

Ágúst Guðmundsson

Frerajöll og hörfandi sífreri á Íslandi

Á ÍSLANDI er sífreri víða í jarðlögum ofan 600-800 m hæðar yfir sjó. Við sérstök skilyrði finnst sífreri á láglendi, einkum í kuldagildrum þar sem kalt loft varðveitist og endurnýjast svo sem í hellum og holurðum. Mælingar á hitastigi í yfirborðsjarðlögum á hálendinu og í sífrera til fjalla voru gerðar í fáein ár um síðustu aldamót í aðdraganda Kárahnjúkavirkjunar og í tvo síðustu áratugi hefur hópur norskra vísindamanna er tengist Oslóarháskóla mælt hitastig í jörðu á hálendinu og í fjöllum norðanlands og austan. Hafa þeir bæði stuðst við aðgreinda sítitandi hitanema og við strengi með þéttri röð hitanema í fjórum borholum. Tilvist sífrera á Íslandi þykir því staðfest.

Ummerki um fornan sífrera er víða að finna á hálendi landsins og í fjöllum á útjöðrum þess. Sérstaklega er þetta áberandi á utanverðum Vestfjörðum, í fjöllum norðanlands (Frá Húnavatnssýslum austur í Suður-Pingeyjarsýslu) og í Austfjarðafjallgarði. (Að auki finnst virkur sífreri í stökum háum fjöllum á sunnanverðu landinu). Skýr dæmi má sjá í landmótun, djúpri frostveðrun fjalla og mikilli útbreiðslu urðarjöklasts (e. relict rockglacier deposits). Þetta eru talin skýrustu einkenni um tilvist sífrera að fornu og nýju í fjallahlíðum. Greining á rúmfræðilegri stöðu fornra urðarjökla á Tröllaskaga bendir til að á myndunartíma sumra þeirra hafi loftslag verið meira en 3-5 °C kaldara en hér ríkir nú. Rannsakendur sem unnið hafa á Tröllaskaga síðustu tvo áratugi telja að margir virku urðarjökla þar séu yngri en 5-6 þúsund ára. Á hálendinu sést hörfun sífrera í freðmýrum með frerarástum (e. palsas) og að frerakúpur (e. lithalsas) hærra í landinu eru að falla saman. Talið er að megnið af slíkum sýnilegum sífrera hafi tekið sér bólfestu á litlu ísöldinni eða tímabilinu 1350-1900. Hörfandi sífreri í fjallahlíðum er talinn leiða til aukinnar tíðni og stækkandi skriðufalla sem eiga upptaksvæði í þiðnandi lausum jarðlögum.



1. mynd. Gengið um frostsprengdar og frostlyftar þelaurðir á háfjöllum Tröllaskaga.
– Blockfields on the top of Tröllaskagi mountains. Ljósmynd. /Photo: Ágúst Guðmundsson 1987.

INNGANGUR

Íslendingar hafa um langan aldur þekkt að frost getur verið í jörðu árið um kring og kallast slíkt sífreri. Menn þekkja þetta sérstaklega í hellum þar sem ís hefur legið í botni þeirra árið um kring og jafnvel lokað þeim langtímum saman svo sem var í Víðgelmi í Hallmundarhrauni. Líklega liggur sífreri lægst yfir sjávarmáli hérlendis í kuldagildrum eins og hellum og holurðum (opnum stórgrýttum urðum þar sem djúpt er á finefni) því kalt loft er tiltölulega eðlisþungt og sígur því niður og helst kalt með nýju köldu lofti á næsta vetri. Smalar sem fóru um gróðursælur mýrar á hálendinu sunnan Hofsjökuls sáu að gróðurlitlar kúpur í mýrunum höfðu ískjarna undir tiltölulega þunnri jarðvegsþekju (samtal við fjallmenn Gnúp-

verja 1980). Aðrir smalar sem leituðu fjár í fjöllum, til dæmis á utanverðum Tröllaskaga sáu glitta í ís í grófum urðum hátt til fjalla (samtal við Jóhann Ísak Pétursson jarðfr. frá Sléttuhlíð í Skagafirði 2000). Síðar fóru vísindamenn að veita athygli ummerkjum um sífrera og rita um þau fræðigreinar.

Fyrir liðlega hálfri öld (1968) ritaði Þorleifur Einarsson bókina *Jarðfræði. Saga bergs og lands*¹ og í henni er stutt samantekt um sífrera hérlendis. Þar nefnir hann að á miðhálendi Íslands sé sífreri í jörðu enda sé þar úrkomulítið og meðalárshiti undir frostmarki. Sífrerasvæðin séu gjarnan í lægðum og jafnan rök og með gróðurþekju. Eftir lýsingu á sífrerarústum rekur Þorleifur að þær sé helst að finna í Þjórsárverum,

á Arnarvatnsheiði, í Orravatnsrústum norðan Hofsjökuls, við Möðrudal, á Jökuldalsheiði, Vesturöræfum og í Kringilsárrana¹. Með aukinni jarðfræðikortlagningu á hálendinu og betra aðgengi að góðum loftmyndum sést að sífreralandslag freðmýra er víðar að finna.

Í fyrstu útgáfu bókarinnar minnst Þorleifur á önnur ummerki um sífrera sem hann nefnir *þelaurðir* og ritar svo: „Á háfjöllum, þar sem meðalárshiti er undir 0 °C og frostveðrun mikil, verða til þelabundnar skriður og urðir. Á hverju ári bætist grjót í urðina og sígur hún þá undan brekkunni sökum þungans. Þessar þelabundnu urðir mætti nefna þelaurðir. Á ensku nefnast þær rock glaciers. Þær eru nokkuð algengar í *Eyjafjarðarfjallgarðinum*“ (bls 136).¹

Eftirtektarvert er að í seinni útgáfum jarðfræðibókarinnar (sem eru fimm talsins á árunum 1973-1991 ásamt endurprentunum til 1999) hefur umfjöllun um sífrera verið styttn mjög og umfjöllun um það sem Þorleifur nefndi „þelaurðir“ (e. rock glaciers) með öllu sleppt.

Eftir að höfundur kom á sínum tíma (að loknu BSc námi í jarðfræði frá HÍ) inn í heim jarðfræðikortlagningar með ýmsar kenningar á sviði landmótunar í farteskinu, lenti hann í breytilegum vinnuhópum erlendra jarðvísindamanna sem sáu ýmsa landmótunarþætti Íslands frá öðru sjónarhorni en höfundur hafði verið kennt á fyrri skólagöngu. Í byrjun árs 1992 vakti höfundur máls á að urðartungur á basaltsvæðum hérlendis ættu líklega uppruna sinn að rekja til frost-



2. mynd. Í háfjöllum Tröllaskagans eru aðstæður víða hliðstæðar þessum, frostsprengrar og frostlyftar urðir uppi á fjalla-brúnum (þelaurðir) en í skálum undir brúnum liggja víða lagskiptar urðartungur urðarjökla. – Blockfields on the top of the mountains of Tröllaskagi and stratified active and inactive rockglaciers nested in cirques. Ljósmynd./Photo: Ágúst Guðmundsson 1998.

niðurbrots við myndum urðarjökla.² Síðan eru liðnir liðlega fjórir áratugir og hefur höfundur sýnt að sá þáttur jarðfræðinnar er snýr að sífrerajarðfræði hafi vakið sáralitla athygli hérlendis. Því þykir höfundur ástæða til að draga saman það helsta sem honum er kunnugt um að unnið hafi verið við sífrerajarðfræði á Íslandi síðustu áratugi. Hvað greina-skrif á því sviði varðar, koma erlendir vísindamenn aðallega við sögu (og hafa Norðmenn og síðar Spánverjar og Frakkar verið þar fyrirferðarmestir).

SÍFRERI Í FJÖLLUM

Nokkuð hefur verið ritað um jökla á meginhluta ísaldarinnar á Íslandi³⁻⁷ en þó langtum meira um hörfun jökla í lok síðasta jökulskeiðs.⁸⁻¹¹ Rannsóknir á myndun sífrera hefur hins vegar verið fremur lítið sinnt af hérlendum jarðfræðingum. Ef til vill er skýringin sú að sífrerinn er yfirleitt hátt til fjalla og stundum í bröttum illfærum hlíðum þar sem aðgengi er ógreiðfært og athuganir kosta mikið erfiði. Aðkoma höfundar að athugunum á sífrera ná aftur til áttunda áratugar tuttugustu aldar og er við hæfi að rekja hvernig þær rannsóknir hafa þróast síðan.

Fyrst sá höfundur urðarjökla (e. rock glaciers) árin 1975 og 1976 er hann vann við berglagakortlagningu á Mið-Norðurlandi ásamt Jóhanni Helgasyni jarðfræðingi. Eftir að hafa lýst jarðlagasniðum í bröttum hlíðum upp á fjalls-brúnir, var stundum líkt og að koma í annan heim því þar blöstu víða við úfnar

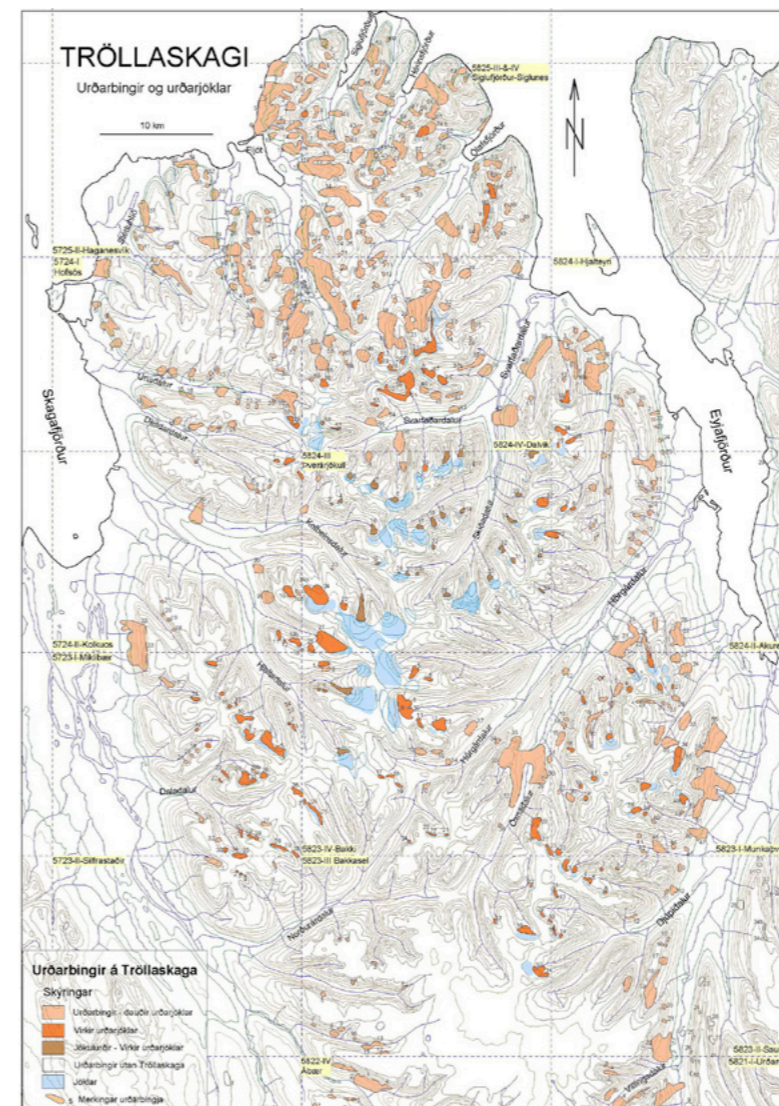
„horngrýtis“ grjótpækjur sem voru gjörólíkar urðum og melum sem sjást víða á láglandi (mynd 1). Ekki er höfundur kunnugt að miklar athuganir hafi farið fram á þessum háfjalla- þekjuurðum (e. blockfields, þ. Felsenmer) sem etv. er mest viðeigandi að nefna þelaurðir á íslensku. Þessar „horngrýtis“ urðir eru ólíkar urðum með rúnnaða steina og finefnaríku gráleitu seti sem sjá má víða á Miðhálandinu, austan Vatnajökuls og á Glámuhálandi Vestfjarða og ætla má að hafi legið undir jöklum síðasta jökulskeiðs.

Í skálum undir bröttum klettaþiljum á Tröllaskaga liggja grófar og ógreiðfærar, oft tungulaga urðir. Urðirnar skriða fram vegna eigin þunga og innri íss og hefur höfundur kosið að nefna þessi fyrirbæri *urðarjökla* (en ekki *grjótjökla* eins og oft hefur sést hérlendis), vegna þess að í efnisgerð þeirra hræst saman allar kornastærðir. Því sé eðlilegra að tala um *urðarset* fremur en *grjótset*. Þar sem jarðmyndanirnar hafa myndunareinkenni sem vísa til seigfljóttandi skriðs og líta út sem urðartungur og urðarbingir, telur höfundur eðlilegra að nota um þær orðið *urðarjökull* fremur en *þelaurð* sem vísar fremur til frosins efnis í kyrrstöðu.

Í flestum erlendum greinum um urðarjökla¹²⁻¹⁵, er greint frá „virkni“ (e. activity) urðartungna. Hér er lagt til að nota orðin „*virkur*, *stjarfur* og *daudur* um innra ástand þeirra (e. „active-, inactive- and relict- rockglacier“). Um miðjan áttunda áratuginn (er framan-greind berggrunnskortlagning fór fram á Tröllaskaga), var jafnan mikill snjór

í umræddum skálum sem faldi urðartungurnar að mestu og sama mátti segja um loftmyndir sem teknar voru á því árabili. Loftmyndir (Landmælinga Íslands) frá árinu 1960 sem teknar voru í lok langs hlýindakafla, gefa miklu betri sýn á þessi fyrirbæri, borið saman við loftmyndir frá snjó- og kuldaárunum 1963-1990. Hins vegar gefa loftmyndir síðustu þriggja áratuga yfirleitt nokkuð skýra mynd af ástandi urðarjökla og annarra sífrerayfirbæra í háfjöllum hérlendis (Vefsíða Map.is, Loftmyndir ehf).

Eyles birti í tímaritinu *Jökli* stutta grein um urðarjökla í Esjufjöllum og taldi að þeir hefðu myndast á síðustu öldum.¹⁶ Með samanburði við rannsóknir síðari ára á þróun urðarjökla í fjöllum Tröllaskaga^{17,18} tekur slík myndun nokkur þúsund ár og varla gilda mjög frábrugðin lögmál um hliðstæðar myndanir í Esjufjöllum. Á áttunda og níunda áratug síðustu aldar voru gerðar umtalsverðar athuganir á urðarjöklinum í Nautaskál í Skjöldal í Eyjafirði. Töldu rannsakendur með greiningum á fléttum og aldri þeirra, að þar hefði fallið berghlaup um 200 árum fyrr og þakið lítinn skálarjökul og að ekki væri því um sífrerayfirbæri að ræða.^{19,20} Um þetta og fleira spruttu ritdeilur erlendis milli þeirra Whalley í Belfast og Haberli í Zurich og fleiri. Niðurstöður Whalleys hafa síðar verið dregnar mjög í efa og síðari hitamælingar Norðmanna í fjöllum á Tröllaskaga, sýna tryggilega tilvist sífrerans í Skjöldal.²¹⁻²⁶ Geta má sér þess til, að ungar aldur skófa



3. mynd. Útbreiðsla urðarbingja og urðartungna á Tröllaskaga. Byggt á korti (teikning 6.1) í ritgerðinni Frerajöll²⁷. – Distribution of rockglaciers and related debris bodies in the Tröllaskagi peninsula (valley and cirque glaciers light blue)²⁷. Ágúst Guðmundsson 2000.

og flétta þar og víðar á Tröllaskaga, sé fremur tengt mikilli hrörnun slíkra lífvera samfara móðuhardindunum seint á átjándu öld.

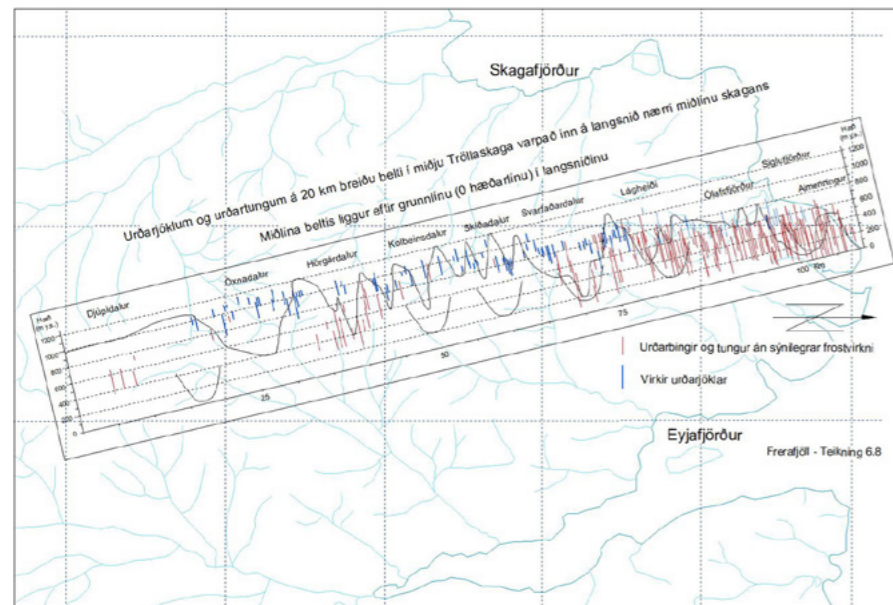
Á árunum 1987-2000, skóðaði höfundur nánar þessi fyrirbæri og ritaði um þær ýtarlega MSc ritgerð í jarðfræði við Háskóla Íslands undir heitinu *Frerajöll*.²⁷ Árið 1995 ritaði höfundur grein í Náttúrufræðingurinn undir heitinu: *Berghlaup eda urðarjökla*.²⁸ Greinin vakti athygli og var gagnrýnd í orðræðu jarðfræðisamfélagsins en þó var lítt eða ekki ritað gegn henni. Síðari tíma rannsóknir og greinaskrif erlendra vísindamanna hafa þó fremur styrkt þær tilgátur sem þar eru lagðar fram en hrakið.^{22,23,25} Að auki ritaði höfundur um sífrerasvæði á Norð-Austurlandi í tímaritið *Múlaþing* 1996²⁹ og almennt um sífrera á Íslandi í „ráðstefnurni“ í Frakklandi vegna kynningar á sífrera hérlendis.³⁰ Á mynd 2 eru

sýnd dæmi um urðarjökla í skálum að baki Hólabyrðu í Hjaltadal. Snjóalög eru mjög breytileg milli ára og sum árin sést lítið í virku urðarjökla.

Í ritgerðinni Frerajöll,²⁷ er gerð tölfræðileg greining á ýmsum þáttum er varða urðarjökla, urðartungur og urðarbingi á Tröllaskaga. Ekki er höfundur kunnugt um að hliðstætt hafi verið unnið hérlendis þótt slík gagnamedferð hafi verið algeng erlendis.^{12-15,31,32,33} Á mynd 3 er útbreiðslukort yfir urðarjökla á Tröllaskaga smækkað úr ritgerðinni Frerajöll. Með betri og aðgengilegri loftmyndum hin síðari ár, koma í ljós miklu fleiri urðarbingir en áður sáust (meðan ritið Frerajöll var í undirbúningi) og auðveldara er að greina virkni þeirra. Þegar hér er rætt um urðartungur og urðarbingi er óvíst um hvort í þeim leynist enn innri ís og í þeim hópi eru einnig jarðmyndanir

sem telja má víst að séu orðnar íslausar á okkar tímum (e. relict rockglaciers).

Hæð urðartungnanna yfir sjó var greind og þær flokkaðar eftir landfræðilegum austur-vestur beltum auk þess sem þeim var varpað, inn í langsníð eftir háhrygg Tröllaskaga (4. mynd). Með þessum teikningum er gerð tilraun til að sýna staðsetningu urðartungna og flokkun þeirra í einfaldri þrívídd. Í ritgerðinni Frerajöll eru niðurstöður margskonar greininga á tölfræðilegum þáttum er varða urðarjökla og urðartungur á Tröllaskaga. Sjá má að dreifing urðartungna og urðarjökla á Tröllaskaga er í stórum dráttum hliðstæð dreifingu slíkra fyrirbæra á virkum (og fyrrum virkum) sífrerasvæðum í fjöllum erlendis.^{12-14,33,39} Mynd 4 má túlka sem svo að langtíma landmótun sýni þrálát einkenni „alpajökla“ sem hafa verið þykkastir í dalbotnum næst miðju skagans



4. Mynd. Langsnið eftir Tröllaskaga þar sem urðarjökulum og urðartungum á 20 km breiðu beltis er varpað inn í miðlinu og sýna lóðréttu strikin hæðardreifingu urðarjökla af mismunandi virkni, virkir eru bláir og óvirkir rauðir, (teikning 6.7 í Freráfjöllum²⁷). – Altitude of rockglaciers in a 20 km wide zone in Tröllaskagi projected into one central section (active are blue and relict are red and the length of the sticks shows altitude from top to toe) Freráfjöll²⁶. Ágúst Guðmundsson 2000.

og hindrað urðarjökla myndun þar, en að óvirku urðartungurnar í fjöllum úti á jöðrum skagans, sýni langtíma niðurbrot og skrið sífrera utan jökla.

Þegar titið er nánar á tölfræðigögnin koma fram áhugaverðar myndir sem túlka má sem hluta af umhverfisaðstæðum í loftslagssögu Íslands²⁶. Á mynd 5 eru sýnd litaskýggð beltí yfir stefnuháða dreifingu efri- og neðri-marka virkra urðarjökla og annarra urðartungna sem ólíklegt er að hafi ískjarna á okkar tímum (ljósbrúnn litur). Þar sést (lengst til hægri) að neðri mörk urðartunga ná í nokkrum tilfellum niður að sjávarmáli. Hafa ber í huga að samfrosnar urðartungur eða tungur með ískjarna halda áfram að skriða undan halla lengi eftir að hitastig umhverfis þær er orðið hærra en nemur fyrir sífreramörkum á viðkomandi stað. Því má ætla að slíkar þykkar og stórar urðartungur hafi skriðið áfram vegna innri íss, í mörg þúsund ár á fyrri hluta nútíma.

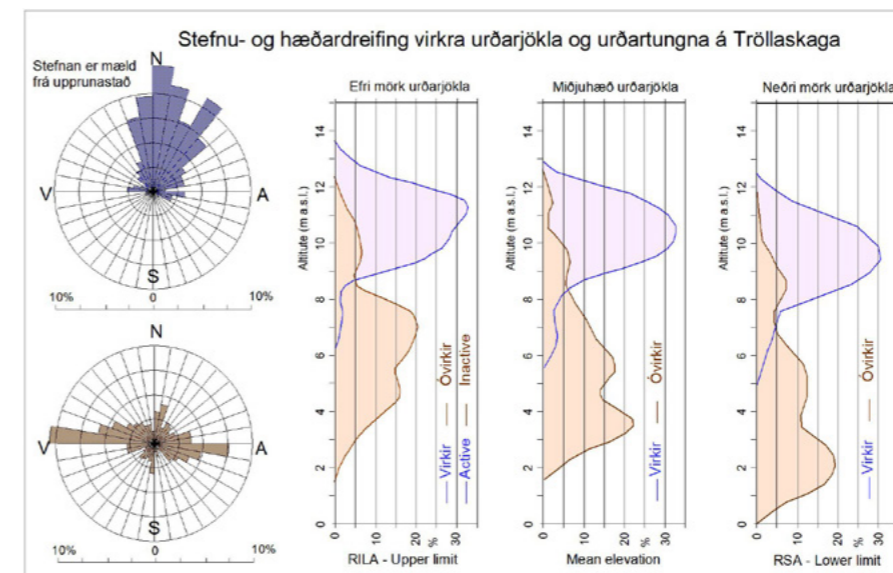
Stefnurósinn efst til vinstri á mynd 5 sýnir að virkir urðarjökla á Íslandi stefna flestir í norðlægar áttir. Urðartungur með ískjarna ofan við um það bil 800 m hæð y.s. eru líklega í jafnvægi við loftslag síðustu árbúsunda. Rannsóknir spænskra vísindamanna á urðarjökulum í háfjöllum Tröllaskaga á síðasta áratug benda til að virku urðarjökla séu flestir myndaðir á síðustu fimm- til sexþúsund árum.^{17,18,51}

Myndirnar má túlka þannig að kjöraðstæður fyrir myndun urðartunga sem liggja í 300-700 m hæð y.s. hafi verið við 3-4 °C lægra meðalhitastig en ríkt hefur á Íslandi síðustu árbúsundir og að þá hafi mesta frostlosun á bergi átt sér stað í tíðustum umskiptum milli frosts og þíðu sem hafi verið til austurs og vesturs. Með frekari tímasetningum sem helst er að fá með „strípunar-aldursgreiningum“ (e. exposure dating) og með því að lesa í „strípalður“ viðkomandi svæðis má líklega lesa nokkuð dýpra í loftslagssögu fortíðar.

Urðarjökla og urðarjökla (tungur og bingir) eru talin vera skýrustu ummerki um sífrera í fjallendi bæði í nútíð og í fortíð.^{12-14,23,32,33,50} Í liðlega aldarfjórðung hefur höfundur unnið að kortlagningu á urðarjökulum (urðartungum og bingjum). Dreifing þessara fyrirbæra um Ísland, (sjá mynd 8) er athyglisverð. Urðarjökla eru á þeim landsvæðum sem áður hafa verið talin líkleg íslaus svæði á ísaldartímanum.³⁴⁻³⁸ Þéttust er dreifing framangreindra fyrirbæra í fjallendi Mið-Norðurlands beggja vegna Eyjafjarðar og Skagafjarðar ásamt stóru svæði á norðanverðum Austfjörðum og í fjöllum milli Vopnafjarðar og Héraðs (sjá mynd 6). Miðað við þær sífreramælingar sem farið hafa fram hérlendis síðustu tvo áratugi má ætla að nokkuð víða á Tröllaskaga og Norð-Austurlandi sé sífreri í fjöllum og hafi haldist þar samfellt frá lokum síðasta jökulskeiðs.^{22,23,51}

Laust eftir síðustu aldamót útveguðu franskir jarðfræðingar (Brigitte Van-Vliet-Laone og fl.) greinarhöfundur innrauðar SPOT gervitungla-myndir af Íslandi. Þessi franski hópur hafði stuttu áður birt grein með Íslandskorti sem sýndi bæði ummerki um útbreiðslu og botnskrið ísaldarjökla og byggði túlkun þeirra á framangreindum myndum³⁸. Af SPOT myndunum var mun auðveldara en áður að lesa ummerki um skriðstefnur ísaldarjökla en hægt var með eldri svart-hvítum loftmyndum. Blasti þá við að á stórum svæðum landsins mátti fylgja botnskriðsstefnum jökla frá hálendi og út dali, auk þess sem ummerki um nokkrar afmarkaðar fornar jökulmiðjur blöstu við á norður- og norð-austurlandi (svo sem Skagi, Tjörnes og Möðrudalsfjallgarður, Haugsöræfi og Melrakkaslétta). Sömu sögu má segja um framþróun á þessu sviði þegar staf-ræn hæðarlíkön voru sett inn á netsíður Landmælinga og hjá Ískortum ehf fyrir nokkrum árum.

Landmótunarfræðingar telja að rekja megi landmótun til tiltekinn langvinnra umhverfisaðstæðna og rofafla er viðkomandi land mótaðist.³⁸⁻⁴⁰ Athugun á framangreindum ummerkjum eftir botnskrið jökla sýnir að fornir meginjökla hafa sneitt merkilega vel framhjá svæðum með urðarjökulum og urðartungum þar sem hörfandi sífreri virðist víða vera enn til staðar.



5. mynd. Stefndreifing og hæðardreifing virkra urðarjökla (bleikur litur) og urðartungna (brúnn litur) á Tröllaskaga. (Freráfjöll²⁶, samsettar myndir 6.4b og 6.2d). – Rose diagram expressing direction of rockglaciers in Tröllaskagi and frequency diagram showing altitude of active and relict rockglaciers and related sedimentations. Ágúst Guðmundsson 2000.

SÍFRERI Á HÁLENDINU

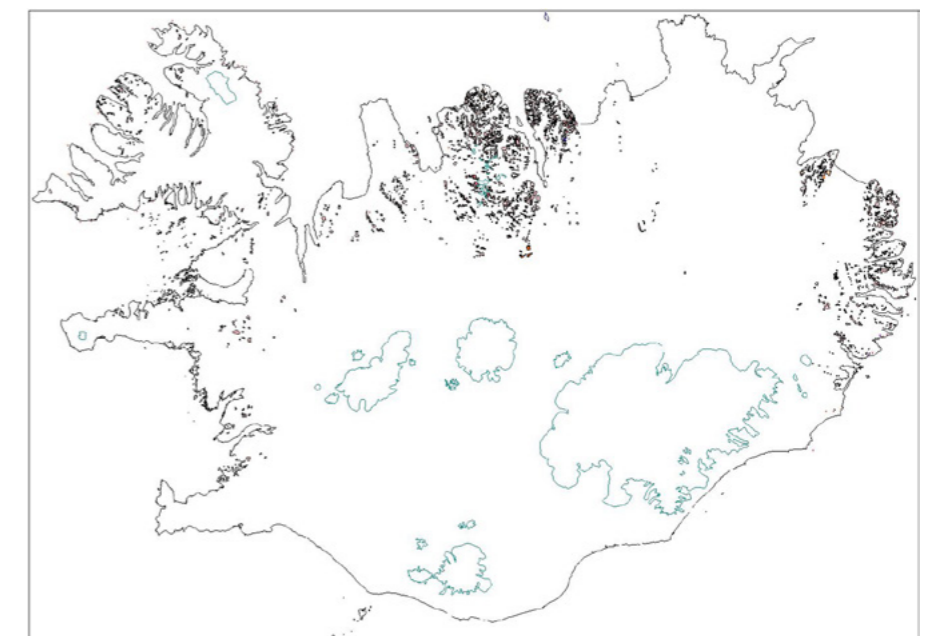
Ferðir jarðfræðinga um íslenska hálendið jukust mjög í tengslum við virkjanaundirbúning eftir miðja tuttugustu öld og víða blasti við þeim rústalandslag þar sem sífreri var að hörfa úr mýrum. Má þar nefna hálendið meðfram Efri-Þjórsá (mikið rannsakad um 1970 vegna mögulegrar orkuvinnslu), Orravatns-rústir og aðliggjandi svæði norðan Hofsjökuls og einnig víðáttumikil svæði á Austurhálendinu.⁴²⁻⁴⁹ Þegar unnið var að undirbúningi virkjunar Jökulsár í Fljótsdal um 1980 voru meðal annars kannaðar aðstæður fyrir mikinn veituskurð frá Jökulsá á Fljótsdal á Eyjabökkum og norðaustur á miðhluta Fljótsdalsheiðar, þaðan sem virkja skyldi fallið niður í Fljótsdal, kom t.d. í ljós að talsvert var um frost í jörðu árið um kring.

Í aðdraganda Kárahnjúkavirkjunar kom fljótlega í ljós að frekari vitneskju var þörf um sífrera því víða fannst sífreri í jörð þar sem reisa skyldi mannvirki og einnig reyndust sumar jarðefnanámur til fyllinga vera frosnar. Í tengslum við þær athuganir var sett út talsvert net af niðurgröfnum síritandi hitanemum og fylgdist Victor Helgason jarðfræðingur hjá Landsvirkjun með framvindu og úrvinnslu þeirra mælinga. Má segja að það hafi verið fyrsti vísir að beinum hitamælingum í sífrera á hálendi Íslands (óbirtar rannsóknaskýrslur Landsvirkjunar unnar af höfundi og KEJV (Kárahnjúkar Electric Joint Venture)

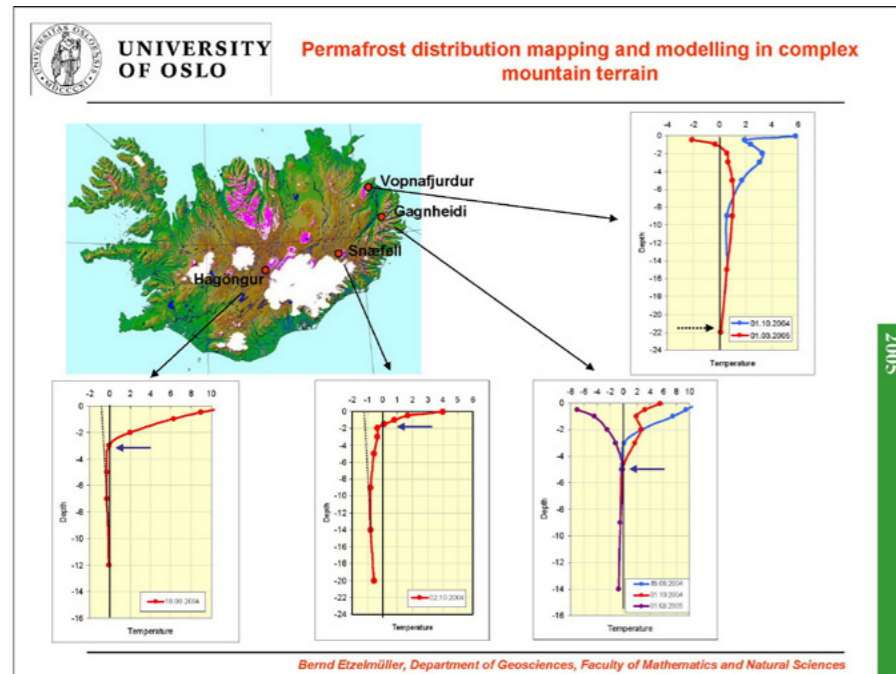
vegna undirbúnings Kárahnjúkavirkjunar á árunum 1995-2005).

Laust eftir aldamótin 2000 fór greinarhöfundur að leita eftir mögulegu samstarfi við erlenda aðila til að skoða eitthvað nánar sífrera hérlendis og komst eftir nokkrar þreifingar í samband við Bernd Etzelmüller prófessor í Osló í Noregi. Kom Bernd í stutta ferð til landsins í nóvember 2002 og fór ásamt höfundi norður í land til að skoða ýmis ummerki, sem höf. taldi

vera eftir fornan sífrera.^{2,12-14,27,28} Eftir ferðina undirbjó Bernd nokkur sífreratengd verkefni á Íslandi ásamt norskum doktorsnemum. Sumarið 2003 kom hópur þeirra til landsins og kom síritandi hitanemum fyrir á allmörgum stöðum á hálendinu, hátt í fjöllum á Tröllaskaga, á Miðhálendinu og á Austurlandi. Herman Farbrót vann í sífreramælingum og úrvinnslu úr síritandi hitamælum.²⁵ Hreyfingar og skriðhraði var mældur á sífreratengdum jarð-



6. mynd. Dreifing urðartunga sem talda eru vera af sífreratengdum uppruna. – Distribution of debris bodies considered as relict rockglaciers and related sediments. Teikn/Dwg: Ágúst Guðmundsson 2018.



7. mynd. Hitaferlar sýna sífrera í fjórum borholum í nálægt 900m hæð y.s. á Íslandi, við Hágöngur, á Vopnafjarðarfjöllum, á Gagnheiði og við Snæfell – Temperature profiles of boreholes near 900 m a.s.l. in Iceland. Teikning/Drawing Bernd Etzelmüller 2007.

myndunum og fleiri komu að smærri verkefnum í sífrerarannsóknum næstu ár á eftir.^{17,22} Síðsumars 2004 hafði höfundur fengið íslenska borverktaka til að bora fjórar holur hátt yfir sjávarmáli og settu Norðmenn niður í þær strengi með þéttum hitanemum og siritandi gagnasöfnunarbúnaði á holutoppum.²⁵

Við framangreindar athuganir voru fléttuð saman mæligögn úr borholum, fjölda stakra siritandi hitanema og loftslagsgögn. Á grundvelli þessara gagna voru gerðar frumútgáfur af útbreiðslukortum fyrir sífrera héraendis, bæði með tilliti til loftslags á Litlu-ísöld sem stóð frá fjórtánda öld og fram á þá tuttugustu²¹ og einnig út frá upplýsingum um loftslag síðustu áratuga. Sífrerakort fyrir Ísland hafa svo verið unnin áfram og þróast hjá Norðmönnum hin síðari ár.^{22–26} Karianne Lilleören birti 2013 grein um útbreiðslu sífrera í fjöllum á Tröllaskaga²³ og 2019 birtu Justina Czerkirda o. fl. yfirlitsgrein um útbreiðslu sífrera á Íslandi þar sem fléttuð var saman fyrirliggjandi gögnum sem aðallega voru unnin af Norðmönnum.²⁴ Árið 2020 birtu Bernd Etzelmüller og fl. yfirgrípsmikla grein um sífrera og sífreraeinkenni á Íslandi þar sem farið er grófllega yfir líklega hegðun sífrera héraendis frá hámarki síðasta jökulskeiðs til nútíðar.²²

Í kjölfar vinnu Norðmanna hafa nokkrir hópar erlendra vísindamanna komið að sífrerarannsóknum hin síðari ár. Má þar nefna hóp Spánverja sem hefur rannsakað ítarlega ýmis jökla- og sífreraeinkenni og birt fjölda greina um hegðun sífrera í háfjöllum á Tröllaskaga.¹⁸ Í greinum þeirra er að finna margar „strípunar- aldursgreiningar“ bæði í Skagafjarðarhéraði og í fjöllum á Tröllaskaga.^{18,51,52} Þrátt fyrir að þeir beini nær eingöngu sjónum að þróun jökla á Tröllaskaga á nútíma og geri mælingarnar jafnan niðri í skálunum þar sem jökla lifa lengst, sýna niðurstöður „strípmælinga“ þeirra að jökulyfirborð var komið niður fyrir 600 m hæð y.s. á fjallinu Elliða milli Hjaltadals og Kolbeinsdals fyrir 16–17 þúsund árum. (Miðað við eðliseiginleika jökla hefði sporður slíks jökuls þá legið í utanverðum Kolbeinsdal²⁷). Athyglisvert er að eftir fjögurra sumra leit að jökullípudum klöppum eða stórum grettistöfum til „strípunarmælinga“ uppi á háfjöllum Tröllaskaga höfðu þeir hvergi fundið slík fyrirbæri.

Auk ofanskráðs hefur Brigitte VanVliet-Laone, (ásamt frönskum samstarfsmönnum og doktorsnemum) í meira en aldarfjórðung skoðað jarðsögu ísaldarinnar og sífreramyndana á Íslandi. Meðal athyglisverðra rannsókna hafa þau rakið og kortlagt setlög víða á Norð-Austurlandi og á Suðurlandi, sem hún telur vera jarðveg, myndaðan á síðasta hlýskeiði.^{7,55,57}

Brigitte greindi einnig þróun og samsetningu setlaga sem fóru undir vatn í Háslóni við Kárahnjúka⁵⁴. Einnig hefur framangreindur hópur franskra vísindamanna aldursgreint fjölda fjalla og bergmyndana frá síðari hluta ísaldar.⁵⁸

Á suðurhálandinu er víða sífreri í jörðu ofan við 600 m y.s. Berggrunnskort hafði verið gert af sunnanverðum Sprengisandi laust fyrir aldamótin 2000⁶⁰. Árið 2003 var boruð hola í um 880 m hæð y.s. á hálsinum vestan við Hágöngulón og í hana settur liðlega 12 m langur strengur með siritandi hitanemum. Þar kom í ljós 7–10 m þykkt sífreralag sem virðist fremur hafa gefið eftir en styrkst síðastliðna tvo áratugi (óbirt gögn Trond Eiken og Etzelmüller 2020 og 2023). Á árunum 2013–2015 stóð Landsvirkjun fyrir rannsóknum á mögulegri virkjunarleið frá 800 m y.s. í Hágöngulóni og niður undir 600 m y.s. í Kvíslaveitu og nefnist verkefnið Skrokkölduvirkjun. Eftir liðlega 10 km langri mögulegri virkjunarleið voru boraðar um 15 kjarnaborholur og sá greinarhöfundur um jarðfræðilega hlið rannsókna. Í nokkrum borholanna komu fram sterkar vísbendingar um sífrerabelti skammt undir yfirborði. Þar er frosna efnid tildululega vatnsþétt en þegar borað var niður úr því hrundi vatnsborð í borholunum niður á tuga metra dýpi (eins og kemur fram í rannsóknaskýrslum Jarðfræðistofunnar ehf. fyrir Landsvirkjun⁵⁹).



8. mynd. Rústalandslag skammt vestan við Ánavatn á Jökuldalsheiði. Gráubungurnar innihalda ískjarna og síðsumars eru gjarnan um 0,4–0,6 m niður á innri ís þeirra. – Palsas near Ánavatn on Jökuldalsheiði. The grey bumps contain perennial ice at some 0.4–0.6m depth. Ljós./Photo: Ágúst Guðmundsson 2021.

HÖRFANDI SÍFRERI Á HÁLENDINU

Sífreri á Íslandi er líklega af tvennum eða þrennum toga. Í fyrsta lagi er grunnur sífreri sem myndaðist víða á hálandinu á Litlu-ísöld, (kuldaskiði sem stóð í 5–6 hundruð ár frá fjórtánda öld til fyrri hluta tuttugustu aldar).^{21,23,25} Þessi sífreri er viðkvæmur gagnvart loftslagshlýnun og virðist vera á hröðu undanhaldi eftir aldarlangt hlýndaskiði. Í öðru lagi er sífreri hærra í fjöllum sem tók að myndast fyrir 5–6 þúsund árum og virðast margir núverandi virkir urðarjökla á Tröllaskaga hafa byrjað að myndast á þeim tíma.^{17,18,51} Í þriðja lagi eru ef til vill til leifar af sífreramyndunum frá síðari hluta síðasta jökulskeiðs því sífreri getur lifað af mörg þúsund ár í þykkum sífreramynduðum jarðlögum, einkum í þeim er snúa móti norðri.²⁷

Rústalandslag

Hálendismýrar með rústalandslagi (e. palsas) eru nokkuð útbreiddar í lægðum og á flatlendi á hálendi Íslands.^{42–46,48,49} Rústir koma helst fyrir í dældum og á flötu landi þar sem vatn liggur í jarðvegi. Þar sem innri ís byggist upp í þeim hvelfast gjarnan upp lágreistar bungur, gróðursnaudari en næsta nágrenni (mynd 8). Þegar ísinn bráðnar falla bungurnar saman og mynda yfirleitt vatnsaugu en geta einnig myndað kringlóttu grunna bolla þar sem þurrara er innan rústasvæðanna.

Frerakúpur

Önnur sífrerafyrirbæri náskyld rústum, en almennt heldur stærri, eru lágur kúpur með ískjarna sem myndast geta við sífrera í finefnaríkum vatnsdrægum setlögum sem yfirleitt eru án gróðurþekju.^{56,61–63} Héraendis eru svona kúpur oft um 10–20 m í þvermál en margar eru aflangar og þá stundum tvisvar til þrisvar sinnum lengri en breiddin. Þær sem ekki hafa fallið saman (svo sem á Vatnsleysuöldum austan Köldukvislar sunnan við Hágöngur) eru víðast 2–5 m háar og hef ég kosið að nefna þær frerakúpur (e. lithalsas). Frerakúpur virðast gjarnan myndast við heldur lægri hita en frerarústir^{56,62–64} og héraendis liggja þær jafnan hærra í landinu en frerarústirnar. Samkvæmt Pissart^{61,62} hefur „lithalsa“ aðeins verið lýst á gróðurlitlum eða gróðurlausum svæðum í Kanada og Skandinavíu.

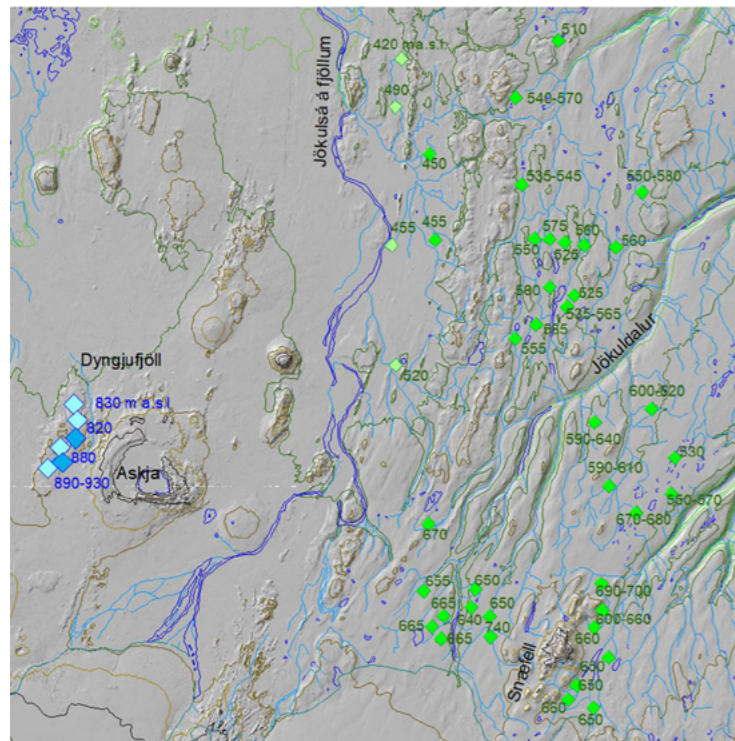
Í Kanada hefur verið lýst miklu stærri frerakúpum en í Skandinavíu og á Íslandi, 4–8 m háum. Þær eru tugir metra að þvermáli og oft mun meiri á lengdina.⁶³ Við frost-þíðu áhrif í kalli kúpanna verður aðgreining (e. sorting) í efninu næst yfirborði. Grófara efnid færast smátt og smátt frá kollinum út á vanga kúpannar. Þegar ískjarni þeirra bráðnar standa eftir grjótríkari kragar umhverfis samfallinn bolla þar sem ísinn var fyrrum mestur (mynd 10).

Á Dyngjufjöllum-Ytri eru bollar sem hafa skýr einkenni samfallinna frerakúpa (mynd 11). Nærri vesturjaðri

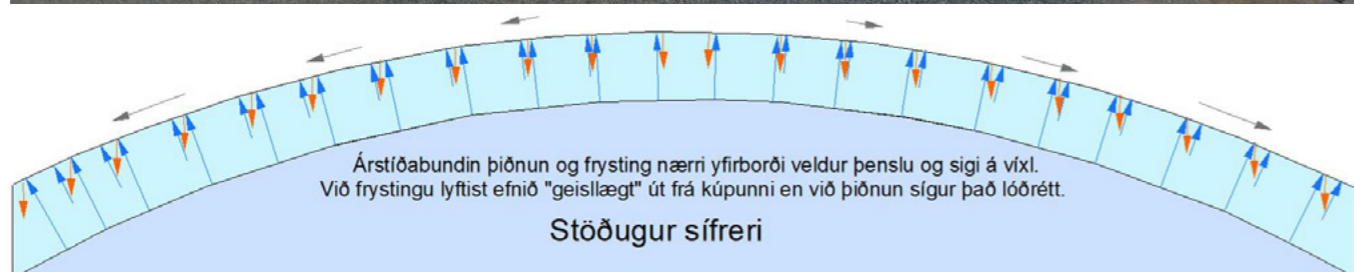
Dyngjufjalla-Ytri er landið hærra og þar virðast vera lítt samfallnar kúpur eða litlir bollar í yfirborð þeirra. Áður hefur verið ritað um bollana á Dyngjufjöllum og myndun þeirra túlkuð sem sprengigigar vegna fyrrum undirliggjandi jarðhita.⁶⁵ Hér er kynnt tilgáta til myndunar bollanna. Jarðmyndanir af þessu tagi eru vel þekktar þeim er lagt hafa stund á sífrerarannsóknir.^{56,62–64}

HÖRFANDI SÍFRERI Í FJÖLLUM OG RÖSKUN STÖÐUGLEIKA

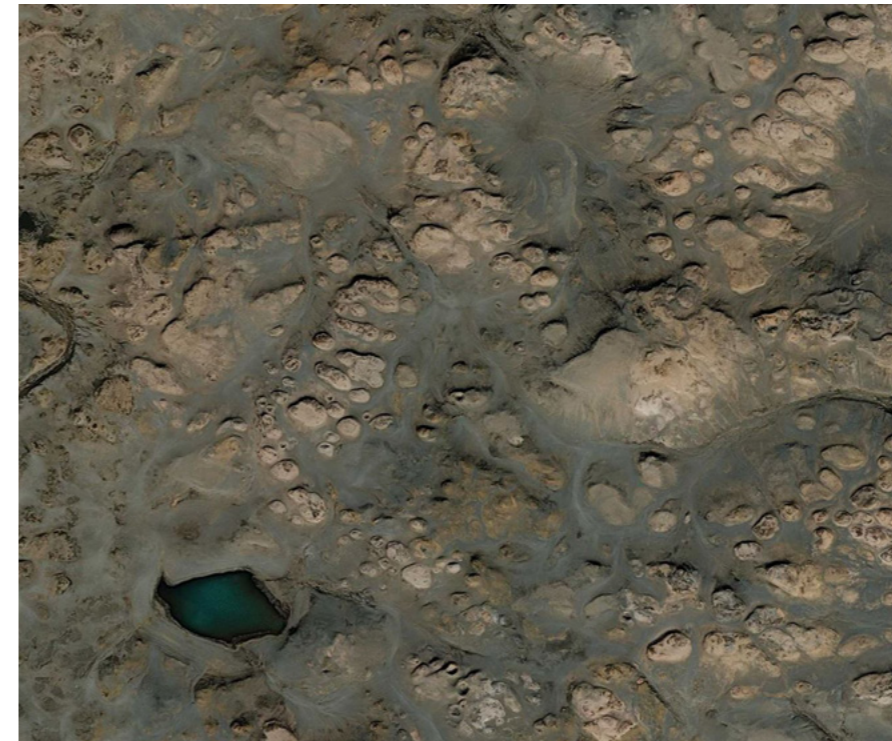
Undanfarin ár og áratugi hafa nokkrar skriður fallið úr bröttum fjallshlíðum á Íslandi. Komið hefur í ljós að upptök þeirra eru í sumum tilfellum í frosnum urðarhaugum. Eitt augljósasta dæmið af þessu tagi var skriða úr Móafellshyrnu í Fljótum haustið 2012 þar sem samanfrosinn klumpur á stærð við hús flaut í aur niður bratta hlíð. Svo virtist sem frosinn urðarhaugur uppi á hjalla ofan klettabelta hefði misst botnfestu við bráðnun og snarast fram. Meginhlutinn stöðvaðist þó á brún klettahjallans en glíðnaði sundur í fjölmarga samanfrosna stapa með skorum á milli. Veðurstofan birti greinargerð um þennan atburð.^{66–68} Næsta sumar höfðu staparnir bráðnað og brúnin jafnast út. Hliðstæðir atburðir hafa á síðasta áratug orðið norður í Trékyllisvík, tvisvar í innanverðum Eyjafríði, í Öskju og víðar.⁶⁸



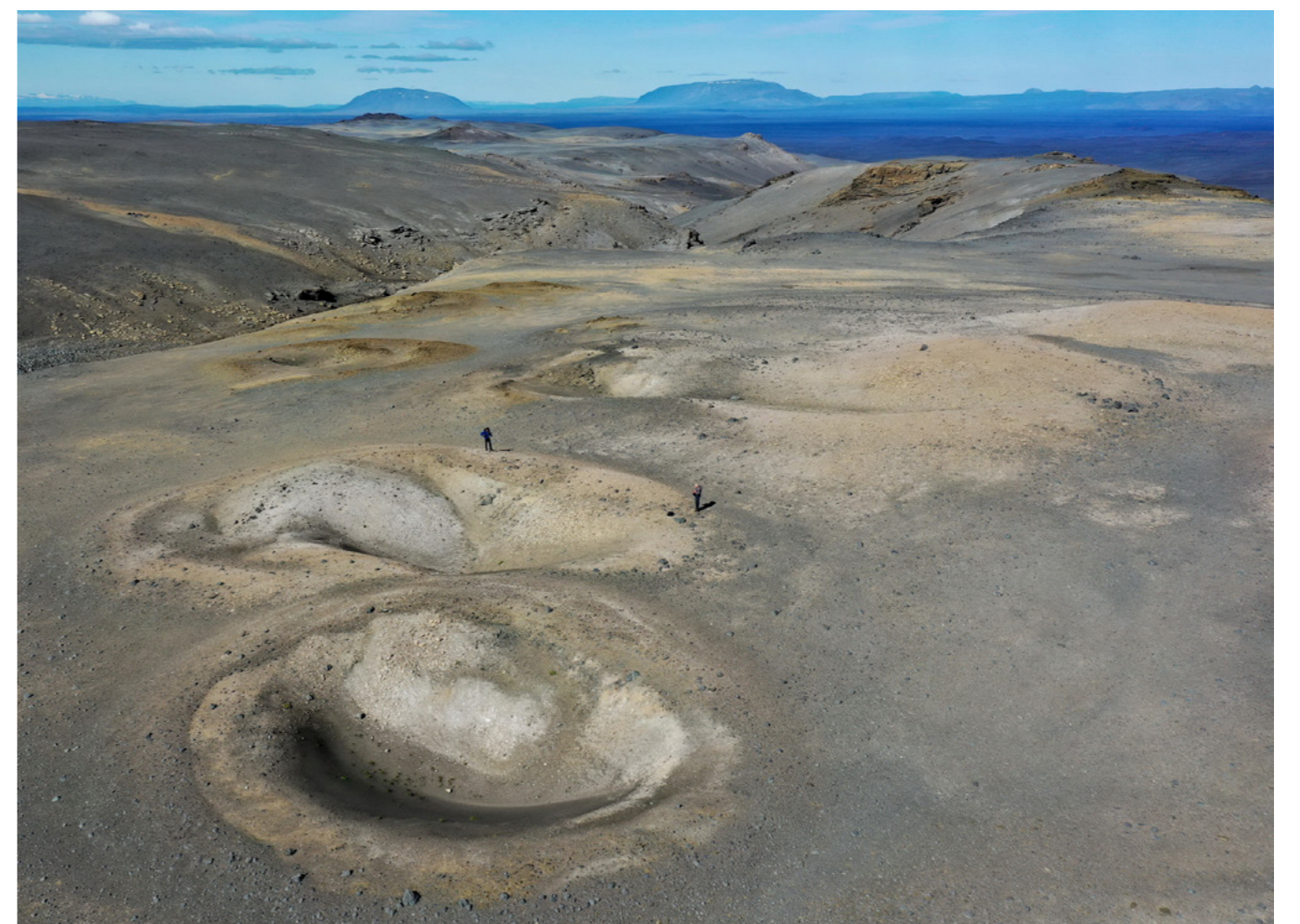
9. mynd Helstu rústasvæði á norðaustur-hálendi landsins eins og þau verða lesin af loftmyndum á vef Loftmynda ehf. Dökkgrænir tíglar tákna mýrar með blöndu af virkum og hörfandi rústum (palsas) og ljósgrænir tíglar tákna samfallnar fullbráðnaðar rústir. Tölurnar sýna hæð þeirra yfir sjávarmáli. Bláu tíglarnir í Dyngjufjöllum ytri tákna frerabungur í gróðurlausum setlögum (lithalsas), dökkbláir tíglar hafa líklega innri ískjarna en ljósbláir tíglar eru samfallnar bráðnaðir bollar. (Tölur á myndinni vísa til hæðar yfir sjávarmáli). – Green rhombuses express palsa areas in NE-Iceland and figures indicate their altitudes. Blue rhombuses indicate lithalsas areas west from Askja. Ágúst Guðmundsson 2022.



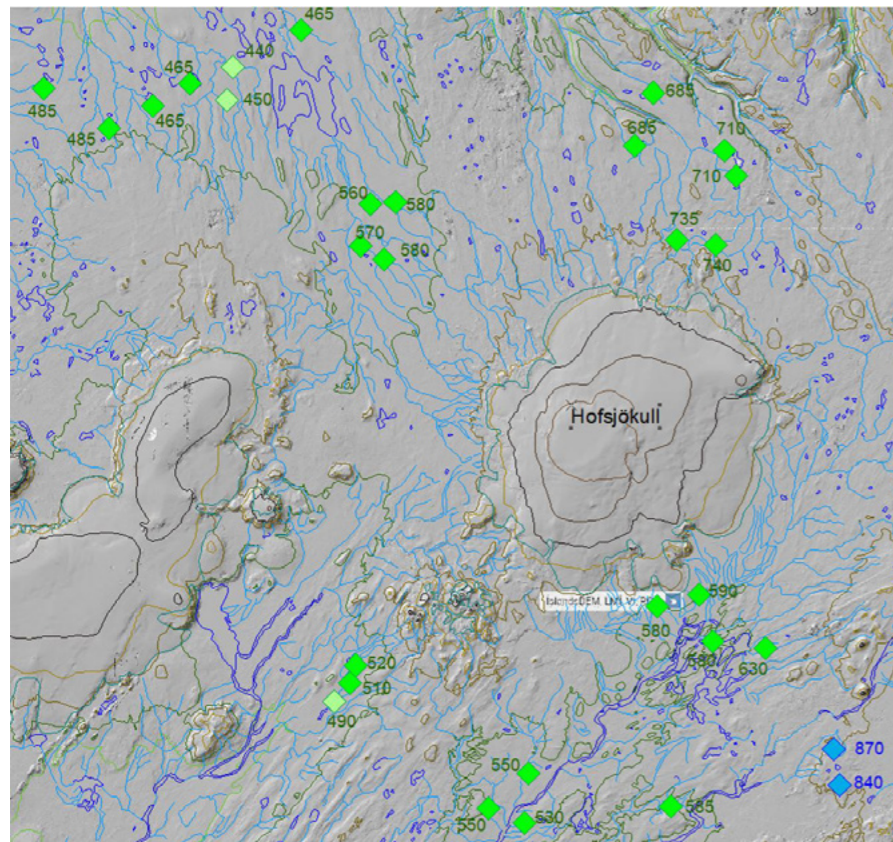
10. mynd. Frerakúpur á Vatnsleysuöldum austan Köldukvíslar, Kerlingar í fjarska. Skýringamynd sýnir hvernig efnisflutningar verða frá kolla frerakúpa (og einnig rústa) við frost- þiðuáhrif í virka laginu. – Lithalsas on Vatnsleysuöldur south from Hágöngur and east from Kaldakvísl. Teikning og Ljósmynd./Photo: Ágúst Guðmundsson 2022.



11. mynd. Frerakúpur (e. lithalsas) ýmist uppblógnar með ískjarna eða að hálfu samfallnar vegna bráðnunar í gjóskuríkum yfirborðssetlögum á Vatnsleysuöldum austan Köldukvíslar (um 10 km suður frá Syðri-Hágöngu). Á Hágönguhálsi (í sem næst sömu hæð yfir sjó) er borhola með siritandi hitanemum og sýna niðurstöður mælinga tveggja áratuga að sífrerinn þar er á undanhaldi. – Lithalsas on the top of Vatnsleysuöldur south from Hágöngur end east of Kaldakvísl. Ljósmynd/Photo Google Earth).



12. mynd. Samfallnar „rústir“ eftir þiðnaðar frerakúpur í gjóskuríkum yfirborðssetlögum á Dyngjufjöllum-Ytri. – Pits formed by melting lithalsas on the top of Dyngjufjöll-Ytri. Ljósmynd./Photo: Ágúst Guðmundsson 2021.



13. mynd. Helstu frerabungnasvæði á miðhálandinu eins og þau verða lesin af loftmyndum á vef Loftmynda ehf. Neðst í hægra horni eru frerakúpur á Vatnsleysufjöllum. (Sömu skýringar og við mynd 19. Grænir tíglar sýna rústasvæði og bláir tíglar frerakúpur. Tölur sýna hæð yfir sjávarmáli). – Areas where Palsas and Lithalsas are detected on aerial photos in central Iceland. Figures express their altitude in m a.s.l. (Green palsas, blue lithalsas). Teikning/Drawing Ágúst Guðmundsson 2022.



14. mynd. Móafellshyrna í Fljótum sumarið 2014. „Staparnir“ á brún hjallans hafa bráðnað. – Móafellshyrna in Fljót in the summer 2014 when all frozen debris had melted. Ljósmynd/Photo: Ágúst Guðmundsson 2014.

Aðstæður í Seyðisfirði

Í Strandartindi í Bjólfi við Seyðisfjörð eru sambærilegar aðstæður og lýst var að framan í Móafellshyrnu í Fljótum. Eftir mikla úrkomu og skriðuföll á Austurlandi haustið 2002 kom greinarhöfundur að könnun á jarðlögum í Seyðisfirði er tengja mætti ofanflóðahættu.⁶⁹ Hér á eftir verður nánar fjallað um aðstæður í Strandartindi og einnig minnst á Bjólfi.

Blágrýtislög efst í Austfjarðafjöllum (efstu 200-300m) hafa verið kortlögð⁷⁰⁻⁷² og reynast þau að mestu án útfellinga (holufyllinga). Athuganir höfundar á berggrunni Austfjarða vegna undirbúnings jarðgangagerðar, sýna ótvírætt að framangreind berglög eru yfirleitt hriplek (óbirt efni og skýrslur til Vegagerðarinnar). Við ákomu regns og bráðnandi snævar hripar vatnið sem næst lóðrétt niður í bergið uns það lendir á „þéttari“ jarðlagaskilum, til dæmis við þétt setbergslög. Við slíka fyrirstöðu leitar vatnið auðveldustu leiðina til hliðar og myndar þá gjarnan smálindir og jarðraka þar sem skilin koma fram í hliðum. Sama á sér stað þegar hriparandi jarðvatn mætir bergi sem þéttst hefur vegna aukinnar ummyndunar og innri útfellinga (holufyllinga). Í hliðum fjalla

má víða sjá hvernig gróður (áberandi er t.d. mosi) teygist niður frá ákveðnum þéttum jarðlögum sem veita grunnvatni fram úr fjallinu til yfirborðs. Stundum veita slík jarðvatnsskil möguleika á að rekja jarðlög um langan veg.

Þar sem jarðvatn kemur fram úr einstökum sprungum við jarðvatnsborð í fjallshliðum, geta með tímanum myndast víkkandi gil og síðan skálar sem urðarjökular og smájökular setjast gjarnan í. En ef vatnið kemur fram á löngum láréttum eða hallalitlum fleti í hlið fer frostið að „naga“ og plokka fram steinefni á þeim fleti. Við það myndast gjarnan hjalli í hliðina, klæddur samfrosnum aur og grjóti. Samfrosna lausveðraða efnið kallast urðarjökull (e. rockglacier). Á mynd 15 er teikning af hugmyndum höfundar um það ferli er myndar urðarjökulinn í Strandartindi og byggja þær hugmyndir á athugunum höfundar á niðurbroti basaltstaflans á Norðurlandi (Tröllaskaga) og Vestfjörðum, (óbirt gögn).

Hérlendis hafa stórar aurskriður fallið öðru hvoru úr frosnum urðum og urðartungum í fjallshliðum. Á undanförunum árum hafa æ fleiri tilgátur verið settar fram í ræðu og riti um að aukin tíðni skriðufalla standi í samhengi við hlýnun

loftslags og hörfun sifrera. Allar aðstæður eru til staðar í Strandartindi og Bjólfi fyrir upptök slíkra stórskriða og í Bjólfi eru aðstæður þannig að mjög stórar skriður gætu hlaupið úr fjallinu úr um 600m hæð y.s. Urðin í tungunum á myndum 16 og 17 er á hreyfingu og sama er að segja um urðarhjalla með þynnri og minni urð er liggur frá efri hluta urðarjökulsins í Strandartindi til austurs.

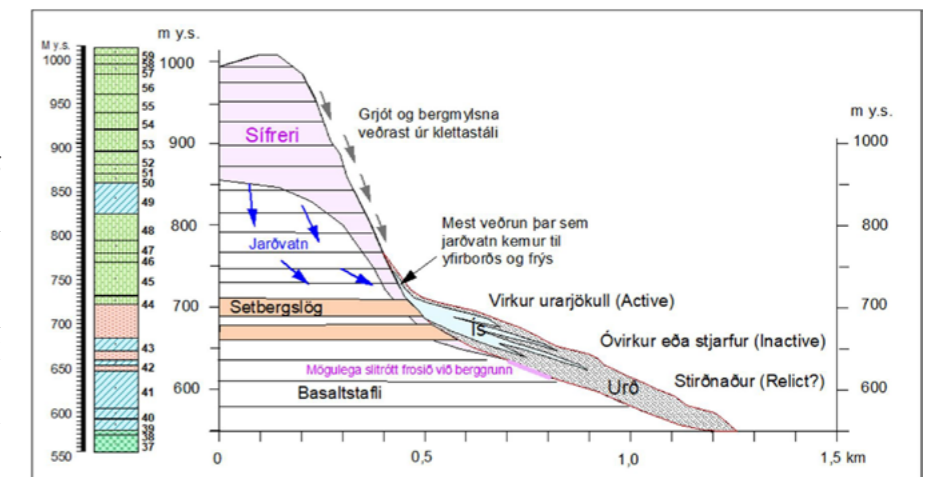
Skriðuhlaup í Hítardal

Þann 7. júlí 2018 varð mikið skriðuhlaup í Hítardal. Ummerki sýna að efnið sem hljóp fram hafi verið bergmylsna sem áður lá eins og límd utan í hlið Fagrasjógarfjalls, skammt innan við Grettisbæli. Vera má að fáeinir rúmmetrar hafi hrunið úr bergi efst í skriðusárinu. Hlaupið varð samfara miklum rigningum á svæðinu og var skriðan sem slíkt vatnssósa aurlaup. Berggrunnurinn í bakvegg skriðusársins er með stórgerðar, sérkennilegar skriðrákir (e. slickensides) og er skriðuhlaupið allt hið athyglisverðasta (myndir 18 og 19).

Athyglisvert er að þegar starfsfólk Veðurstofunnar tók myndir af fjallinu með „hitamyndavél“ skömmu eftir framhlaupið, sést ljóslitaðri tunga frá brúnni niður í skriðusárið og skriðuefnið

(sjá mynd 20 frá Tómasi Jóhannessyni Veðurstofunni). Leiða má líkur að þarna sé svalari tunga sem hafi verið frosin eða við frostmark þegar hrunið varð. Þegar grafið var í sífrerajarðlög nærri Kárahnjúkum nærri síðustu aldamótum, mældi höfundur hitastig þeirra á yfirborði jafnan +1-2 °C þrátt fyrir að jarðlagið væri beingaddað og mælt samhliða skrapi graftólanna. Sé reynslan frá Kárahnjúkum yfirferð á skriðusárið í Hítardal má ætla að á fáeinum mínútum, hvað þá klukkustundum eftir að skriðan féll, hafi yfirborðshitinn í skriðusárinu og hrunefninu hækkað snögg um einhverjar gráður. Varmi sem myndast við núning innan fallandi skriðuefnisins leiðir til hitamyndunar og getur sá varmi valdið því að samfrosin bergmylsna breytist í blautan aur.

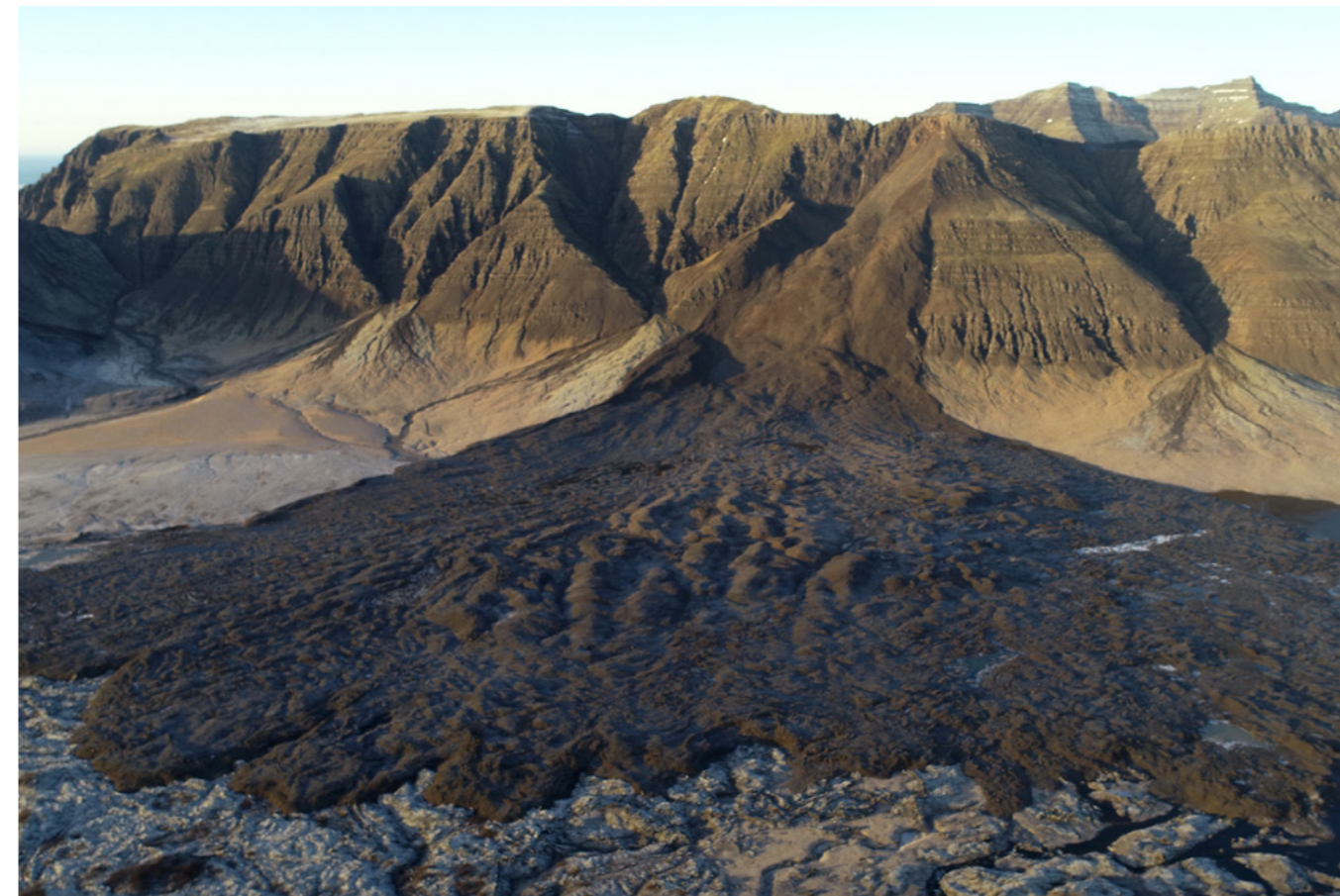
Þau frerafyrirbæri sem að framan hefur verið lýst, finnast í fjalllendi á allmörgum stöðum ofan við þéttbýlisstaði á Íslandi. Samhliða innri bráðnun eða mikilli úrkomutíð geta urðartungurnar orðið óstöðugar og sent niður skriður með litlum fyrirvara. Má þar t.d. nefna Seyðisfjörð, Ísafjörð, Bolungavík og Siglufjörð.



15. mynd. Jarðlagasnið Strandartindar í Seyðisfirði þar sem dregin eru fram einkenni urðarjökulsins á mynd 16. Jarðlagasniðið (súlan) til vinstri er samkvæmt kortlagningu höfundar á berggrunnum⁷⁰ en langsníðið til hægri er stílfært. – Schematic section and geological profile at Strandartindur in Seyðisfjörður. Groundwater percolating through the highly permeable topmost part of the mountain enter the surface at some 700m a.s.l., probably a driving force for the formation of rockglacier. Teikning/drawing: Ágúst Guðmundsson 2021.



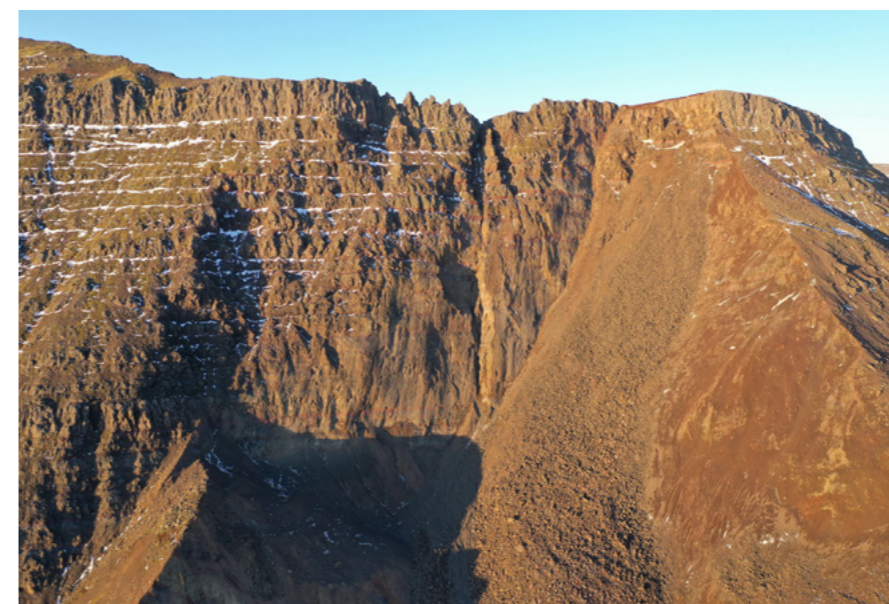
16. mynd. Í Strandartindi í Seyðisfirði er frosinn urðarjökul undir háu klettunum fyrir miðju myndar. Hæg hreyfing á urðinni nægir til þess að umtalsverðar aurskriður hafa, í stórrigningum á nokkurra áratuga fresti, farið niður hlíðar Strandartinds og sumar valdið mannskaða svo sem um miðja síðustu öld. Með hlýnandi loftslagi virðast skapast skilyrði fyrir hættu á framhlaupum, hliðstæðum því framhlaupi sem varð á urð í Móafellshyrnu í Fljótum 2012. – Strandartindur in Seyðisfjörður with active rockglacier in the center. Ljós./ Photo: Ágúst Guðmundsson 2021.



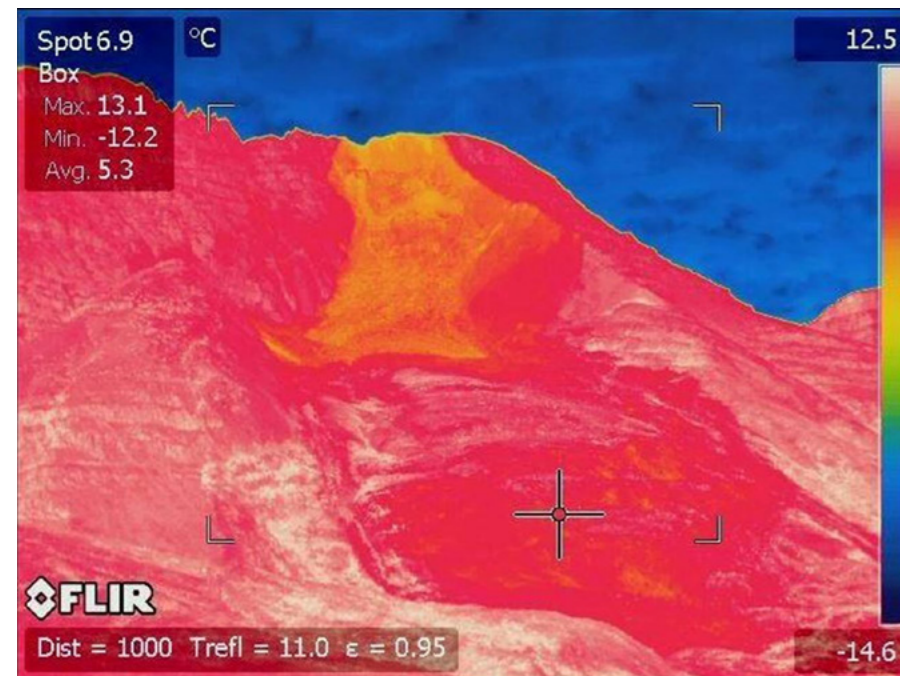
18. mynd. Yfirlit yfir vesturhlíð Hítardals þar sem skriða féll 7. júlí 2018. Myndin er tekin síðla hausts á sama ári. – Large landslide occurred in Hítardalur in July 2018 but the photo is from late autumn same year. Ljós./Photo: Ágúst Guðmundsson November 2018.



17. mynd. Undir háfjalli Bjólfs í Seyðisfirði eru augljós merki um að talsvert skrið hafi verið á urðartungunum en líklega er hraði skriðsins lotubundinn. Slakkar og lægðir í urðinni ásamt samsettum skriðspildum benda til bráðnunar á innri ís. – Bjólfur in Seyðisfjörður with creeping rockglacier body. Ljós./ Photo: Ágúst Guðmundsson 2015.



19. mynd. Upptakasvæði skriðunnar sem hljóp í Hítardal 7. júlí 2018. Myndin er tekin í nóvember á sama ári. – The upper part of the landslide in Hítardalur 2018 with its peculiar vertically striated backwall. Ljós./Photo: Ágúst Guðmundsson November 2018.



20. mynd. Hitamynd frá Veðurstofu Íslands. Rofsárið og skriðuefni í Hítardal nokkrum klukkustundum eftir framhlaupið 2018. Ljósari gulbrúnn litur sýnir svalara svæði en annarsstaðar á hlaupsvæðinu. – Thermal image of the landslide in Hítardalur several hours after the event. The orange colour in the upper part indicates „cooler“ area (indicating permafrost) at the top of the mountain. Ljósni./Photo: Veðurstofa Íslands July 2018.

ENGLISH SUMMARY Permafrost in Iceland

The author summarizes his work on permafrost in Iceland which spans more than half a century. A major conclusion of this article is that during the LGM the ice-sheet on Iceland was rather restricted giving ample opportunities for permafrost in the mountainous areas to leave its mark on the landscape. Among the most prominent of these landforms are cirques, many of which have been occupied and eroded by permafrost and rock glaciers for a long time. The distribution of numerous permafrost features

all over Iceland is presented. Most are to be found in areas of alpine landscapes like in the Vestfirðir of northwest Iceland, the Tröllaskagi massif in central northern Iceland and in the Austfirðir mountains, East Iceland. Investigations of the different activity state of rock glaciers (active, inactive and relict) include altitude/distance from the ocean and aspect as a function of altitude. Observations have also been made on the sediment content of the rock glaciers, especially the relict ones (due to accessibility). The author presents results of research in this field in cooperation

with Norwegian and French scientists. A special field of interest has been mapping the debris covered mountain sides where there is an increased risk of these features collapsing when permafrost recedes as a result of global warming. Tundra like permafrost is widespread in the central plateau of Iceland above c. 600 m a.s.l. exhibiting typical landforms like palsas and lithalsas. The existence and activity of these landforms may most likely be connected to reduced temperatures during the Little Ice Age. At present these features generally show clear signs of degeneration.



Urðarjökullar og urðarjökulaset undir Skessuhorni í norðanverðri Skarðsheiði 2022 – Active- and relict Rockglaciers at the base of Skessuhorn on the north side of Skarðsheiði (Borgarfjörður). Ljósni./Photo: Ágúst Guðmundsson 2022.

HEIMILDIR

1. Þorleifur Einarsson 1968. Jarðfræði. Saga bergs og lands. Mál og menning, Reykjavík. 335 bls.
2. Ágúst Guðmundsson 1992. Rock glaciers in Iceland and morphological comparison with phenomena traditionally classified as landslides - Poster. Vetarmót norræna jarðfræðinga Reykjavík, 7-10 janúar 1992.
3. Þorleifur Einarsson & Kristinn Albertsson 1988. The glacial history of Iceland during the past three million years. Philosophical Transactions of the Royal Society B. 318. 637–644.
4. Áslaug Geirsdóttir & Jón Eiríksson 1994. A review of studies of the earliest glaciations in Iceland. Terra Nova 8. 400–414
5. Áslaug Geirsdóttir, Miller, G.H. & Andrews J.T. 2007. Glacial erosion and landscape evolution of Iceland. Journal of Geodynamics 43. 170–186.
6. Jón Eiríksson 2008. Glaciation events in the Pliocene-Pleistocene volcanic succession of Iceland. Jökull 58. 315–329.
7. Van Vliet-Lanoë, B., van Cauwenberge, A.-S., Bourgeois, O., Dauteuil, O. & Schneider, J.-L. 2001. A candidate for the last interglacial record in northern Iceland: The Sydra formation. Stratigraphy and sedimentology. Earth and Planetary Science 332. 577–584.
8. Hreggviður Norðdahl, Ólafur Ingólfsson & Halldór Pétursson 2012. Ísaldarlök á Íslandi. Náttúrufræðingurinn 81(1–4). 73–86.
9. Hreggviður Norðdahl & Halldór G. Pétursson 2005. Relative sea-level changes in Iceland: New aspects of the Weichselian deglaciation of Iceland. Bls. 25–78 í: Iceland – Modern Processes and Past Environments (ritstj. C. Caseldyne, A. Russel, Jórunn Harðardóttir & Óskar Knudsen). Elsevier, Amsterdam.
10. Halldór Pétursson, Hreggviður Nordahl & Ólafur Ingólfsson 2015. Late Weichselian history of relative sea level changes in Iceland during collapses and subsequent retreatment of marine based ice sheet. Cuadernos de Investigación Geografica 41(2). 261–277.
11. Ólafur Ingólfsson, Hreggviður Norðdahl & Schomacker, A. 2010. Deglaciation and Holocene glacial history of Iceland. Development in Quaternary Sciences 13. 51–68.
12. Wahrhaftig, C. & Cox, A. 1959. Rock glaciers in the Alaska Range. Bulletin of the Geological Society of America 70. 383–436.
13. Giardino, J.R., Shroder, J.F. & Vitek, J.D. 1987. Rock Glaciers. Allen and Unwin, Boston. 335 bls.
14. Barsch, D. 1996. Rockglaciers: Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments. Springer, Heidelberg. 331 bls.
15. Berthling, I. 2011. Beyond confusion: Rock glaciers as cryo-conditioned landforms. Geomorphology 131(3–4). 98–101.
16. Eyles, N. 1978. Rock glaciers in Esjufjöll nunatak area South-East Iceland. Jökull 28. 53–56.
17. Wangenstein, B., Ágúst Guðmundsson, Eiken, T., Kääb, A., Farbrot, H. & Etmüller, B. 2006. Surface displacements and surface age estimates for creeping slope landforms in northern and eastern Iceland using digital photogrammetry. Geomorphology 80(1–2). 59–79.
18. Fernández-Fernández, J.M., Palacios, D., Andrés, N., Schimmelpfenning, I., Tanarro, L.M., Skafti Brynjólfsson, Lópes-Acevedo, F.J., Þorsteinn Sæmundsson & A.S.T.E.R. 2020. Constraints on the timing of debris-covered and rock glaciers: An exploratory case study in the Hólar area, northern Iceland. Geomorphology 361(2). 1–22.
19. Whalley, W.B. & Martin, H.E. 1994. Rock glaciers in Tröllaskagi: Their origin and climatic significance. Bls. 289–308 í: Environmental change in Iceland (ritstj. J. Stötter & F. Wilhelm). Institut für Geographie der Universität München.
20. Whalley, W.B., Palmer, C.F., Hamilton, S.J. & Martin, H.E. 1995. An assessment of rock glacier sliding using seventeen years of velocity data: Nautárdalur rock glacier, North Iceland. Arctic and Alpine Research 27(4). 345–351.
21. Etmüller, B., Farbrot, H., Ágúst Guðmundsson, Humlum, O., Tveito, O.E. & Helgi Björnsson 2007. The regional distribution of mountain permafrost in Iceland. Permafrost and Periglacial Processes 18(2). 185–199.
22. Etmüller, B., Patton, H., Schomacker, A., Czerkirda, J., Girod, L., Hubbard, A., Lilleøren, K.S. & Westermann, S. 2020. Icelandic permafrost dynamics since the last glacial maximum – model results and geomorphological implications. Quaternary Science Reviews 233. 106236, P. 1-15.
23. Lilleøren, K.S., Etmüller, B., Gärtner-Roer, I., Kääb, A., Westermann, S. & Ágúst Guðmundsson 2013. The distribution, thermal characteristics and dynamics of permafrost in Tröllaskagi, northern Iceland, as inferred from distribution of rock glaciers and ice-cored moraines. Permafrost and Periglacial Processes 24. 322–335.
24. Czerkirda, J., Westermann, S., Etmüller, B. & Tómas Jóhannesson 2019. Transient modelling of permafrost distribution in Iceland. Frontiers in Earth Science 7. 130, P 1-23.
25. Farbrot, H., Etmüller, B., Ágúst Guðmundsson, Humlum, O., Kellerer-Pirklbauer, A., Eiken, T. & Wangenstein, B. 2007. Rock glaciers and permafrost in Tröllaskagi, northern Iceland. Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. 51. 1–16.
26. Hjalti J. Guðmundsson 1997. A review of the Holocene environmental history of Iceland. Quaternary Science Reviews Vol. 16(1). P. 81–92.
27. Ágúst Guðmundsson 2000. Frerajöll og urðarbingir á Tröllaskaga. Meistaraprófsritgerð við Raunvísindadeild Háskóla Íslands. 322 bls.
28. Ágúst Guðmundsson 1995. Berghlaup eða urðarjökull? Náttúrufræðingurinn 64(3). 177–186.
29. Ágúst Guðmundsson 1996. Eyjar í jökulhafi. Smjörfjallgarður. Jökulvana landsvæði á síðasta jökulskeiði í fjallgarðinum á milli Vopnafjarðar og Héraðs. Múlaþing 1996. 42–63.
30. Ágúst Guðmundsson 2010. Rock glaciers and relict bodies in Central North Iceland. Iceland in the Central Northern Atlantic: Hotspot, sea currents and climate change, May 2010. Plouzané France. <hal-00480743>.
31. Humlum, O. 1982. Rock glaciers types on Disko, Central West Greenland. Geografisk Tidsskrift 82. 59–66.
32. Humlum, O. 1996. Origin of rockglaciers: Observations from Mellemfjord, Disko Island, Central West Greenland. Permafrost and Periglacial Processes 7. 361–380.
33. Humlum, O. 1998. The climatic significance of rockglaciers. Permafrost and Periglacial Processes 9. 375–395.
34. Sigurður Þórarinnsson 1937. The main geological and topographical features of Iceland. Geografiska Annaler. 161–175.
35. Guttormur Sigbjarnarson 1983. The Quaternary alpine glaciation and marine erosion in Iceland. Jökull 33. 87–98.
36. Guttormur Sigbjarnarson 1982. Alþjóðleg og öldubrujótur. Bls. 79–89 í: Eldur er í Norðri. Afmælisrit helgað Sigurði Þórarinnssyni sjötugum 8. janúar 1982. Sögufélag, Reykjavík.
37. Rundgren, M. & Ólafur Ingólfsson 1999. Plant survival in Iceland during periods of glaciation? Journal of Biogeography 26(2). 387–396.
38. Bourgeois, O., Dauteuil, O. & Van Vliet-Laoné, B. 1998. Pleistocene subglacial volcanism in Iceland: Tectonic implications. Earth and Planetary Science Letters 164(1–2). 165–178.
39. Porter, S.C. 1989. Some geological implications of average Quaternary glacial conditions. Quaternary Research 32(3). 245–261.
40. Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschq, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. & Mühl, D.V. 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. Earth-Science Reviews 92(3–4). 117–171.
41. Ingibjörg Kaldal & Skúli Víkingsson. 1990. Early Holocene deglaciation in Central Iceland. Jökull 40. 51–66.
42. Björn Bergmann 1973. Um rústir á húnvetnskum heiðum. Náttúrufræðingurinn 42. 190–198.
43. Hörður Kristinnsson & Ragnhildur Sigurðardóttir 2002. Freðmyrarústir á áhrifsvæði Norðlingaveitu. Breytingar á 30 ára tímabili. Skýrsla unnin fyrir Landsvirkjun. Náttúrufræðistofnun (NÍ-022002), Reykjavík. 26 bls.
44. Bergþór Jóhannsson, Hörður Kristinnsson og Jóhann Pálsson 1974. Skýrsla um grasfræðirannsóknir í Þjórsárverum 1972. Unnið á Náttúrufræðistofnun Íslands fyrir Orkustofnun. Orkustofnun (OS-ROD 7415), Reykjavík. 153 bls.
45. Þóra Ellen Þórhallsdóttir 1988. Þjórsárver. Vörður á vegi. Árbók Ferðafélags Íslands 1988, bls. 83–115.
46. Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2002. Þjórsárver. Jökull 51. 95–96.
47. Hirakawa, K. 1986. Development of palsa bog in central highland, Iceland. Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University 21. 111–122.
48. Þorsteinn Sæmundsson, Ólafur Arnalds, Kneisel, C., Helgi Páll Jónsson & Decaulne, A. 2012. The Orravatsrustir palsa site in Central Iceland—Palsas in an aeolian sedimentation environment. Geomorphology 167–168. 13–20.
49. Hjörleifur Guttormsson 1987. Norð-Austurland – hálandi og eyðibýggðir. Árbók Ferðafélags Íslands, Reykjavík. 218 bls.

50. Haerberli, W. 1985. Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen Der Versuchsanstalts für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* 77. Zürich. 142 bls.
51. Tanarro, L.M., Palacios, D., Andrés, N., Fernández-Fernández, J.M., Zamorano, J.J., Þorsteinn Sæmundsson & Skafti Brynjólfsson 2019. Unchanged surface morphology in debris-covered glaciers and rock glaciers in Tröllaskagi peninsula (northern Iceland). *Science of the Total Environment* 648. 218–235.
52. Tanarro, L.M., Palacios, D., Fernández-Fernández, J.M., Andrés, N., Oliva, M., Rodríguez-Mena, M., Schimmelpfennig, I., Skafti Brynjólfsson, Þorsteinn Sæmundsson, Zamorano, J.J., Úbeda, J. & A.S.T.E.R. 2021. Origins of the divergent evolution of mountain glaciers during deglaciation: Hofsdalur cirques, northern Iceland. *Quaternary Science Reviews* 273. P 1-27.
53. Bourgeois, O., Dauteuil, O. & Van Vliet-Lanoë, B. 2000. Geothermal control on flow patterns in the last glacial maximum ice sheet of Iceland. *Earth Surface Processes and Landforms* 25. 59–76.
54. Van Vliet-Lanoë, B., Ágúst Guðmundsson, Guillou H., Guégan, S., van Loon, T., de Vleeschouwer, F. 2010. Glacial termination II and I as recorded in NE Iceland. *Geologos* 16(4). 201–222.
55. Van Vliet-Lanoë, B., Schneider, J.-L., Ágúst Guðmundsson, Guillou, H., Nomande, S., Chazot, G., Liorzou, C. & Guégan, S. 2018. Eemian estuarine record forced by glacio-isostasy (southern Iceland)—link with Greenland and deep sea records. *Canadian Journal of Earth Sciences* 55(2). 154–171.
56. Van Vliet-Lanoë, B. & Ágúst Guðmundsson 2020. Permafrost and climate change in Iceland. *Géosciences Ocean; UMR 6538 Brest University CNRS Plouzané France*.
57. Van Vliet-Lanoë, B., Bergerat, F., Allemand, P., Innocent, C., Guillou, H., Cavailhes, T., Ágúst Guðmundsson, Chazot, G., Schneider, J.-L. Grandjean, P., Liorzou, C. & Passot, P. 2019. Tectonism and volcanism enhanced by deglaciation events in southern Iceland. *Quaternary Research* 94. 94–120.
58. Gulliou, H., Van Vliet-Lanoë, B., Ágúst Guðmundsson & Nomade, S. 2010. New unspiked K-Ar ages of Quaternary sub-glacial and sub-aerial volcanic activity in Iceland. *Quaternary Geochronology* 5(1). 10–19.
59. Ágúst Guðmundsson & Ward, T. 2017. Skrokkalda hydroelectric project: Ground investigation report 2011-2016. Unnið fyrir Landsvirkjun. Jarðfræðistofan, Hafnarfirði. 52 bls.
60. Elsa G. Vilmundardóttir, Snorri P. Snorrason & Guðrún Larsen 1999. Geological map (Bedrock) Nyrðri-Háganga 1914 II, 1:50.000. Landmælingar Íslands, Orkustofnun & Landsvirkjun, Reykjavík.
61. Pissart, A. 2002. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report. *Progress in Physical Geography*. 26(4). 605–621.
62. Pissart, A. 2013. Palsas and lithalsas. Bls. 223–237 *í: Glacial and Periglacial Geomorphology. Treatise on Geomorphology* 8 (ritstj. R. Giardino & J. Harbor) Elsevier, Amsterdam.
63. Wolfe, S.A., Stevens, C.W., Gaanderse, A.J. & Oldenborger G.A. 2014. Lithalsas distribution, morphology and landscape associations in the Great Slave Lowland, Northwest Territories, Canada. *Geomorphology* 204. 302–313.
64. Ballantyne, C.K. 2018. Periglacial geomorphology. Wiley, Hoboken. 441 bls.
65. Guðmundur Sigvaldason 1992. Recent hydrothermal explosion craters in an old hyaloclastite flow, Central Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 54(1–2). 53–63.
66. Morino, C., Conway, S.J., Þorsteinn Sæmundsson, Jón Kristinn Helgason, Hillier, J.K., Butcher, F.E.G., Balme, M.R., Jordan, C. & Argles, T. 2019. Molards as an indicator of permafrost degradation and landslide processes. *Earth and Planetary Science Letters* 516(2). 136–147.
67. Þorsteinn Sæmundsson, Morino, C., Jón Kristinn Helgason, Conway, S.J. & Halldór G. Pétursson 2017. The triggering factors of the Móafellshyrna debris slide in northern Iceland: Intense precipitation, earthquake activity and thawing of mountain permafrost. *Science of The Total Environment* 621. 1163–1175.
68. Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Tómas Jóhannesson, Kristín S. Vogfjörð, Harpa Grímsdóttir, Ásta Rut Hjartardóttir, Þorsteinn Sæmundsson, Ármann Höskuldsson, Freysteinn Sigmundsson & Reynolds, H.I. 2014. Frumniðurstöður rannsókna á berghlaupi í Öskju 21. júlí 2014. Á vefsetri Væðurstofu Íslands, slóð (skoðað 20.11.2023): <https://www.vedur.is/ofanflod/frodleikur/greinar/nr/2927>
69. Ágúst Guðmundsson, Óskar Knudsen & Haraldur Hallsteinsson 2003. Seyðisfjörður. Athuganir á setmyndunum og jarðgerð í Þófum og Botnum. *Veturinn 2002–2003. Jarðfræðistofan, Hafnarfirði*. 45 bls. með viðaukum.
70. Leó Kristjánsson & Ágúst Guðmundsson 1995. Stratigraphy and paleomagnetism of a 3-km-thick Miocene lava pile in the Mjoiðfjörður area, eastern Iceland. *Geologische Rundschau* 84. 813–830.
71. Walker, G.P.L. 1960. Zeolite zones and dike distribution in relation to the structure of the basalts of eastern Iceland. *Journal of Geology* 68(5). 515–527.
72. Walker, G.P.L. 1959: Geology of the Reydarfjörður area, eastern Iceland. *Quarterly Journal of the Geological Society of London* 114. 367–393.

UM HÖFUNDINN

Ágúst Guðmundsson (f. 1949) lauk BS-prófi í jarðfræði frá Háskóla Íslands árið 1976, fjórða árs prófi 1978 og MSc-prófi frá sama skóla árið 2000. Hann starfaði hjá Orkustofnun 1975-1990 að jarðfræðikortlagningu og mannvirkjajarðfræði við fyrirhugaðar vatnsaflsvirkjanir. Ágúst hóf rekstur Jarðfræðistofu 1990 og hefur síðan þá starfað sjálfstætt, aðallega sem verktaki fyrir Landsvirkjun og Vegagerðina við undirbúning stórmannvirkja, virkjana og vegganga. Ágúst hefur stundað athuganir og skráningu á sífrera í fjöllum Íslands síðan um 1980 og hin síðari ár í samstarfi við vísindafólk í Noregi og Frakklandi.



Ágúst Guðmundsson

Jarðfræðistofan ehf | Hólshrauni 7,

Is-220 Hafnarfjörður | agust@geoice.net