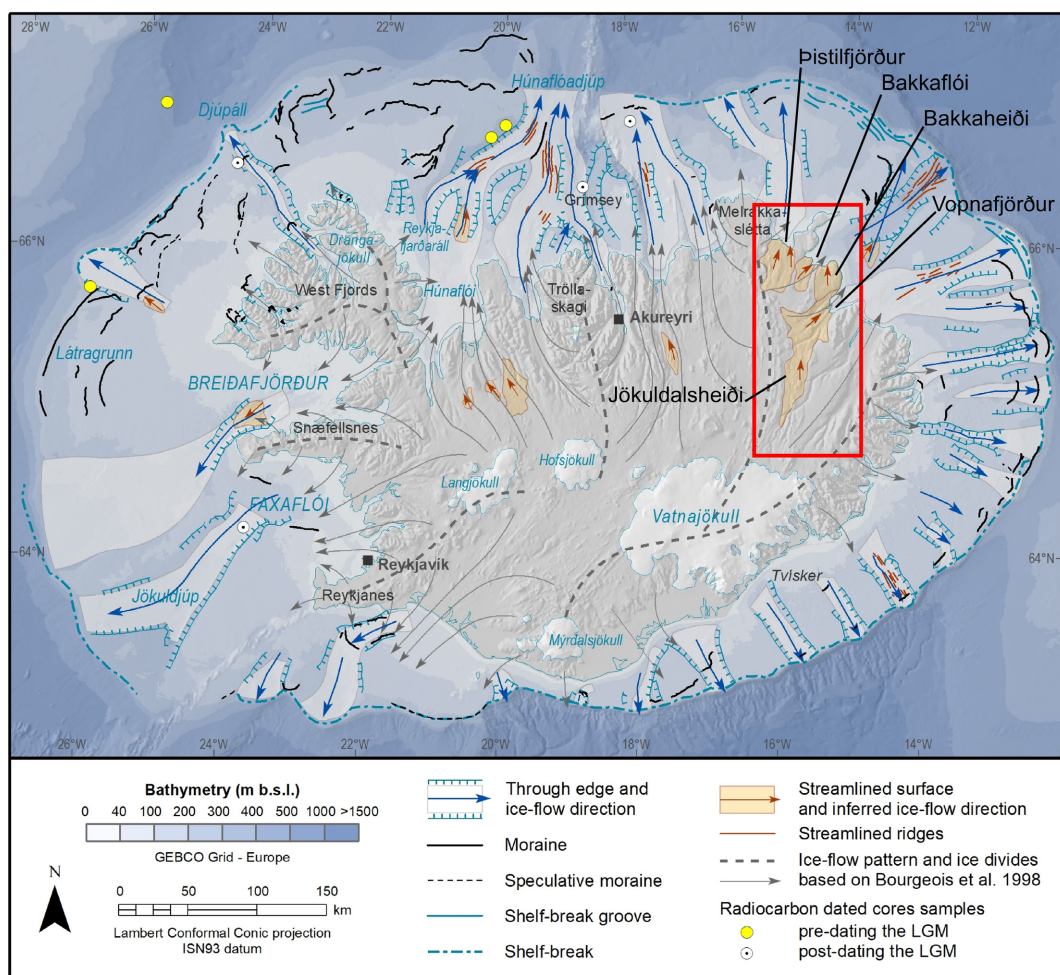
Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir helstu niðurstöðum verkefnisins sem heild, en ekki aðeins fyrir styrkárið. Styrkurinn var nýttur til launa í einn mánuð á lokastigi þess en doktorsritgerðinni var skilað í upphafi 2024 og verður doktorsvörnin 24. apríl. Vakin er athygli á tengslum við verkefnið *Landmótun fornra ísstrauma á Norðausturlandi*, leitt af Ívari Erni Benediktssyni, sem hlaut styrk úr rannsóknasjóði Vegagerðarinnar 2019-2022. Fyrir frekari upplýsingar er því bent er á [samantektaskýrslu](#) frá því verkefni á heimasíðu Vegagerðarinnar.

Inngangur

Ísstraumar eru hraðskreiðir farvegir stórra meginjökla og flytja megnið af ís og seti sem jöklarnir skila af sér. Ísstraumar hafa því veruleg áhrif á afkomu meginjökla og eru vel þekktir í Grænlandsjökli og á Suðurskautslandinu, sem og frá fornum meginjökklum í N-Ameríku og N-Evrópu þar sem útbreiðsla og landmótun þeirra hefur verið könnuð vel (t.d. Bennett, 2003; Stokes o.fl. 2016). Takmörkuð þekking er þó á þeim ferlum sem stýra og stuðla að miklum skriðhraða, viðbrögðum ísstrauma við sveiflum í loftslagi og sjávarstöðu, eða hvernig breytingar á flæði eða vatnsbúskap þeirra hefur áhrif á afkomu meginjökla til lengri tíma (t.d. Bennett, 2003; Alley o.fl. 2005). Rannsóknir á landmótun ísstrauma eru mikilvægar til að auka skilning okkar á umfangi og virkni þeirra og þeim ferlum við botn sem stuðla að auknum skriðhraða og myndun landforma (Stokes, 2018).

Á upptakasvæðum ísstraumanna eru landformin misleit og við jaðra þeirra verða oft skörp skil í landmótun þar sem hraðskreiður ísstraumur mætti hæggengari ís. Landmótun meginhluta ísstraumanna einkennist af straumlínulöguðum landformum, s.s. jökulöldum og risakembum (t.d. Stokes and Clark, 2001; Briner, 2007; De Angelis og Kleman, 2008; King o.fl. 2009; Margold o.fl. 2015; Stokes, 2018). Jökulöldur og risakembur eru algeng ummerki ísstrauma (King o.fl. 2009; Ely o.fl. 2016; Stokes, 2018) og er lengd þeirra talin endurspegla skriðhraða jökuls og myndunartíma (t.d. Benediktsson o.fl. 2016; Jamieson o.fl. 2016). Setgerð og bygging þessara landforma er því talin geyma upplýsingar um þau ferli sem stýra flæði ísstrauma og landmótun undir þeim (Stokes o.fl. 2013). Rifjagarðar eru bæði tengdir upptaka og hnignunar svæði ísstrauma (De Angelis og Kleman, 2008) en þeim hefur ekki verið lýst áður á Íslandi fyrr en í meistararitgerð sem tengist þessu verkefni (Helgadóttir, 2020). Sprungufyllingar eru vel þekktar fyrir fram framhlaupsjökla á Íslandi (t.d. Evans and Rea, 2003; Schomacker et al., 2014), og hafa nýlega verið rannsakaðar í tengslum við landmótun fornra ísstrauma og benda til skyndilegrar hnignunar ísstraumsins (t.d. Evans et al. 2016; Kurjanski et al. 2019). Myndun þessara landforma er nokkuð illa þekkt og umdeild innan jöklajarðfræðinnar, enda myndast þau öll við botn jökuls þar sem ógerningur er að fylgjast með þeim ferlum sem eiga í hlut.

Tilgátur hafa verið settar fram um ísstrauma í hinum íslenska meginjökli á síðasta jökulskeiði sem eru taldir hafa haft mikil áhrif á hegðun og virkni jökulsins á hámarki síðasta jökulskeiðs og á síðjökultíma (t.d. Norðdahl og Pétursson, 2005; Hubbard o.fl. 2006, Patton o.fl. 2017). Fram til þessa hefur staðsetning og lögun þessara ísstrauma þó einungis gróflega verið áætluð og misjöfnum hugmyndum varpað fram um ísaskil (Mynd 1; Bourgeois o.fl. 2000; Hubbard o.fl. 2006; Patton o.fl. 2017). Líkanreikningar Patton o.fl. (2017) gefa mikilvæga innsýn inn í heildstæða mynd ísstrauma í íslenska meginjöklinum frá hámarki síðasta jökulskeiðs og á síðjökultíma. Hins vegar byggir líkanareikningurinn einungis á þeim gögnum sem eru til hverju sinni, og þar sem skortur hefur verið á gögnum frá mörgum svæðum eru nokkrir annmarkar til að skorða reikninga á stærð jökulsins, staðsetningu ísstrauma og tímasetningu jökulhörfunar. Takmarkaðar rannsóknir hafa til að mynda verið gerðar á landmótun ísaldarjökulsins á Íslandi, sérstaklega með tilliti til ísstrauma.



Mynd 1. Yfirlitsmynd af ummerkjum eftir hinn íslenska meginjökul. Rauði kassinn afmarkar rannsóknasvæðið á Norðausturlandi og örnefni á undirsvæðunum eru merkt inn. Úr Benediktsson et al. (2022).

Tilgangur og markmið

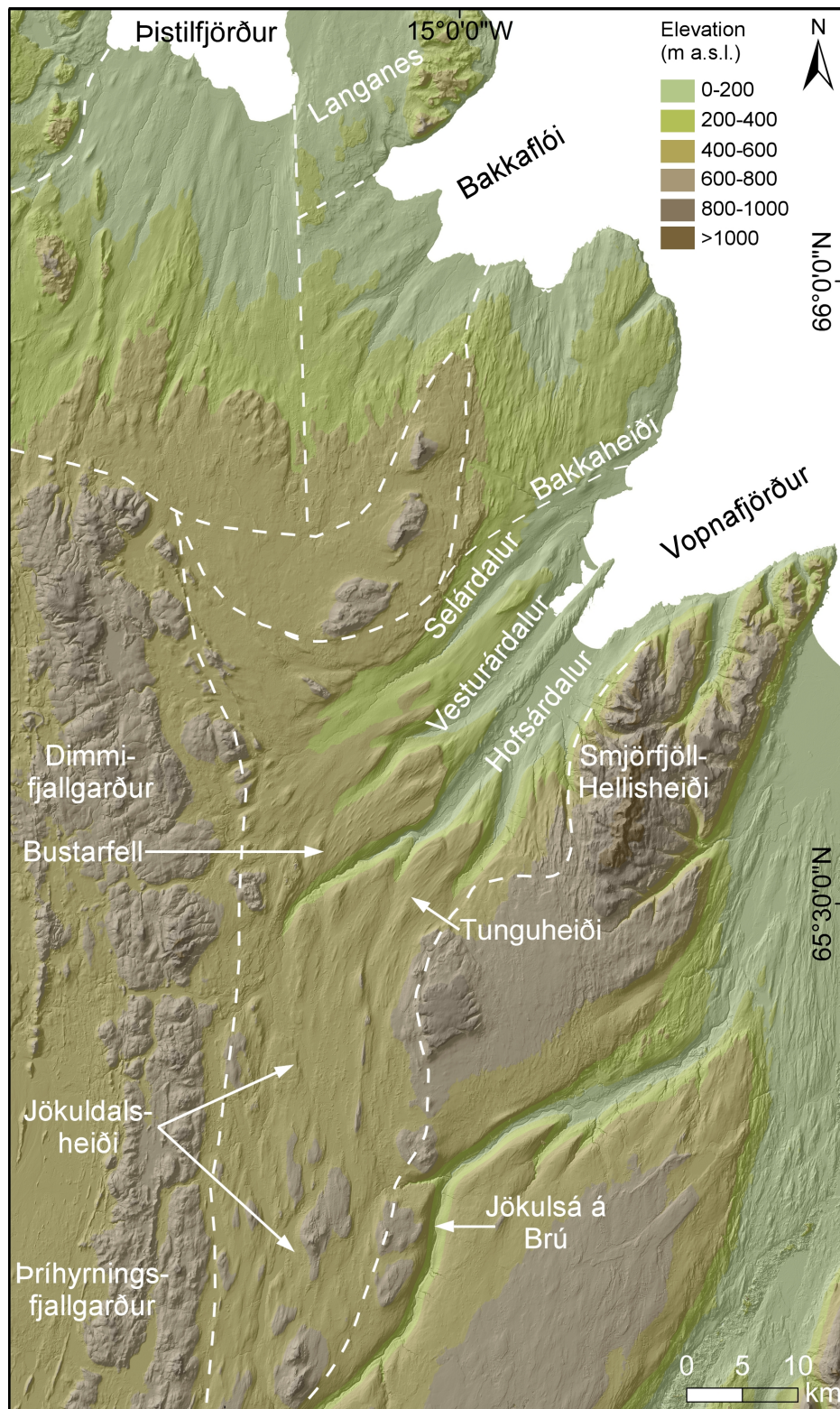
Markmið verkefnisins er að rannsaka ummerki eftir forna ísstrauma á Norðausturlandi (Mynd 1) og auka skilning okkar á landmótun, útbreiðslu og hegðun þeirra og þar með sögu íslenska meginjökulsins frá hámarki síðasta jökulskeiðs fram að lokum síðjökultíma. Þetta verður gert með því að kortleggja og rannsaka jökulræn landform og setlög með margvíslegum jarð- og jarðeðlisfræðilegum aðferðum. Rannsóknasvæðið nær frá Jökuldalsheiði norður til Vopnafjarðar, Bakkaflóa og Þistilfjarðar (Mynd 2). Landformin sem eru rannsökuð eru straumlínulaga landform (jökulöldur og risakembur), rifjagarðar, þvergarðar og sprungufyllingar.

Rannsóknarspurningar eru eftirfarandi:

1. Hvað einkennir landmótun svæðisins og dreifingu setlaga og landforma, og hvernig tengist hún legu, virkni og hörfun fornra ísstrauma?
2. Hver var útbreiðsla og afstæður aldur ísstrauma á Norðausturlandi á síðasta jökulskeiði?
3. Hvað einkennir lögun og setgerð jökulrænna landforma og hvað má lesa út úr þeim um hegðun ísstrauma og þau ferli sem stuðla að auknum skriðhraða og hnignun ísstraumsins?

Rannsóknasvæði

Rannsóknasvæðið er staðsett á Norðausturlandi, frá heiðunum norður af Vatnajökli og norður að sjó. Svæðinu er skipt í fjögur undirsvæði miðað við kortlagningu og landslag; Þistilfjörður, Bakkaflói, Bakkaheiði og Vopnafjörður-Jökuldalsheiði (Mynd 2). Dalirnir og firðirnir hafa verið mótaðir af síendurteknum jökulframrásum frá upphafi Kvarter tímabilsins (Benediktsson et al., 2022). Stefna þeirra ásamt kortlögðum jökulrákum gefa til kynna að ísflæði á svæði hafi að mestu verið til norðurs eða norðausturs, samhliða legu dalanna (Norðahl og Hjort, 1993; Sæmundsson, 1995). Vísbendingar um hraðskreiða ísstrauma á rannsóknarsvæðinu hafa verið settar fram út frá líkanareikningnum (Bourgeois o.fl. 2000; Hubbard o.fl. 2006; Patton o.fl. 2017). Þær fáu rannsóknir sem lúta að jökulhörfun hafa einblínt á strandlínur og sjávarstöðubreytingar eftir Yngra Dryas skeiðið (Norðahl og Hjort, 1993; Sæmundsson, 1995), og litlar sem engar rannsóknir hafa verið gerðar á jöklalandmótun, setgerð, byggingu og myndun landforma, og þaðan af síður með hliðsjón af virkni ísstrauma. Rannsóknasvæðið er kjörið til að kortleggja jökulræn landform þar sem það er austan við norðurgosbeltið og því hafa nútíma hraun ekki haft áhrif á landformin og þau vel sjáanleg.

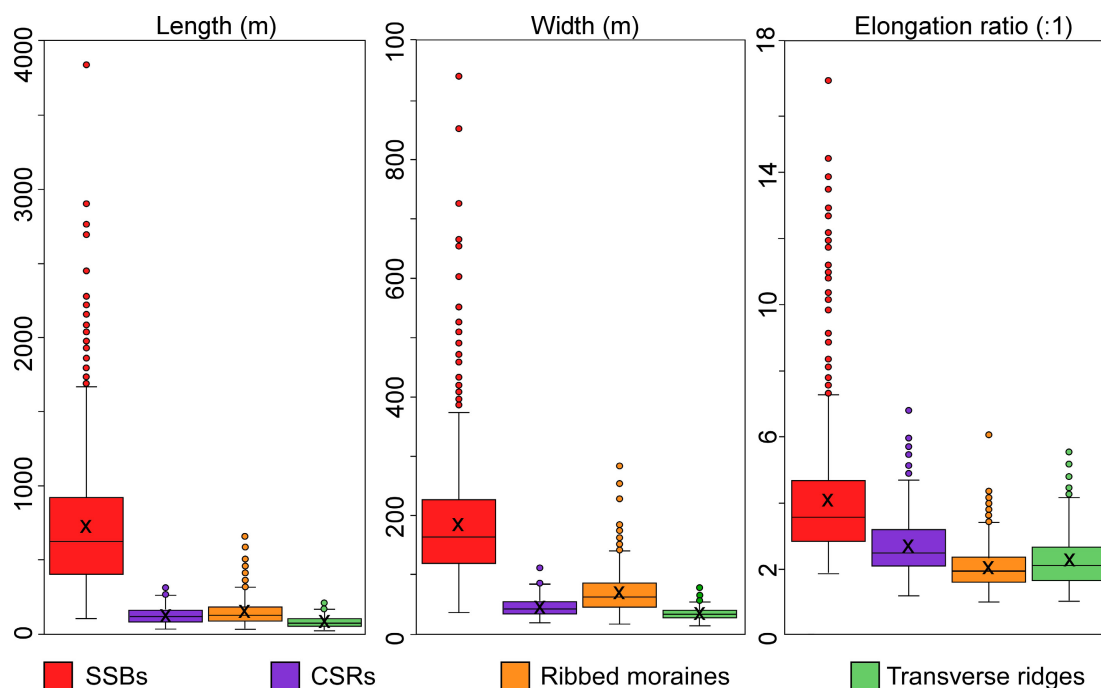


Mynd 2. Rannsóknasvæðið á Norðausturlandi með helstu örnefnum og hæðarskiptingu. Hvítu punktalínurnar tákna svæðaskiptinguna; Vopnafjörður-Jökuldalsheiði, Bakkaheiði, Bakkakflói og Þistilfjörður.

Gögn og aðferðir

Við kortlagningu á landformum var notast við hæðarlíkan byggt á gögnum frá ArcticDEM, gervitunglamyndun og loftmyndum frá Landmælingum Íslands og Loftmyndum ehf. Landformin voru kortlögð sem flákar eða línur í ArcMap. Út frá kortlagningunni var lengd, breidd og stefna landformanna reiknuð sem var notuð til lýsa legu og stærð þeirra (Mynd 3). Farið var í felt sumrin 2019-2022 og mismunandi staðir á rannsóknasvæðinu skoðaðir. Í felti var lögð áhersla á að sannreyna kortlagninguna (Mynd 4A-B). Fyrir nánari útlistun á feltevinnu 2019-2021 er vísað í skýrsluna úr fyrra verkefni frá Ívari. Áherslan í felti 2022 var á rifjagarða á Jökuldalsheiði og við Arnarvatn sem var viðfangsefni fyrir síðustu greinina sem hefur verið innsend í tímarit..

Lítið er um náttúrulegar opnur á rannsóknasvæðinu og því var notast við gröfur á þremur svæðum til að grafa snið í landformin. Til að rannsaka innri byggingu landformanna var notast við hefðbundnar setlagfræðilegar aðferðir í felti eins og skrásetningu á opnum, kornastærðardreifing á seti, veftumælingar og athuganir á kýlni og ávala steina (Mynd 4D-F). Einnig voru gerðar mælingar með jarðsjá, bæði með 50 og 100 MHz loftneti (Mynd 4C). Aðferðin hefur verið notuð hérlandis til að rannsaka jökulræn landform (t.d. Benediktsson et al., 2009; Woodard et al., 2020), en þó ekki í miklum mæli. Notast var við jarðsjá á jökulöldum, rifjagörðum og sprungufyllingum en niðurstöðurnar þó aðeins nýttar í grein á jökulöldum á Bustarfelli. Ástæðurnar voru nokkrar, en meðal annars vegna þess að erfitt var túlka þau. Aðferðin getur verið vandmeðfarin, og því er mikilvægt að þróa aðferðafræðina út frá aðstæðum hérlandis.



Mynd 3. Stærðardreifing landformanna, straumlínulaga landforma, sprungufyllingar, rifjagarða og þvergarða, sýnd með kassaritum. Miðgildið er táknað með línun og meðaltalið með x-i. Helmingur af gagnasettinu er innan kassans en hinn helmingurinn utan hans. Punktarnir tákna útlaga.



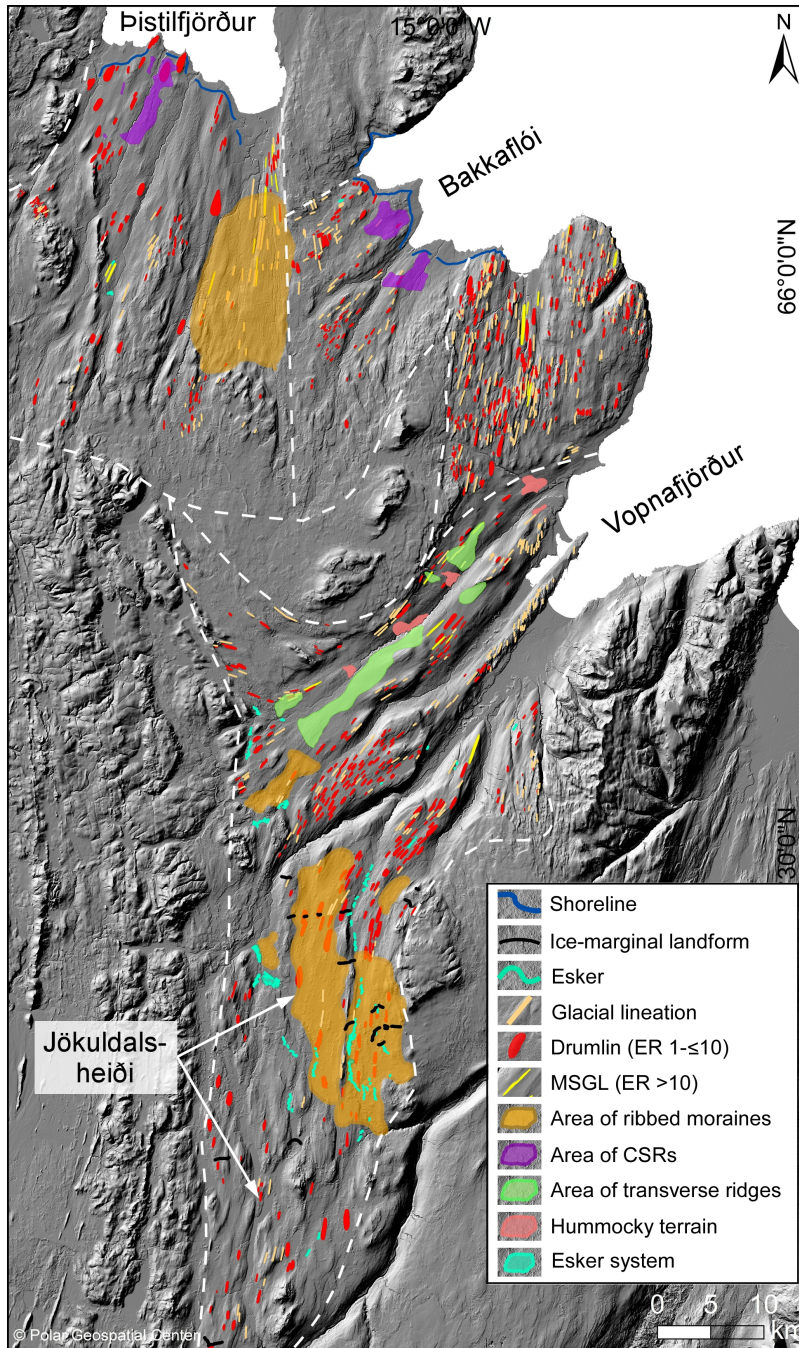
Mynd 4. Mismunandi aðferðir voru nýttar í felti. A) Kortlagning á rifjagörðum við Arnarvatn á Hauksstaðaheiði. B) Kortlagning á jökulkembum í Þistilfirði. C) Jarðsjármælingar á jökulöldu í Bakkaflóa. D) Unnið í opnu í jökulöldu á Bustarfelli. E) Unnið í opnu í gegnum sprungufyllingu í Þistilfirði. F) Veftumælingar í opnu í sprungufyllingu í Þistilfirði. Myndir A, C, D eru frá Ívari Erni Benediktssyni og E frá Skafta Brynjólfssyni.

Helstu niðurstöður

Í rannsókninni er lögð áhersla á straumlínulaga landform (jökulöldur og risakembur), sprungufyllingar og rifjagarða, en malarásar, leysingafarvegir, jökulgarðar og haugaruðningar voru einnig kortlagðir (Mynd 5). Niðurstöður úr þessu verkefni hafa sannreynt fyrri kenningar um forna ísstrauma á Norðausturlandi og sýnt fram á mismunandi flæðiset ísstrauma á sem hafa verið virkir á mismunandi tíma (Benediktsson et al. 2022). Kortlagning sem gerð hefur verið í þessu verkefni bendir til að staðsetning, umfang og upptakasvæði ísstrauma hafi verið nokkuð önnur en líkan Patton o.fl. (2017) sýnir, sem undirstrikar mikilvægi landmótunar gagna til að betrubæta líkanareikninga. Breytileika í lögun og dreifingu landformanna er hægt að nýta til að skilja legu og virkni ísstraumanna. Á hámarki síðasta jökulskeiðs var ísflæði á rannsóknarsvæðinu til norðurs, án tilheyrandi áhrifa af undirliggjandi landslagi, en samhliða þynningu jökulþekjunnar varð ísflæðinu stjórnað æ meir af landslaginu (Benediktsson et al., 2022).

Aradóttir et al. (2023a) er fyrsta rannsóknin til að einblína á setgerð, byggingu og myndun landforma sem ísstraumar mynda með jöklajarðfræðilegum og jarðeðlisfræðilegum aðferðum, en þar er innri bygging jökulaldna á Bustarfelli rannsökuð, bæði í opnum og með jarðsjá. Niðurstöður leiddu í ljós að þær eru gerðar úr kjarna úr aflöguðu jökulárseti með botnurð í kring. Athuganir á setgerð frá þverlægum hryggjum var nýtt, ásamt kortlagningu, við að túlka hryggina í Bakkaflóa og Þistilfirði sem sprungufyllingar en við Arnarvatn og á Jökuldalsheiði sem rifjagarða. Sprungufyllingarnar eru gerðar úr einsleitum jökulruðningi en veftumælingar benda til að setinu hafi verið þrýst upp að miðju hryggjarins (Aradóttir et al., 2023b), sem styður við kenninguna um hvernig landformin eru myndast í sprungum við botn jökulsins. Rifjagarðarnir eru gerðir úr lagskiptri mól og sandi í neðri hlutanum, en með 1-2 m þykku lagi af fremur grófum jökulruðningi efst. Báðar einingarnar eru að hluta til aflagðar. Sprungufyllingarnar og rifjagarðarnir liggja ofan á straumlínulaga landformunum í einhverjum tilvikum. Það ásamt því hversu vel varðveitt þau eru benda til að þau hafi myndast við hnignunarfasa ísstraumanna. Landformin eru því talin benda til stöðnun ísstrauma sem voru virkir á síðjökultíma. Breytileika í lögun og dreifingu landformanna er hægt að nýta til að skilja legu og virkni ísstraumanna. (Aradóttir et al. 2023b, submitted).

Vísað er í útgefnar greinar og doktorsritgerð fyrir frekari niðurstöður og skýringarmyndir.



Mynd 5. Kort af jökulrænum landformum á Norðausturlandi sem kortlögð voru í þessari rannsókn. Kortlagning af strandlínunum í Þistilfirði og Bakkaflóa er byggð á Norðdahl og Hjort (1993). Ysti haugaruðningurinn í Vopnfirði er byggður á Sæmundsson (1995). Tvær innstu jaðarstöðurnar eru frá Aðalsteinsson (1985, 1987).

Útgáfa og kynning

Niðurstöður verkefnisins hafa birst í eftirfarandi greinum. Þrjár eru nú þegar birtar og sú fjórða hefur verið send inn í tímaritið *Boreas* í mars 2024. Doktorsritgerðin verður aðgengileg inn á www.opinvisindi.is þegar nær dregur doktorsvörn.

Aradóttir, N. Glacial geomorphology and dynamics of palaeo-ice streams in northeast Iceland. Doctoral thesis, 2024.

Aradóttir, N., Helgadóttir, E.G., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R. Ribbed moraines formed during deglaciation of the Iceland Ice Sheet: Implications for ice dynamics (submitted to *Boreas*).

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R., Benjamínsdóttir, M.M., Ríkharrðsdóttir, L.B. 2023b. Ice-stream shutdown during deglaciation: Evidence from crevasse-squeeze ridges of the Iceland Ice Sheet. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 48 (12), 2412-2430. <https://doi.org/10.1002/esp.5636>

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Sturkell, E., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R., Phillips, E. 2023a. Drumlin formation within the Bustarfell drumlin field, northeast Iceland: integrating sedimentological and GPR data. *Journal of Quaternary Science*, 38 (3), 386-402. <https://doi.org/10.1002/jqs.3481>

Benediktsson, Í.Ö., **Aradóttir, N.,** Ingólfsson, Ö., Brynjólfsson, S. 2022. Cross-cutting palaeo-ice streams reveal shifting Icelandic Ice Sheet dynamics. *Geomorphology*, 396, 108009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108009>

Niðurstöðurnar hafa einnig verið kynntar á þó nokkrum ráðstefnum frá því að verkefnið hófst, þar af þrjár á síðasta ári.

Aradóttir, N., Helgadóttir, E.G., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R. Formation of ribbed moraines deglaciation of the Iceland Ice Sheet. *PalaeoArc*, Akureyri, Iceland, 2023 (Talk).

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R., Benjamínsdóttir, M.M., Ríkharrðsdóttir, L.B. Geomorphic evidence of ice stream shutdown from the Iceland Ice Sheet, northeast Iceland. EGU, Vienna, Austria, 2023 (Talk).

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R., Benjamínsdóttir, M.M., Ríkharrðsdóttir, L.B. Geomorphic evidence of ice stream shutdown from the Iceland Ice Sheet, northeast Iceland. Autumn conference of the Geology society of Iceland, Reykjavík, Iceland, 2023 (Talk).

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö. Landmótun fornra ísstrauma á NA-landi. Research conference of the Icelandic Road and coastal administration, Reykjavík, Iceland, 2022 (Poster).

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R., Benjamínsdóttir, M.M., Ríkharrðsdóttir, L.B. Geomorphic evidence of ice stream shutdown from the Iceland Ice Sheet, NE-Iceland. *PalaeoArc*, Finland, Rovaniemi, 2022 (Poster).

Aradóttir, N., Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Sturkell, E., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R. Formation of the Bustarfell drumlin field, NE-Iceland: Integrating sedimentological and GPR data. Arctic Workshop, 2022 (Talk).

- Aradóttir, N.,** Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó. Sturkell, E., Brynjólfsson, S., Farnsworth, W.R. Formation of the Bustarfell drumlin field, NE-Iceland: Integrating sedimentological and GPR data. Nordic Geological winter meeting, 2022 (Talk).
- Aradóttir, N.,** Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó. Morphology and internal architecture of drumlins revealed by sedimentological data and ground-penetrating radar (GPR) – a case study from Bustarfell drumlin field in NE-Iceland. PalaeoArc, 2021 (Talk).
- Aradóttir, N.,** Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Brynjólfsson, S. Evidence for palaeo-ice streaming in NE-Iceland. Arctic Workshop, 2021 (Talk).
- Aradóttir, N.,** Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó. Streamlined subglacial bedforms in NE-Iceland: Evidence for palaeo-ice streaming. Autumn conference of the Geology society of Iceland, 2020 (Talk).

Lokaorð

Niðurstöðurnar úr rannsókninni veita nýja innsýn í útbreiðslu og virkni fornra ísstrauma á Íslandi og gagnast til að skorða líkanareikninga af íslenska meginjöklinum. Rannsóknin leggur grunn að áframhaldandi kortlagningu á fornum ísstraumum á Íslandi og eykur skilning á hegðun nútíma og fornra meginjökla og viðbrögðum óstöðugra ísstrauma við hlýnandi loftlagi. Þá eykur nákvæm kortlagning þekkingu okkar á jarðfræði og jarðgrunni svæðisins og skýrir útbreiðslu setlaga og landforma sem mörg hver geta haft hagnýtt gildi fyrir ýmis konar framkvæmdir og mannvirkjagerð.

Heimildaskrá

- Aðalsteinsson, B. (1985). Skessugarður. Náttúrufræðingurinn 55(2), 82.
- Aðalsteinsson, B. (1987). Jökulhörfun á Brúaröræfum. Í Jarðfræðafélag Íslands: Ísaldarlok á Íslandi. Geological Society of Iceland spring conference, Reykjavík, 28th of April 1987.
- Alley, R.B., Clark, P.U., Huybrechts, P., Joughin, I. 2005. Ice-Sheet and Sea-Level Changes. Science 310 (5747), 456-460.
- Benediktsson, Í.Ö., Ingólfsson, Ó., Schomacker, A., Kjær, K.H. 2009. Formation of submarginal and proglacial end moraines: implications of ice-flow mechanism during the 1963–64 surge of Brúarjökull, Iceland. Boreas, 38(3), 440-457. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00077.x>
- Briner JP 2007. Supporting evidence from the New York drumlin field that elongate subglacial bedforms indicate fast ice flow. Boreas 36, 143-147.
- De Angelis H, Kleman J 2008. Palaeo-ice stream onsets: Examples from the north-eastern Laurentide Ice Sheet. Earth Surface Processes and Landforms 33, 560-572.
- Ely JC, Clark CD, Spagnolo M, Stokes CR, Greenwood SL, Hughes A, Dunlop P, Hess D 2016. Do subglacial bedforms comprise a size and shape continuum? Geomorphology 257, 108-119.
- Evans, D.J.A., and Rea, B.R. 2003. Surging glacier landsystem. In Glacial landsystems (pp. 259-288). Taylor and Francis.
- Evans, D.J., Storrar, R.D., and Rea, B.R. 2016. Crevasse-squeeze ridge corridors: diagnostic features of late-stage palaeo-ice stream activity. Geomorphology, 258, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.017>

- Helgadóttir, E.G., 2020. Ribbed moraines in the Vopnafjörður regions, Iceland. Master's thesis, 104 p. Faculty of Earth Sciences, University of Iceland. <http://hdl.handle.net/1946/35879>.
- Hubbard, A., Sugden, J., Dugmore, A., Norðdahl, H. and Pétursson, H.G. 2006. A modelling insight into the Icelandic Late Glacial Maximum ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 25(17-18), 2283-2296. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.04.001>
- Jamieson, S.S.R., Stokes, C.R., Livingstone, S.J., Vieli, A., Ó Cofaigh, C., Hillenbrand, C-D., Spagnolo, M. 2016. Subglacial processes on an Antarctic ice stream bed. 2: Can modelled ice dynamics explain the morphology of mega-scale glacial lineations? *Journal of Glaciology* 62, 285-298.
- King E, Hindmarch RCA, Stokes CR, 2009. Formation of mega-scale glacial lineations observed beneath a West Antarctic ice stream. *Nature Geoscience* 2, 585-588.
- Kurjanski, B., Rea, B.R., Spagnolo, M., Winsborrow, M., Cornwell, D.G., Andreassen, K. and Howell, J. 2019. Morphological evidence for marine ice stream shutdown, central Barents Sea. *Marine Geology*, 414, 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.05.001>
- Margold M, Stokes CR, Clark CD, Kleman J 2015. Ice streams in the Laurentide Ice Sheet. a new mapping inventory. *Journal of Maps* 11, 380-395.
- Norðdahl, H. and Hjort, C. 1993. Lateglacial raised beaches and glacier recession in the Þistilfjörður-Bakkaflói area. *Jökull*, 43, 32-44.
- Norðdahl H., Pétursson H.G. 2005. Relative sea-level changes in Iceland. New aspects of the Weichselian deglaciation of Iceland. In: Caseldine C, Russel A, Harðardóttir J, Knudsen Ó (Eds.) *Iceland – modern processes and past environments*. Elsevier, Amsterdam, pp. 25-78
- Patton, H., Hubbard, A., Bradwell, T., Schomacker, A. 2017. The configuration, sensitivity and rapid retreat of the Late Weichselian Icelandic ice sheet. *Earth-Science Reviews* 166, 223-245.
- Schomacker, A., Benediktsson, Í.Ö. and Ingólfsson, Ó. 2014. The Eyjabakkajökull glacial landsystem, Iceland: Geomorphic impact of multiple surges. *Geomorphology* 218, 98–107. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.005>.
- Stokes, C.R. 2018. Geomorphology under ice streams: Moving from form to process. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 43, 85-123.
- Stokes, C.R. and Clark, C.D. 2001. Palaeo-ice streams. *Quaternary Science Reviews* 20, 1437-1457. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00003-8)
- Stokes C.R., Margold M, Clark CD., Tarasov L. 2016. Ice stream activity scaled to ice sheet volume during Laurentide Ice Sheet deglaciation. *Nature* 530, 322-326.
- Sæmundsson, Th. 1995. Deglaciation and shoreline displacement in Vopnafjörður, northeastern Iceland. LUNDQUA thesis 33,1-106. Department of Quaternary Geology, Lund University.
- Woodard, J.B., Zoet, L.K., Benediktsson, Í.Ö., Iverson, N.R., Finlayson, A. 2020. Insights into drumlin development from ground-penetrating radar at Múlajökull, Iceland, a surge-type glacier. *Journal of Glaciology* 1–9. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.50>