

# NÁTTÚRU FRÆÐINGURINN



ÍSLENSKIR JÖKLAR  
JÖKLARANNSÓKNAFÉLAG  
ÍSLANDS

SÓLMYRKVAR Á ÍSLANDI  
TVEGGJA-FLOKKA  
KYNJAKERFI ER ÚRELT

FRÁ ARFGERÐ TIL SVIPGERÐAR  
NÝ TEGUND SÆSNIGILS  
Í ATLANTSHAFI



# NÁTTÚRUFRAEÐINGURINN

Alþýðlegt fræðslurit um náttúrufræði

95. árgangur 1.–4. hefti 2025

## Efnisyfirlit

- 3 **Náttúran og nútíminn – okkar vegferð**  
*Lísa Anne Libungan*
- 4 **Íslenskir jöklar**  
*Andri Gunnarsson, Hrafnhildur Hannesdóttir,  
Finnur Pálsson, Tómas Jóhannesson,  
Eyjólfur Magnússon, Þorsteinn Þorsteinsson,  
Bergur Einarsson, Guðfinna Th. Aðalgeirsdóttir,  
Joaquín M.-C. Belart, Oddur Sigurðsson,  
Snævarr Guðmundsson og Helgi Björnsson*
- 49 **Sjötíu og fimm ár á jöklum: Jöklarannsóknafélag Íslands**  
*Andri Gunnarsson og Hrafnhildur Hannesdóttir*
- 56 **Sólmyrkvar á Íslandi**  
*Þórður Arason*
- 70 **Ný tegund sæsnigils í Atlantshafi**  
— svartserkur *Melanochlamys diomedea* (Bergh, 1894)  
*Svanhildur Egilsdóttir, Áki Jarl Lárusson,  
Laure de Montety, Joana Micael og Sindri Gíslason*
- 82 **Frá arfgerð til svipgerðar: tengsl breytileika í  
genastjórnun við svipgerðir og sjúkdóma**  
*Hulda Karen Ingvarsdóttir og Arnar Pálsson*
- 96 **Tveggja-flokka kynjakerfi er úrelt**  
*Gísli Pálsson*

*Náttúrufræðingurinn er félagsrit  
Hins íslenska náttúrufræðifélags og  
tímarit Náttúruminjasafns Íslands.  
Að jafnaði eru gefin út fjögur hefti á ári.*

RITSTJÓRI  
*Margrét Rósa Jochumsdóttir*  
ritstjori@hin.is

RITSTJÓRN  
*Sveinn Kári Valdimarsson líffræðingur  
Guðrún Óskarsdóttir gróðurvistfræðingur  
Ragnhildur Guðmundsdóttir líffræðingur  
Rikey Júlíusdóttir jarðfræðingur  
Sindri Gíslason sjávarlíffræðingur  
Tómas Grétar Gunnarsson dýravistfræðingur  
Þóroddur F. Þóroddsson jarðfræðingur*

PRÓFÖRK  
*Mörður Árnason íslenskufraeðingur*

FORMAÐUR HINS ÍSLENSKA  
NÁTTÚRUFRAEÐIFÉLAGS  
*Lísa Anne Libungan*

ÚTLIT OG UMBROT  
*Margrét Rósa Jochumsdóttir*

FORSÍÐUMYND  
*Múlaþökull í Hofsjökli, 2025*  
*Andri Gunnarsson*

PRENTUN  
*Prentmet Oddi*

ISSN 0028-0550

© NÁTTÚRUFRAEÐINGURINN 2025

ÚTGEFENDUR  
*Hið íslenska náttúrufræðifélag  
og Náttúruminjasafn Íslands*



# Náttúran og nútíminn — okkar vegferð



Það er mér sannur heiður að hafa tekið við formennsku í Hinu íslenska náttúrufræðifélagi, félagi sem hefur verið hornsteinn í sögu íslenskra náttúruvísinda allt frá stofnun árið 1889. Í 136 ár hefur félagið miðlað þekkingu um íslenska náttúru og nú er komið að okkur að efla þetta mikilvæga hlutverk með nýrri sýn, skýrari áherslum og markvissari tengingu við samtímann. Hlutverk félagsins hefur alla tíð verið skýrt: Að efla íslenska náttúrufræði og auka skilning almennings á náttúrunni. Það er ekki aðeins fræðilegt verkefni heldur samfélagslegt ábyrgðarhlutverk, því þekking er forsenda verndar og lykill að því að við tökum upplýstar ákvarðanir um framtíðina.

Það eru forréttindi að starfa við náttúruvísindi. Náttúruvísindin hafa kennt mér að meta fegurð og flókið samspil lífsins, allt frá örsmáum lífverum til stærstu vistkerfa jarðar. Í starfi mínu sem sjávarlíffræðingur síðustu tvo áratugina hef ég séð hve viðkvæmt og dýrmætt þetta jafnvægi er. Framundan er þó mikilvægt verkefni: Að hvetja fleiri til náms í náttúruvísindum. Því áskoranir framtíðarinnar eru margar og sjálfbær samfélagsuppbygging krefst djúps skilnings á náttúru og vistkerfum. Í stafrænum heimi þar sem samkeppni um athygli er mikil þurfum við jafnframt að finna nýjar og skapandi leiðir til að ná til ungs fólks og kveikja áhuga þess á náttúrunni og vísindunum.

Ísland er lifandi rannsóknarstofa þar sem jarðhræringar, eldvirkni og loftslagsbreytingar minna á að náttúran er sibreytileg og óaðskiljanlegur hluti lífs okkar. Eldgosin á Reykjanesskaga, umræða um sjálfbæra orkunýtingu og brýnar áskoranir í náttúruvernd undirstrika mikilvægi vísindalegrar þekkingar og upplýstrar umræðu. Þótt tegundafjöldi á Íslandi sé lítill er sérstaða vistkerfa landsins mikil og krefst vandaðrar verndar og ábyrgar nýtingar.

HÍN hyggst bregðast við þessum áskorunum með öflugri fræðslu, auknum sýnileika og tengslum við atvinnulífið og ferðaþjónustuna. Má fyrst nefna samstarf okkar við Útivist, sem hefur gefið af

sér fjölda skemmtilegra og fræðandi gönguferða. Í þessum ferðum leiða félagsmenn HÍN gönguna og miðla dýrmætri þekkingu sinni á vettvangi. Þar gefst ferðalöngunum því tækifæri til að kynna náttúru- fyrirbærum landsins af eigin raun. Jafnframt hyggst félagið efla fræðslu í skólum og styrkja miðlun á samfélagsmiðlunum með fjölbreyttu efni og ná til breiðari hóps en áður.

Mikilvægur hluti af starfsemi félagsins er útgáfa Náttúrufræðingsins í samstarfi við Náttúruminjasafn Íslands. Tímaritið er einstakt á Íslandi, eina ritrýnda tímaritið sem fjallar um náttúrufræði á íslensku, og er vettvangur allra náttúrufræðigreinnanna. Það gegnir lykilhlutverki við að varðveita þekkingu, miðla henni og efla. Með því að gera efnið enn aðgengilegra og höfða einnig til ungs fólks getum við tryggt að tímaritið haldi áfram að vera leiðarljós í íslensku fræðasamfélagi.

Að lokum er vert að minnast á hið góða samstarf okkar við Náttúruminjasafn Íslands. Með tilkomu Náttúruháskólans í Nesi fær safnið loksins aðstöðu sem hæfir hlutverki þess sem höfuðsafn þjóðarinnar í náttúrufræðum. Sýningin þeirra um líffræðilega fjölbreytni hafsins verður einstök fræðslu- og menningarviðbót og á eftir að efla skilning almennings á mikilvægi hafsins fyrir líf okkar allra.

Við stöndum á tímamótum. Ef okkur á að takast að vernda náttúruna og tryggja sjálfbæra framtíð þurfum við að sameinast um að efla þekkingu og kveikja áhuga næstu kynslóða. Ég hvet ykkur, kærur félagsmenn, til að kynna starf HÍN fyrir öðrum, vekja áhuga á Náttúrufræðingnum, senda inn greinar um rannsóknir ykkar og hvetja fleiri til að skrá sig í félagið. Brýnt verkefni framundan hjá stjórn HÍN er að fjölga félagsmönnum, því virk þátttaka okkar er lykill að öflugri og lifandi félagi. Við erum sterkust þegar við stöndum saman.

Ég hlakka til að taka þátt í þessari vegferð með ykkur.

**Lísanna Libungan**

formaður Hins íslenska náttúrufræðifélags

# Íslenskir jöklar



Andri Gunnarsson  
Hrafnhildur Hannesdóttir  
Finnur Pálsson  
Tómas Jóhannesson  
Eyjólfur Magnússon  
Þorsteinn Þorsteinsson  
Bergur Einarsson  
Guðfinna Aðalgeirsdóttir  
Joaquín M.-C. Belart  
Oddur Sigurðsson  
Snævarr Guðmundsson  
Helgi Björnsson

Jöklar Íslands eru mótandi afl í loftslagi, landslagi, vatnafari, eldvirkni og menningu landsins. Þeir breytast hratt í hlýnandi loftslagi og hafa víðtæk áhrif á vatnafar, orkukerfi, vistkerfi og ferðaþjónustu. Í þessari grein er dregin saman þekking á myndun jökla, hreyfingu og afkomu, og lýst samspili þeirra við eldgos, jarðhita og jökulhlaup. Raktar eru helstu rannsóknaraðferðir, frá vettvangsmælingum til fjarkönnunar, og hvernig þær varpa ljósi á þróun jökla frá lokum litlu ísaldar til samtímans. Einnig er fjallað um þau áhrif sem rýrnun jöklanna hefur á landslag, innviði og samfélag, sem og hina menningarlegu þýðingu þeirra en alls eru nafnkunnir jöklar um 400 talsins. Loks er horft til framtíðar og hugað að niðurstöðum líkanreikninga sem undirstrika mikilvægi aðlögunar og ábyrgrar nýtingar vatnsauðlinda í síbreytilegu umhverfi.

## JÖKLAR Á ÍSLANDI

Jöklar eru mikilvægir við mótun loftslags á jörðinni og þar er ferskvatnsforði sem milljarðar manna reiða sig á. Vegna loftslagsbreytinga rýrna jöklar hratt um allan heim og er Ísland þar engin undantekning. Sameinuðu þjóðirnar hafa skilgreint árið 2025 sem alþjóðaár jökla<sup>1</sup> til þess að auka vitund um mikilvægi jökla, snjós og íss í vatnafræðilegu og veðurfarslegu samhengi, og ekki síður í efnahagslegu, samfélagslegu og umhverfislegu tilliti. Í greininni er lýst stöðu þekkingar á jökum landsins og vísað í greinar og bókarkafla fyrir áhugasama lesendur.

Ísland liggur í Norður-Atlantshafi, rétt sunnan heimskautsbaugs, umlukið hafstraumum sem móta loftslagið. Norðan við landið hefur kaldur Austur-Grænlandsstraumurinn áhrif og flytur með sér hafís og svalt loft frá Norður-Íshafi. Þetta hefur áhrif á ríkjandi brautir lægða um Atlantshafið úr suðri og vestri, sem flytja hlýtt og rakt loft til landsins. Milt úthafsloftslag veldur því að vetur eru mildir miðað við legu landsins á hnettinum en sumur tiltölulega svöl. Árstíðasveiflur hita eru fremur litlar. Á Íslandi er úrkoma mikil, sem ásamt lágu hitastigi og hálendi valda því að jöklar geta myndast. Hinir stærstu þeirra eru á suðurhluta landsins, þar sem ríkjandi úrkomaáttir koma að. Til fjalla safnast úrkoman sem snjór að vetri til en á hábungum stærstu jökla landsins fellur úrkoma undir eða nærri frostmarki allt árið.

Jöklar ísaldar hafa mótað landið og hafsbótinn í kringum það með rofi og setmyndun.<sup>2,3</sup> Þeir rjúfa undirlagið og mynda U-laga dali, skálarlaga hvilftir, hvassa tinda og þrönga firði. Jöklar og jökulvötn móta

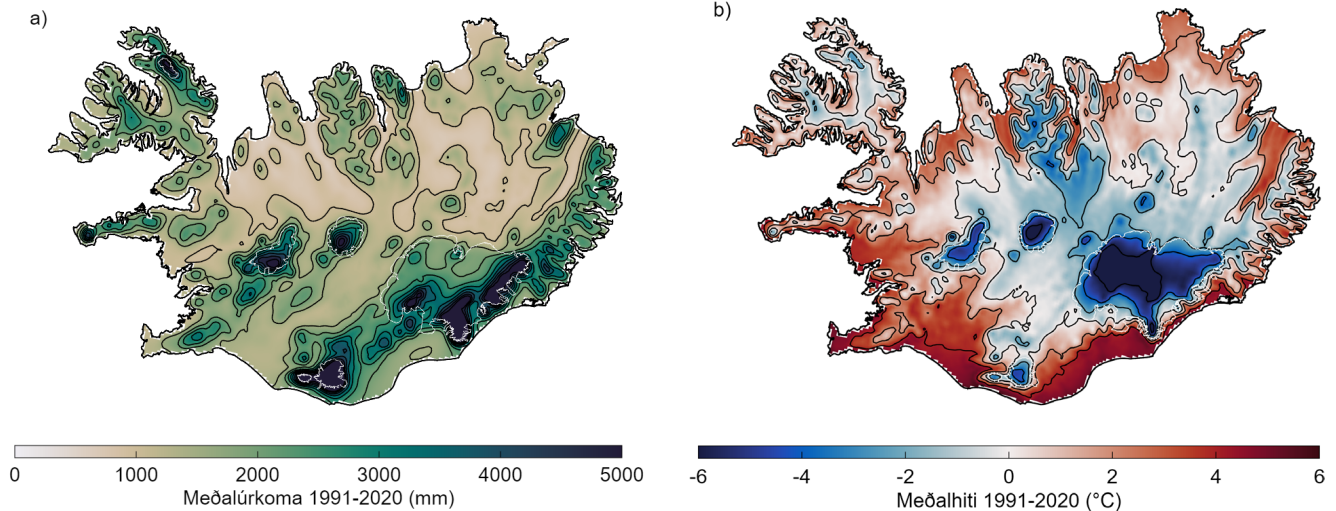
undirlagið með margvíslegum hætti. Sjálfur ísinn er of mjúkur til þess að sverfa harðan berggrunn en til þess nýtir jökullinn set sem hann ber með sér við botninn. Við þetta verður til laust efni sem kallast jökulruðningur. Það berst fram með jöklinum, ýmist undir jökulísnum, í honum eða ofan á, og hleðst að lokum upp í jökulgarða til hliðar eða framan við sporðinn.<sup>4-6</sup>

Frjósömustu landbúnaðarsvæði landsins eru á Suður- og Vesturlandi. Þau eru grundvölluð á jökulruðningi og jökulárseti frá síðjökultíma og fyrri hluta nútíma. Rof af völdum jökuláa og framburður þeirra er mjög áberandi á Íslandi, þar sem jökulfljót vaxa á sumrin og flytja mikið af seti til láglandis og sjávar. Setið fellur út þegar árnar breiða úr sér og myndar víðáttumikla sanda og óseyrar, sem geta haft veruleg áhrif á strandlínu, lífríki og næringarefni fyrir vistkerfi á landi og í sjó. Við hörfun jökla hafa víða myndast jökullón, sem hafa áhrif á setflutning jökulánna.

Jöklar hylja tæplega tíund lands á Íslandi. Þar eru mörg af virkustu eldfjöllum og jarðhitasvæðum landsins, og þar verða til jökullón. Eitt þekktasta dæmi um þetta eru Grímsvötn í miðjum Vatnajökli, þar sem öflugt jarðhitasvæði bræðir ís og safnar vatni í stórt lón undir jöklinum. Þegar þrýstingurinn í lóninu verður nægur brýst vatnið fram í gríðaröflugum jökulhlaupum, sem eru meðal stærstu flóða í heiminum.

Afrennsli frá jökum gegnir lykilhlutverki í raforkuframleiðslu og miðlun vatns í uppistöðulónum á Íslandi. Raforkukerfi landsins byggist að miklu leyti á vatnsafl og skilar það um þremur fjórðu árlegrar raforkuframleiðslu.<sup>7</sup> Langtímaspár gera ráð fyrir

1. mynd. Meðaltal hita og úrkomu á Ísland samkvæmt Copernicus Arctic Regional Reanalysis-endurgreiningu (CARRA) fyrir tímabilið 1991–2020. Útlínur jökla eru sýndar með hvítum lit. – Mean temperature and precipitation for Iceland from the Copernicus Arctic Regional Reanalysis (CARRA) for the period 1991–2020. Glacier outlines are shown in white.



a) Meðalársúrkoma á Íslandi á tímabilinu. Kortið sýnir vel að mesta úrkomu á Íslandi er að finna á jöklum meðfram suðurströnd landsins og á meginjöklum á hálandinu. – Average annual precipitation in Iceland for the period. The map clearly highlights that the greatest precipitation in Iceland is found on the glaciers along the south coast and on the major glaciers in the highlands.

auknu rennsli til vatnsaflsvirkjana sökum aukinnar bráðnunar jökla í hlýnandi loftslagi. Breytingar á rennslismynstri, svo sem árstíðabundnar breytingar á magni og tímasetningu jökulleysingar, skipta miklu máli við stjórnun vatnsauðlinda og kalla á aðlögun að loftslagsbreytingum.<sup>8</sup> Þessar breytingar geta einnig haft áhrif á lífríki, framvindu gróðurs og vatnsgæði.

Ný jökullón hafa víða myndast við jökuljaðra, önnur hafa horfið og árfarvegir hafa víða fundið sér nýja leið. Með hækkandi hita, hopi jökulsporða og bráðnandi sífrera verða skriður tíðari og grjóthrun meira í bröttum fjallshlíðum sem áður nutu aðhalds frá skriðjöklum.

Jöklaferðamennska stendur einnig frammi fyrir vaxandi áskorunum vegna hraðrar hörfunar og rýrnunar jökla, og meðfylgjandi breytinga í landslagi.<sup>9</sup> Ferðapjónustuaðilar þurfa að takast á við aukna óvissu, breyttar öryggiskröfur og stöðuga endurskoðun á leiðarvali og innviðum til þess að tryggja góða og örugga upplifun gestanna.<sup>10</sup>

Sambúð Íslendinga og jökla hefur verið bæði gjöfufull og krefjandi. Jökulár hafa torveldað samgöngur en jafnframt mótað landslag og gefið fólki færi á að upplifa óviðjafnanlega náttúruferð. Vatnajökull, stærsti jökull landsins, er nú hluti af stærsta þjóðgarði Evrópu, þar sem sérstaða hans og feður eru varðveitt sem sameiginlegur arfur mannkyns.<sup>11</sup>

Í íslenskum skáldskap birtast jökla ymist sem ógn eða yfirþyrmandi feður, og endurspeglar þetta vel ímynd þeirra í lífi þjóðarinnar. Þessi nána tenging er ofin inn í þjóðarsálina, þar sem jökla eru ták náttúruafla sem bæði næra og ógna.<sup>12,13</sup> Heiti íslenskra jökla endurspeglar oft sérstöðu þeirra í landslagi og menningu. Þau hafa verið tekin saman og skráð

b) Meðalárshiti á Íslandi á tímabilinu. Kortið sýnir með skýrum hætti samband mikillar úrkomu og meðallofthita undir frostmarki þar sem jökla er að finna. – Average annual temperature in Iceland for the period. The map clearly shows the relationship between high precipitation and mean air temperatures below freezing in the areas where glaciers are found.

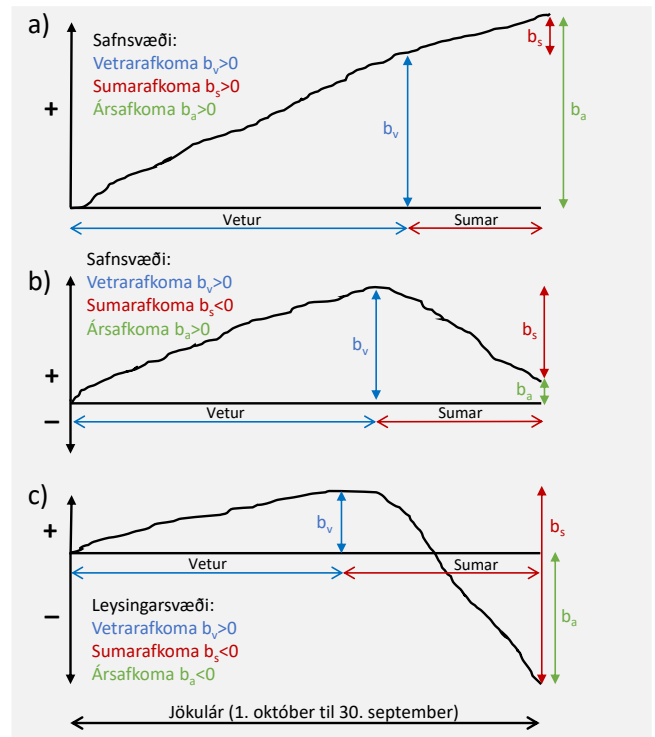
í yfirlit sem varðveitir bæði náttúrufræðilega og menningarlega arfleifð þeirra.<sup>14,15</sup> Framtíðarbreytingar á jöklum hafa áhrif á alla sem búa nærri þeim, njóta þeirra, ferðast um þá og rannsaka þá.

## LOFTSLAG, LANDSLAG OG JÖKLAR

Jökull er massi af snjó, hjarni og ís sem ekki tekur upp áratugum eða öldum saman og hnígur undan eigin þunga. Til þess að jökull myndist þarf að jafnaði meiri snjór að safnast fyrir árlega á tilteknu svæði en nemur því magni sem leysist (bráðnar) og myndar afrennsli. Jökla á Íslandi eru þíðjökla (e. temperate glaciers) þar sem allt vetrarfrost er horfið fyrir lok sumars. Bræðsluvatn hripar niður í snjó og hjarn og frýs, sem losar dulvarma og hitar upp jökulinn. Þegar enginn snjór eða hjarn er eftir til að hita, verður til afrennsli. Í svonefndum gaddjöklum (e. cold-based glaciers, polythermal glaciers), þar sem leysing er minni, helst frost í snjónum og ferðast neðar í jökulinn ár hvert. Slíkir jökla eru á heimskautasvæðum, svo sem á Grænlandi og Suðurskautslandinu. Margir þeirra eru frosnir við undirlagið og renna því ekki eftir því. Miklu skiptir fyrir skrið jökla og rof þeirra hvort þeir eru þíðir eða frosnir við botn. Gaddjökla finnast almennt ekki á Íslandi.

Úrkoma á föstu formi eykst jafnan með hæð yfir sjó, t.d. sem snjór og él, en orka til leysingar verður meiri eftir því sem neðar dregur. Jökla myndast því fyrst á hæðum og fjöllum, en skriða síðan fram og niður hlíðar þar sem leysing eykst. Ef veðurfar er stöðugt yfir langan tíma nær jökullinn jafnvægislögun miðað við þær aðstæður sem ráðast af landslagi, loftslagi og eðliseiginleikum íss. Jafnmikill massi í

2. mynd. Massabreyting á heilu jökulári (1. október til 30. september) á þremur svæðum á jökli: a) Ofarlega á safnsvæði bætist stöðugt á jökulinn að vetri. Þar leysir nokkuð að sumri en vegna snjókomu að sumarlagi getur massaaukning einnig átt sér stað. b) Á mestum hluta safnsvæðis bætist massi við að vetri ( $b_v$ ) og tapast vegna leysingar að sumri ( $b_s$ ), en heildarniðurstaðan yfir árið er massaviðbót ( $b_a$ ). c) Á leysingarsvæði er massatap að sumri umfram viðbót að vetri og niðurstaðan er tap. Lengd vetrar- og sumartímabils er höfð breytileg milli myndanna þriggja, enda sýna þær þróun jökulafkomu í mismunandi hæð. – The figure shows mass change over a full glacial year (1 Oct to 30 Sept) in three zones on a glacier: a) In the upper accumulation area, mass is continuously added to the glacier during winter. Some melt occurs in summer, but due to summer snowfall, mass gain can also occur during summer. b) Over most of the accumulation area, mass is added in winter ( $b_w$ ) and lost due to melt in summer ( $b_s$ ), but the annual balance ( $b_a$ ) is positive. c) In the ablation area, summer melt exceeds winter accumulation, resulting in an overall annual mass loss. The relative length of winter and summer periods is variable on the three figures, since they display the development of glacier mass balance at different elevations.



föstu formi safnast fyrir árlega á safnsvæði og leysir neðar á leysingarsvæðinu. Þar sem jöklar vaxa á nokkrum nálægum hæðum og fjallstindum getur farið svo að ísinn skriði niður fjallshlíðar, nái saman og þykkni, þannig að smám saman myndast jökulhvel í stað stakra smærri jökla. Stærstu jöklar landsins, Vatnajökull, Langjökull, Hofsjökull og Mýrdalsjökull, hafa myndast út frá minni jöklum sem hafa skriðið saman.<sup>16</sup>

Eldvirkni hefur byggt upp megineldstöðvar og fjalllendi á suðurströnd landsins. Þar er mikil úrkoma sem berst með lægðum úr suðri, og hiti að vetri er nægjanlega lágur til þess að mestur hluti úrkomu fellur sem snjór. Þar raðast upp frá vestri til austurs Eyjafjallajökull, Mýrdalsjökull, Vatnajökull, Hofsjökull eystri og Þrándarjökull. Aðrir helstu jöklar landsins, meðal annars Langjökull, Hofsjökull og Snæfellsjökull, hafa byggst upp á fjalllendi eldstöðva, en Drangajökull á Ströndum stendur á fornu rofnu hálendi og nýtur úrkomu úr norðaustlægum áttum. Mesta árlega úrkoma á Íslandi fellur til á hásléttu Mýrdalsjökuls (~1350 m y.s.) og Öraefajökuls (~1820 m y.s.), að stærstum hluta að vetri þar sem vetrarsnjólagið getur orðið allt að 12–15 m að þykkt (6–7,5 m vatns)<sup>17–20</sup> (1. mynd).

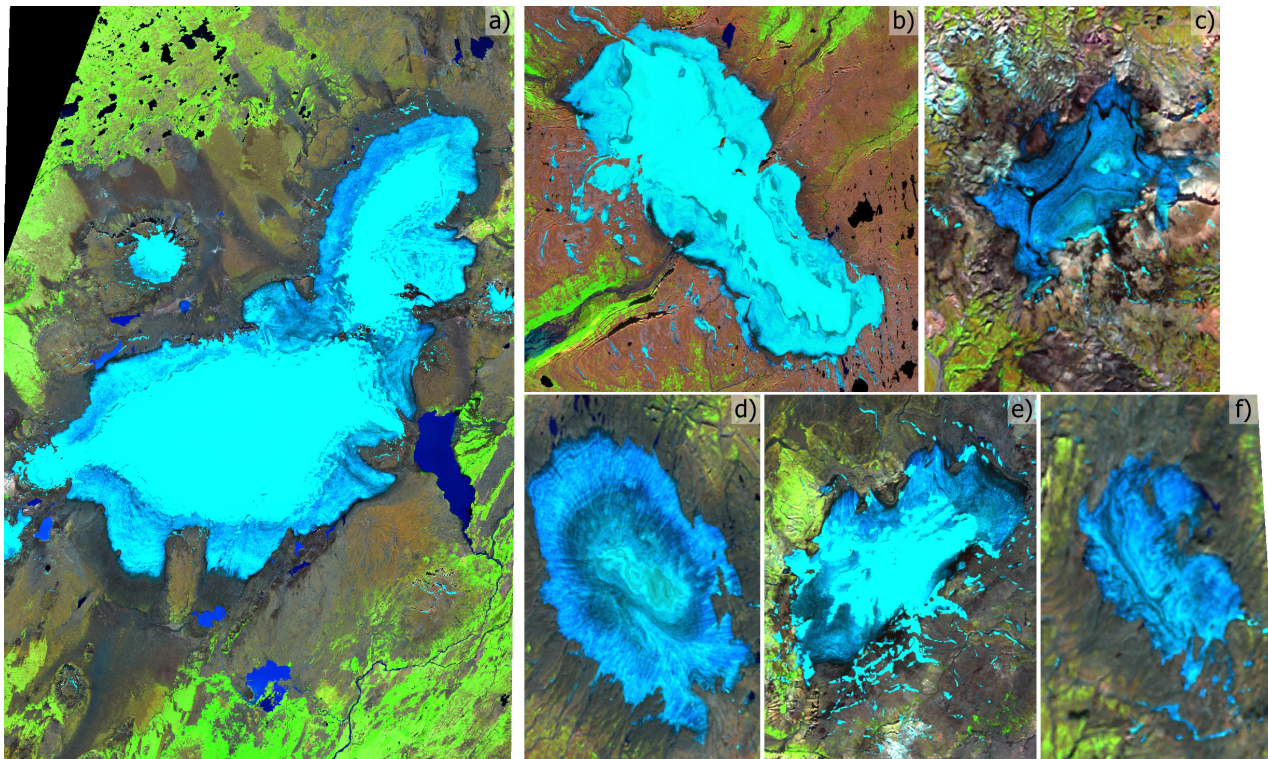
Norðan stóru jöklanna myndast úrkomuskuggi, þar sem loftið úr suðlægum áttum hefur skilað rakanum sem úrkomu á jökla og hálendi og er orðið þurrt. Hér á landi er úrkoma úr norðlægum áttum allajafna mun minni en í hinum suðlægum. Minnst er ársúrskoma norðan Vatnajökuls, aðeins 400–700 mm, en meðalársúrskoma á Íslandi er um 1.500

mm.<sup>21</sup> Mörg svæði norðan Vatnajökuls og austan Herðubreiðar teljast til stærstu „eyðimerkursvæða“ Evrópu, og einkennast af gróðursnaudum víðáttum og berum söndum, sem eru uppsprettur sandfoks og rykstorma.<sup>22,23</sup> Inn til landsins, á Hofsjökli, Langjökli og norðanverðum Vatnajökli, nær meðalársúrskoma allt að 3,5 m vatns. Á hábungum stærstu jöklanna er meðalhiti allt árið undir frostmarki eða við frostmark, og mest af úrkomunni fellur sem snjór (1. mynd). Ofan við hjarnmörk í 1.100–1.300 m hæð leysir snjó ekki með öllu að sumri og þaðan skriður því ís niður á jökulsporðana.

Leysingartímabil jökla hefst þegar sól hækkar á lofti, daginn lengir og það hlýnar í veðri, þá taka jökulár að bólgnu. Mestur hluti leysingar er að sumri en oft er veruleg vetrarleysing á jökulsporðum sem ná niður fyrir um 400 m yfir sjávarmál. Þetta á við um skriðjökla á suðaustanverðum Vatnajökli, um Breiðamerkurjökul, Skeiðarárjökul og sporða Mýrdalsjökuls og Eyjafjallajökuls.

## AFKOMA JÖKLA

Árleg afkoma jökuls er skilgreind sem breyting massa hans á einu ári, frá hausti til hausts innan hins svokallaða jökulárs (2. mynd). Breytingu massans má reikna sem mismun massasöfnunar að vetri (vetrarafkoma) og massataps að sumri (sumarafkoma) Árleg afkoma rýrnandi jökuls er að jafnaði neikvæð, meiri massi tapast þá að sumri en við bættist veturinn á undan. Í tilfalli stækkandi jökuls er þessu öfugt farið. Rýrnandi jökull minnkar ár frá ári að rúmmáli



3. mynd. Myndir teknar í ágúst 2025 af völdum jöklum með Copernicus Sentinel-2-gervihnetti. Myndirnar eru settar fram með innrauðum böndum sem ýkja skil íss og snjós og má því vel greina skilin milli safnsvæðis og leysingarsvæðis. Vetrarsnjór hefur ljósa liti en jökulís dekkri bláa liti. Þar hefur allur vetrarsnjórinn bráðnað og jökulísinn undir er kominn í ljós. Neðri mörk snjósins ákvarða snælinu. a) Langjökull 20. ágúst 2025. Heildarflatarmál jökulsins er um 820 km<sup>2</sup> en við myndatökuna var svæði ofan snælinu um 377 km<sup>2</sup>. Það gefur hlutfallstölu safnsvæðis næri 46%, sem staðfestir massaöjfnvægi jökulsins við núverandi loftslag. b) Drangajökull undir lok ágúst. Safnsvæðið er næri 56 km<sup>2</sup> en heildarflatarmál um 136 km<sup>2</sup>, hlutfallstalan 41%. c) Torfajökull. Hefur tapað öllu safnsvæði sínu. d) Þrándarjökull. Hefur tapað öllu safnsvæði sínu. e) Tungnafellsjökull. Heldur hluta af safnsvæði sínu ennþá, um 9 km<sup>2</sup>, en heildarflatarmál var næri 32 km<sup>2</sup>. f) Hofsjökull eystri. Hefur tapað öllu safnsvæði sínu. – Satellite images taken in August 2025 of selected glaciers using the Copernicus Sentinel-2 satellite. The images are presented using short wave infrared bands to enhance the contrast between ice and snow, making the boundary between the accumulation zone and the ablation zone clearly visible. Winter snow appears in light colors, while glacier ice appears in darker blue tones. Where all the winter snow has melted, the underlying glacier ice is exposed. The lower limit of the snowpack defines the snowline. a) Langjökull on 20 August 2025. The total area of the glacier is about 820 km<sup>2</sup>, but when the image was taken, the area above the snowline was about 377 km<sup>2</sup>. This gives an accumulation-area ratio of nearly 46%, confirming the glacier's mass imbalance under the current climate. b) Drangajökull at the end of August: the accumulation area is roughly 56 km<sup>2</sup>, while the total area is about 136 km<sup>2</sup>, a 41% ratio. c) Torfajökull has lost all of its accumulation area. d) Þrándarjökull has lost all of its accumulation area. e) Tungnafellsjökull retains part of its accumulation area, about 9 km<sup>2</sup>, while its total area was close to 32 km<sup>2</sup>. f) Hofsjökull eystri has lost all of its accumulation area.

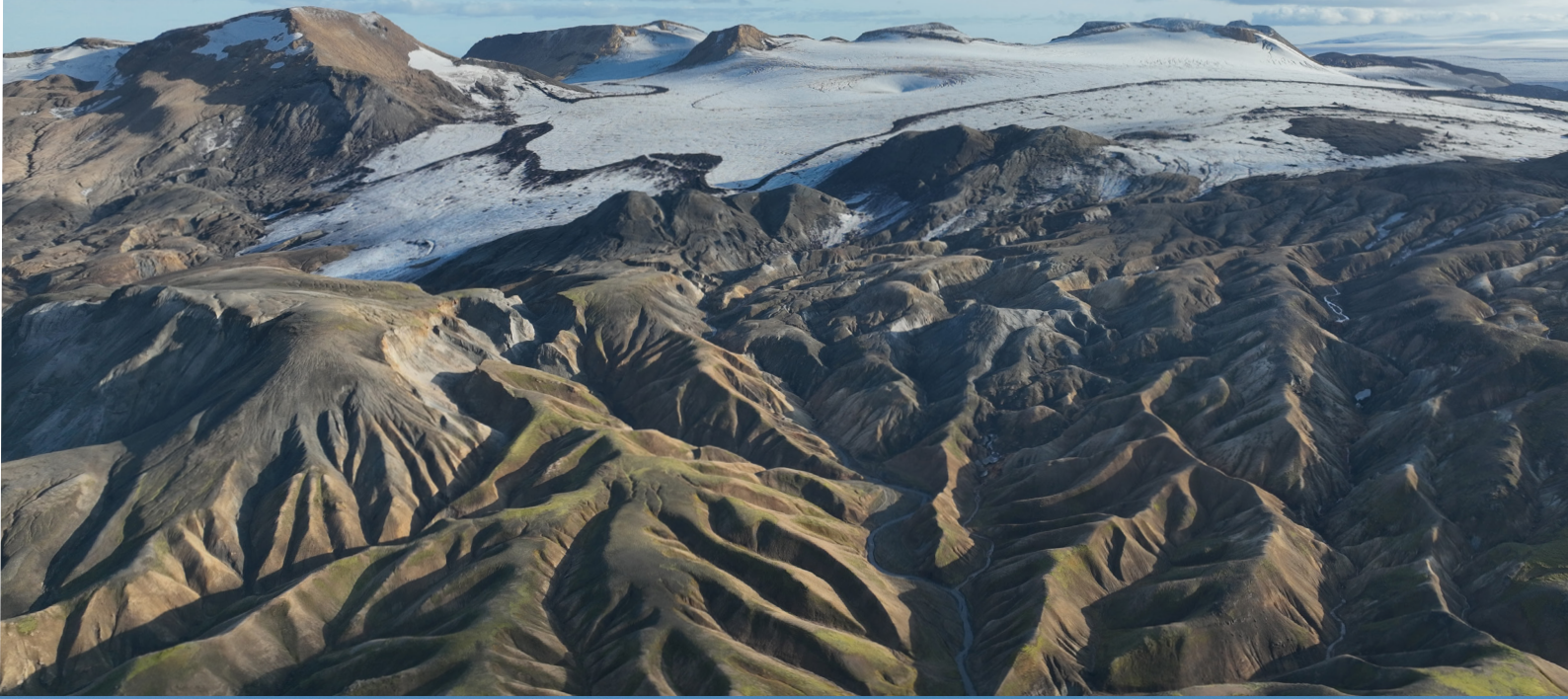
og flatarmáli, en einkenni vaxandi jökuls er að jafnaði aukið rúmmál og vaxandi flatarmál. Afkoma jökla ræðst fyrst og fremst af veðurfari og haldist það stöðugt lengi nær jökullinn ákveðinni lögun þannig að hann stækkar hvorki né minnkar, og er þá sagður í jafnvægi.

Greint er á milli tveggja meginsvæða á yfirborði jökuls: Safnsvæðis á efri hluta jökulsins og leysingarsvæðis á neðri hlutanum (3. mynd). Á safnsvæðinu bráðnar aðeins hluti vetrarsnjósins yfir sumarið og til verða snjófyrringar sem bætast við massa jökulsins. Á leysingarsvæðinu bráðnar allur vetrarsnjórinn og þar að auki bæði hjarn og jökulís. Á mörkum þessara tveggja svæða er svokölluð jafnvægislína. Þar bráðnar jafnmikið að sumri og á bættist að vetri, og er afkoman því núll. Hæð jafnvægislínunnar er ein af helstu kennistærðum jökla. Hún hækkar í hlýnandi loftslagi en lækkar í kólnandi loftslagi. Til þess að jökull hér á landi haldist næri jafnvægi – þ.e. afkoman sé næri núlli og lögun haldist nær óbreytt frá ári til árs yfir lengra tímabil – þarf safnsvæðið að ná yfir um 50–60% af flatarmáli jökulsins. Þetta hlutfall eða stíki er nefnt

hlutfallstala safnsvæðis (e. accumulation area ratio, AAR). Margir litlir jöklar hér á landi hafa nú tapað safnsvæði sínu algerlega og eiga sér ekki viðreisnar von nema loftslag kólni verulega. Þeirra á meðal eru Torfajökull, Þrándarjökull og Hofsjökull eystri. Þeir eru ekki afkomumældir að staðaldri en mat á hlutfallstölu safnsvæðis sýnir skýrt hvert stefnir (3. mynd). Hlutfallstala safnsvæðis fyrir stærri jökla landsins er einnig undir viðmiði fyrir jafnvægi.

Safnsvæði jökla er þakið vetrarsnjó og milli snjósins og íssins er hjarnlagið, sem mest getur náð um 40 m þykkt héraendis. Hjarnið er snjó sem lifað hefur af leysingu fyrsta sumars og er smám saman að þjappast og ummyndast í jökulís. Á leysingarsvæðum er jökulís hulinn vetrarsnjó fram á sumarið en þá leysir hann og leysing jökulíss tekur við.

Afkoma þriggja stærstu jökla landsins er nú mæld árlega í afkomuferðum sem farnar eru að vori og hausti. Mælingar hófust á Hofsjökli jökulárið 1987–88, á Vatnajökli 1991–92 og Langjökli 1996–97. Þessir jöklar ná yfir meira en 90% af jökulhuldu landi.<sup>18,19</sup> Auk þess hefur afkoma verið mæld á Mýrdalsjökli, Drangajökli, Þrándarjökli, Eyjafjallajökli og smærri

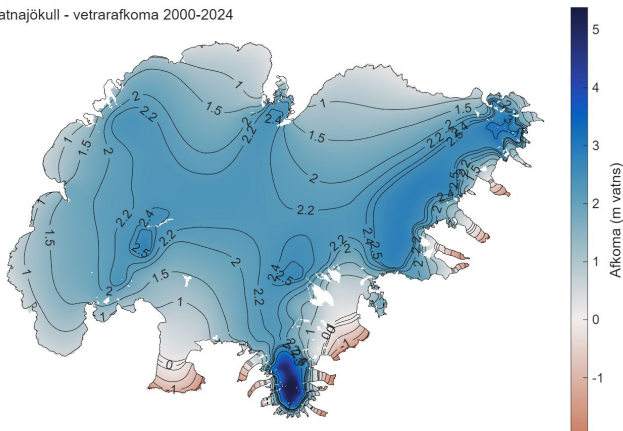


Pursinn í Pursaborg á Langjökli nær og Eiríksjökull fjær, 2024.  
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson



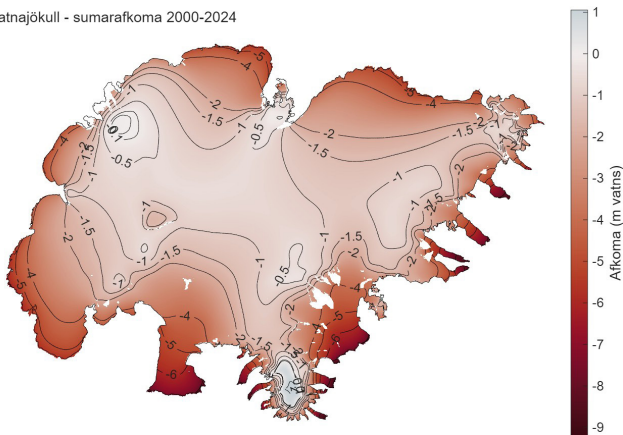
4. mynd. Meðalafkoma Vatnajökuls á tímabilinu 2000–2020. Byggt á afkomu-mælingum. – Average mass balance of Vatnajökull for the period 2000–2020, based on mass-balance measurements.

Vatnajökull - vetrarafkoma 2000-2024



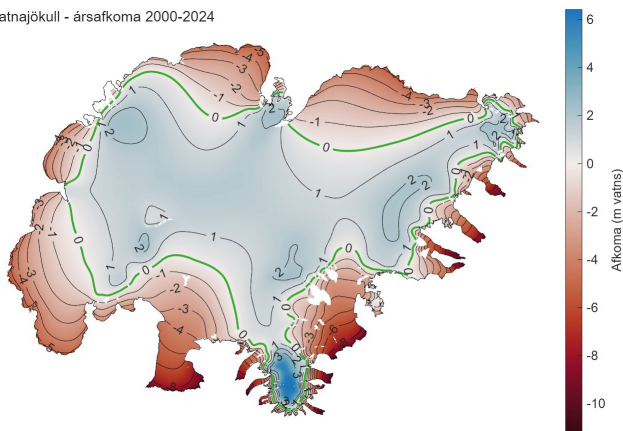
a) Vetrarafkoma fyrir allan jökulinn er 1,65 m vatns á tímabilinu. Vetrarafkoma eykst almennt með hæð og minnkar með hækkandi breiddargráðu. Á sporðum við suðurströndina má sjá neikvæða afkomu yfir veturinn. – Winter mass balance for the glacier is 1.65 m water equivalent for the period. In general, winter mass balance increases with elevation and decreases with increasing latitude. Negative winter balance can be seen at the glacier termini along the south coast.

Vatnajökull - sumarafkoma 2000-2024



b) Sumarafkoma Vatnajökuls á tímabilinu er -2,38 m vatns. Meiri leysing á sér yfirleitt stað við suðurströndina og greina má jákvæða afkomu á Örfæjökli. – The summer mass balance of Vatnajökull for the period is -2.38 m water equivalent. More melt occurs along the south coast overall, and a positive summer balance can be identified on Örfæjökull.

Vatnajökull - ársafkoma 2000-2024



c) Ársafkoma á tímabilinu er -0,73 m vatns. Græn lína sýnir meðaljafnvægislínu jökulsins, þar sem vetrarafkoma er jöfn sumarafkomu. – The annual mass balance for the period is -0.73 m water equivalent. The green line shows the average equilibrium line of the glacier, where winter balance equals summer balance.

jöklum á Tröllaskaga og víðar, þó ekki með samfelldum hætti. Lengsta mæliröð afkomu er frá Grímsvötnum í Vatnajökli. Þar hefur vetrarafkoma verið mæld árlega frá 1951 í vorferðum Jökjarannsóknafélags Íslands.<sup>24</sup>

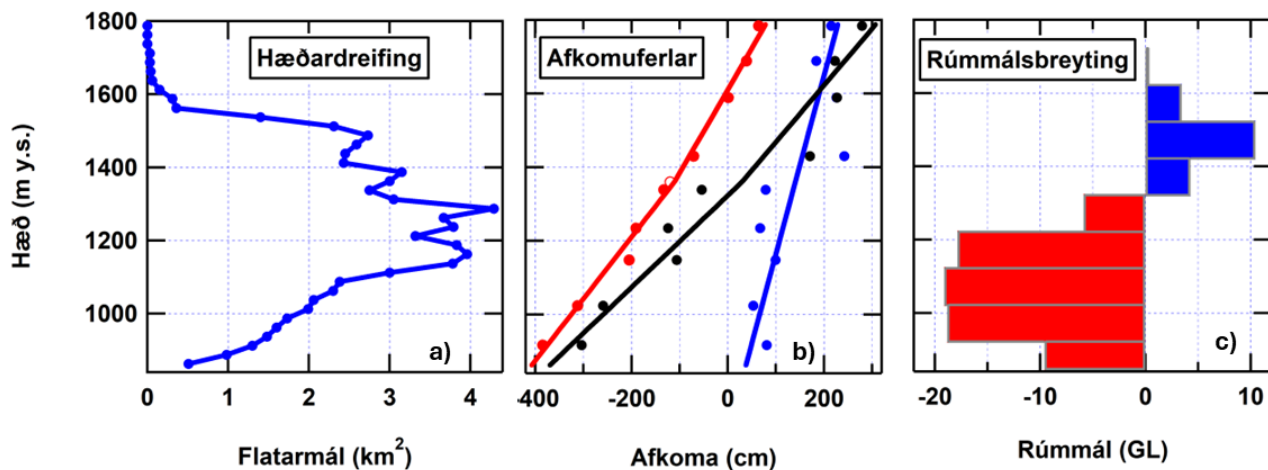
Þessar beinu mælingar yfirborðsafkomu eru kallaðar stikumælingar. Þar er þykkt vetrarsnjós mæld að vori og sumarleysing að hausti, á völdum stöðum. Mismunur þessarra mælinga er ársafkoma fyrir hvern stað. Afkomuferðir eru oftast stórir leiðangrar þar sem bæði þarf sérhæfðan mannskap og tæki til að ferðast um jökulinn með öruggum hætti. Vegna umfangs verður að takmarka fjölda mælipunkta við nokkra tugi, og velja þeim örugga staði fjarri sprungusvæðum og með nokkuð jafnri dreifingu eftir hæð til að þeir endurspegli afkomu jökulsins alls.

Mælingarnar sýna að þykkt vetrarsnjós á hinum stóru jöklum miðhálandisins er 3–4 m, 4–8 m efst á safnsvæðum en oft 0–1 m neðst á jökulsporðum. Vatnsgildi vetrarafkomu er oft um 1–2 m, þegar því er jafndreift yfir allt flatarmál jökuls. Ákefð úrkomu og lega lægðarbrauta hefur mikið að segja um hversu mikill snjór safnast að vetri og hversu mikið af úrkomu fellur sem snjór eða regn. Mest er leysingin á jökulsporðum nærri sjávarmáli. Þar getur sumarleysing náð 10 m og að vetri leysir oft 1–2 m til viðbótar. Þetta á til dæmis við um Sólheimajökul og Breiðamerkurjökul. Á svæðum ofan ~1700 m hæðar getur sumarafkoma hins vegar verið jákvæð, svo sem á hábungu Hofsjökuls, á Örfæjökli og á Bárðarbungu.

Með stikumælingum er einungis unnt að meta yfirborðsafkomu en jöklar tapa einnig massa vegna innri ferla, svo sem vegna jarðhita við botn, við kelfingu í jökullón, vegna innri núnings og við losun stöðuorku rennandi vatns. Innri leysingu og leysingu af völdum núnings við jökulbotn var lítill gaumur gefinn af jöklafræðingum þar til á síðustu árum.<sup>25–27</sup> Fyrir bratta jökla á úrkomsöllum svæðum getur innri leysing skipt verulegu máli, og jafnvel verið um og yfir 1 m vatnsgildis á ári. Fyrir jökla sem kelfa í lón eða sjó fram getur þáttur kelfingar í afkomu verið mjög stór. Kelfing í Jökulsárlón (jökulís brotnar af, fer út í lónið og bráðnar) er til dæmis stór þáttur í afkomu Breiðamerkurjökuls. Hér á landi er jarðhitinn þó veigamestur þessarra þátta, einkum þar sem jökull þekur jarðhitasvæði. Rýrnun vegna ofangreindra þátta hefur verið metin 5–6 cm vatns árlega á Hofsjökli og Langjökli og nær 20 cm vatns á Vatnajökli, og er líklega enn meiri á Mýrdalsjökli.<sup>28</sup> Samanlagt nemur önnur leysing en sú sem mæld er á yfirborði yfir 2 km<sup>3</sup> vatns á ári fyrir alla íslensku jöklana, sem jafngildir um það bil meðalrýrnun bæði Hofsjökuls og Langjökuls á ári það sem af er þessari öld. Það er því nauðsynlegt að taka tillit til þessara afkomuþátta þegar gerð er grein fyrir heildarafkomu jökla hér á landi.

Hægt er að nýta hæðarkort, gerð eftir mælingum eða myndum frá gervitunglum, flugvélum og drónum, til þess að meta afkomu og er slíkt mat kallað landlíkanafkoma. Metin er rúmmálsbreyting jökuls yfir tiltekið tímabil (oft 5–10 ár) út frá hæðarkortum

5. mynd. Afkomumælingar á Sátujökli í Hofsjökli jökulárið 2023–2024.  
– Mass-balance measurements from Sátujökull at Hofsjökull for the glaciological year 2023–2024.



a) Flatarmál hvers 25 m hæðarbils á Sátujökli. Reikna má rúmmálsbreytingu með því að margfalda afkomutölur með flatarmáli. – The area of each 25 m elevation band on Sátujökull. That allows volumetric change to be calculated by multiplying mass-balance values by area.

b) Mæligildi vetrar-, sumar- og ársafkomu jökulársins 2023–2024 í 9 punktum á ísasviði Sátujökuls, sem nær yfir 72 km<sup>2</sup> svæði á norðanverðum Hofsjökli. Bestu línur eru lagðar gegnum punktastöfnin. – The figure shows measurements of winter, summer, and annual mass balance for the glaciological year 2023–2024 at nine points on the ice surface of Sátujökull, covering a 72 km<sup>2</sup> area on the northern side of Hofsjökull. Best-fit lines are drawn through each set of points.

c) Rúmmálsbreytingar ofan og neðan jafnvægislínu, sem var í 1.325 m hæð þetta árið. Greinilegt er að meira tapaðist (rauðu súlurnar) neðan jafnvægislínu en ofan hennar (bláu súlurnar), og reiknaðist afkoma Sátujökuls (og Hofsjökuls alls) verulega neikvæð þetta ár. – The figure shows volume changes above and below the equilibrium line, which was at 1.325 m elevation. More mass was lost (red bars) below the equilibrium line than above it (blue bars), and the mass balance of Sátujökull (and of Hofsjökull overall) was significantly negative.

sem útbúin eru við upphaf tímabilsins og lok þess. Mat á afkomu með landlíkönunum hefur þann kost að aðferðin nær yfir allan jökulinn og felur einnig í sér áhrif innri leysingar, leysingar við jökulbotn og kelfingar. Til samanburðar lýsa stikumælingar völdum sniðum og punktum á yfirborði, og einn af kostum þeirra er að gögn fást árlega og jafnvel innan ársins. Afkomumælingar nýtast til að meta breytingar á afkomu jökla, bæði til skemmri og lengri tíma, og til að kvarða og sannreyna jökla- og vatnafar líkön ásamt fjarkönnunargögnum.

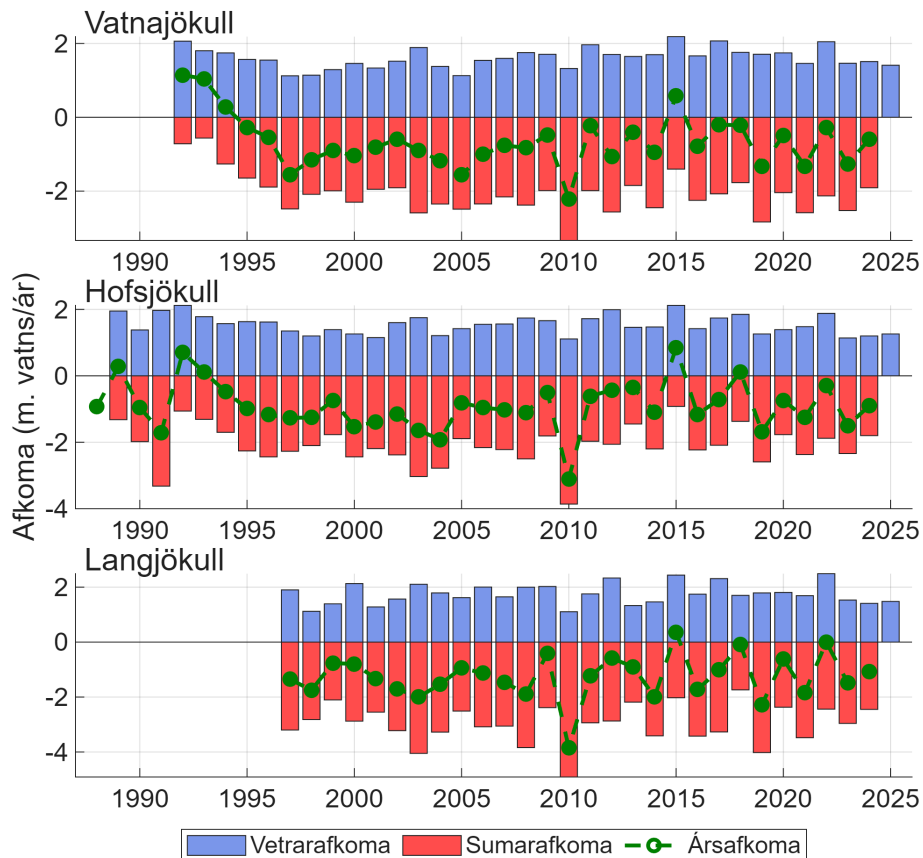
Stikumælingarnar er unnt að setja fram með jafnþykktarlínunum líkt og sýnt er á 4. mynd fyrir Vatnajökul. Einnig er hægt að horfa á snið einstakra skriðjökla og sjá hvernig afkomuþættir breytast með hæð, líkt og 5. mynd sýnir á Sátujökli í norðanverðum Hofsjökli. Unnt er að teikna stærri mynd sem sýnir langtímabreytingar í afkomuþáttum (6. mynd) og reyna með aðstoð þeirra að greina orsakir breytinganna. Þær eru margþættar hér á landi. Loftslag, eldgos, framhlaup, jökulhlaup, sand- og öskufok sem sest á yfirborð jökla – allt hefur þetta áhrif á afkomu jöklanna.

Stikumælingar verða ávallt lykilgögn í jöklafræði, þrátt fyrir aukinn fjölda gervihnatta á braut um jörðu og sífellt betri og afkastameiri reiknilíkön til þess að herma hegðun og svörun jökla við breytingum í

loftslagi. Þeir jökla sem hafa verið mældir samfelld í 30 ár hafa hlotið nafnbótina viðmiðunarjökla (e. reference glaciers) hjá World Glacier Monitoring Service, alþjóðlegri stofnun sem heldur meðal annars utan um þessar afkomumælingar í alþjóðlegum gagnabanka. Hofsjökull og Vatnajökull hafa þegar verið teknir inn í þessa heiðurshöll, og það styttest í að Langjökull hljóti einnig nafnbótina.

## LÖGUN JÖKLA OG SKRIÐ

Fyrsta nánast skýjalausa myndin af Vatnajökli var tekin með MSS-skyngjara (e. multispectral scanner) úr Landsat 1-gervihnatti (ERTS-1) hinn 31. janúar 1973 (7. mynd). Á myndinni komu í fyrsta sinn skýrt í ljós öskjur megineldstöðva undir jöklinum og uppbygging sprungusveima sem teygja sig fram undan jökuljaðrinum, sem og farvegir nýafstaðinna jökulhlaupa. Þessir drættir teiknuðust sérlega vel upp undir 7° sólarhorni.<sup>29</sup> Í ERTS-1 áætluninni var Íslandsmyndun eitt af tilraunaverkefnum sem NASA studdi, og fólst verkefnið í greiningu MSS-mynda frá ERTS-1 til þess að rannsaka margvísleg jarðfræðileg, vatnafræðileg og haffræðileg fyrirbæri.<sup>30</sup> Þessi fyrsta umfangsmikla fjarathugun á Íslandi úr gervihnatti leiddi til frekari greininga og aukinnar þekkingar á mörgum sviðum, þar á meðal ýtarlegrar könnunar á yfirborðslögum



6. mynd. Heildarafkoma stærstu íslensku jöklanna frá upphafi mælinga. Myndin sýnir vel viðvarandi neikvæða afkomu allra jöklanna en einnig sést breytileiki í vetrar- og sumarafkomu, sem ræðst að mestu af veðri hvers jökulárs. – Surface mass balance of the largest Icelandic glaciers since the beginning of measurements. The figure clearly highlights the persistent negative mass balance of all the glaciers, but also shows the variability in winter and summer mass balance, which is largely modulated by the weather of each glaciological year.

jökla, útbreiðslu og stærð eldfjalla undir jökli, ketilsigi af völdum jarðhita undir jökli, afmörkun ísaskila og mati á flatarmáli jökla á Íslandi.<sup>29</sup> Síðan hefur fjöldi gervihnatta á sporbaug um jörðu aukist gríðarlega; rúm- og tímaupplausn batnar ár frá ári, og nýir og endurbættir skynjarar gera vísindamönnum kleift að rannsaka fjölbreytt jöklafræðileg fyrirbæri mun betur en áður, sem og að vakta breytingar jafnóðum.

Til þess að skilja hreyfingu jökla er nauðsynlegt að þekkja lögun bæði yfirborðsins og botnsins, ásamt gerð undirlags. Mælingar á yfirborði og þykkt jökla hafa verið gerðar áratugum saman. Fram á miðjan áttunda áratuginn var botnlandslag íslenskra jökla hins vegar nær óþekkt, og einnig yfirborðið ofan um 1.000 m hæðar (8. mynd).<sup>31</sup> Á undanförunum árum hefur fjarkönnun rutt sér til rúms við kortlagningu á yfirborði jökla, en áður voru slíkar mælingar flóknar og mannaflafrekar í krefjandi umhverfi hálandisins.

Það er líka krefjandi að kortleggja jökulbotninn. Til þess þarf mælitæki sem sjá gegnum snjó og jökulís, sem á Íslandi getur verið allt að 1.000 metra þykkur (9. mynd). Fyrstu rannsóknir á þykkt Vatnajökuls voru gerðar í fransk-íslenska leiðangrinum árið

1951.<sup>32</sup> Þá var notast við mælingar á endurkasti hljóðbylgna frá botni jökulsins með sprengingum á yfirborði á nokkrum völdum stöðum. Nú eru þessar mælingar jafnan gerðar með íssjá. Það er sérhæfð ratsjá sem sendir frá sér rafsegulbylgjur og mælir styrk og ferðatíma endurkasts frá jökulbotninum. Auk þess mælist endurkast frá íslinum, öskulögum, vatnsrásum og lónum undir jöklinum. Til þess að greina endurkast frá botni þíðjökla, eins og á Íslandi, þarf að notast við rafsegulbylgjur með bylgjulengd upp á metra eða tugi metra.<sup>33</sup>

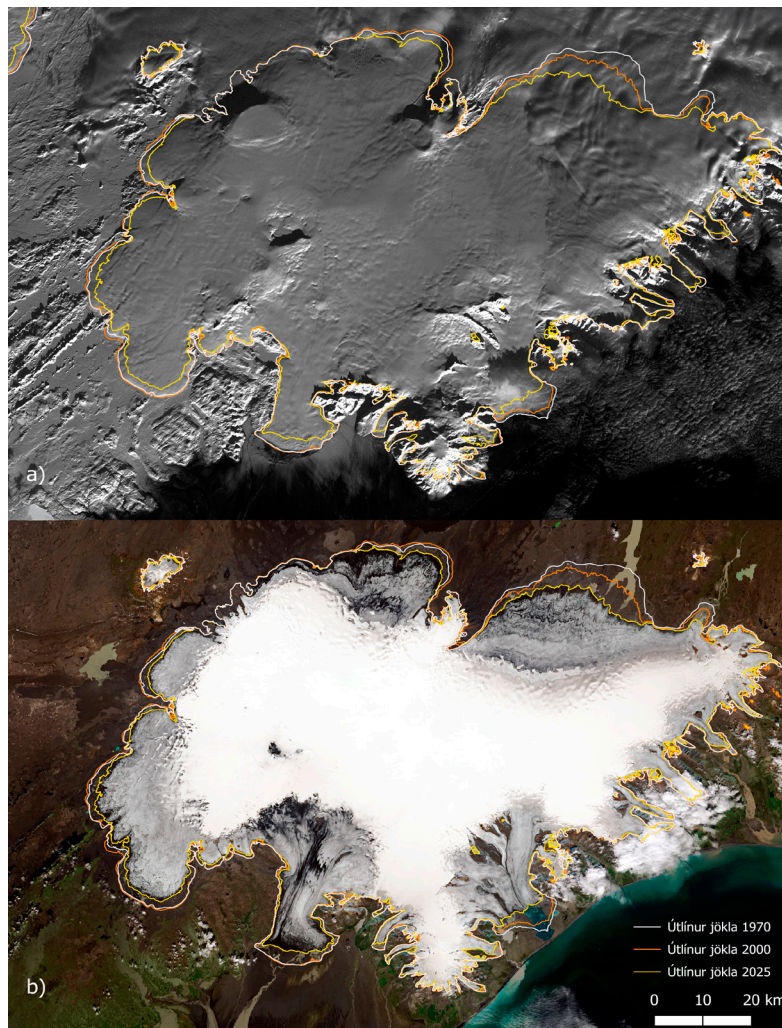
Botnkort jökla afhjúpa jarðfræðilegar myndanir, svo sem eldfjöll og djúpa dali sem jöklar hafa mótað, en einnig eru botnkort nauðsynleg til þess að afmarka vatnasvið jökulvatna við jökulbotn, finna farvegi jökulhlaupa, athuga stöðugleika farvega við jökuljaðar og spá fyrir um myndun og vöxt jökullóna (9. mynd). Hægt er að meta ísþykkt jökla þegar botn og yfirborð er þekkt og fá mat á rúmmáli jökuls, það er hversu mikin ís hann geymir (10. mynd).

Jöklar skriða niður halla undan eigin þunga líkt og deig eða bráðinn málmur. Læknirinn og náttúrufræðingurinn Sveinn Pálsson gerði sér

7. mynd. t.h. Gervihnattamyndir af Vatnajökli. – Satellite images of Vatnajökull.

a) Ein fyrsta gervihnattamynd af Vatnajökli úr Landsat 1-gervihnetti NASA/USGS, 31. janúar 1973. – One of the first satellite images taken of Vatnajökull from the NASA/USGS Landsat-1 satellite, on 31 January 1973.

b) Gervihnattamynd af Vatnajökli og næsta nágrenni tekin 17. ágúst 2025 úr gervitunglinu ESA Copernicus Sentinel-2. Útlínur jökulsins fyrir valin ár eru sýndar. – A satellite image of Vatnajökull and its surroundings taken on 17 August 2025 from the ESA Copernicus Sentinel-2 satellite. Glacier outlines for selected years are shown.

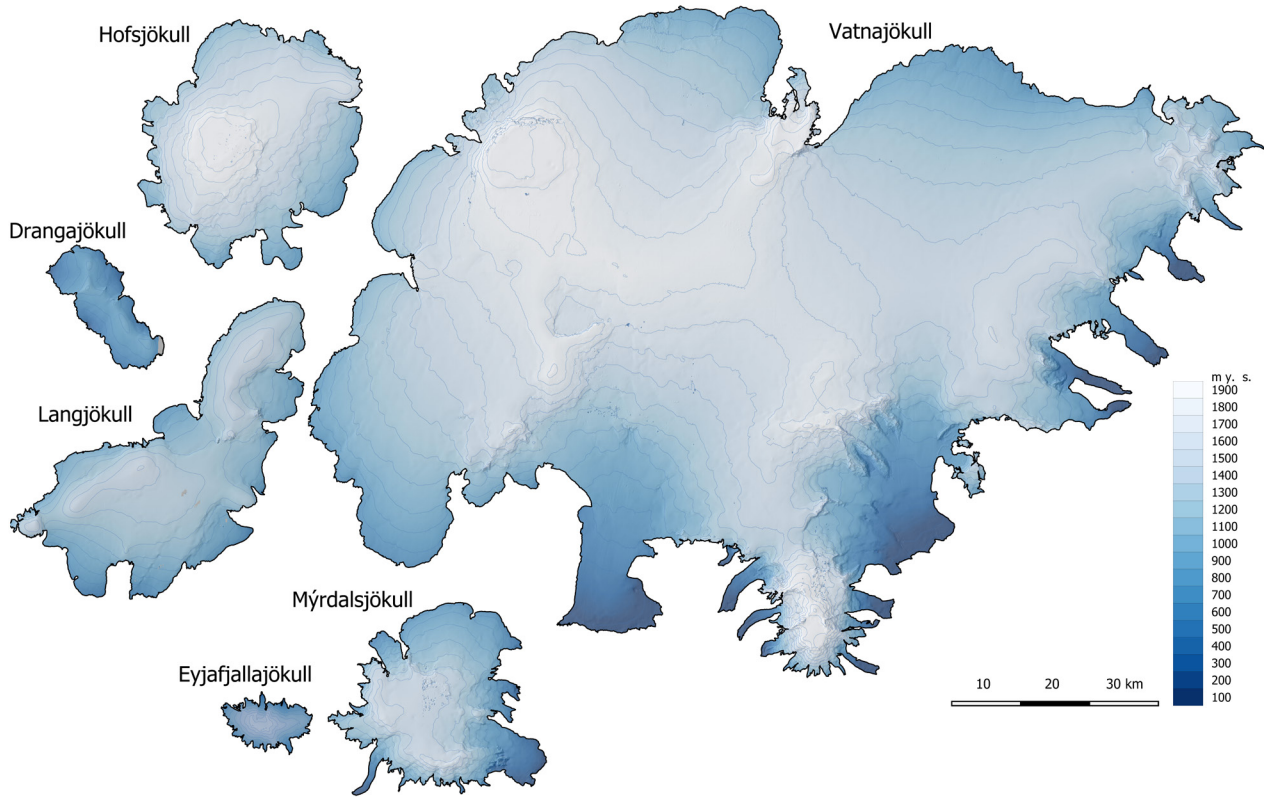


fyrstur manna grein fyrir þessu eins og sést í Jöklariti hans, sem hann lauk við 1794.<sup>34</sup> Fyrstu mælingar á skriðhraða jökla hér á landi gerði Otto Turell á Svínafellsjökli um miðja 19. öld.<sup>35</sup> Sænsk-íslenski Vatnajökulsleiðangurinn mældi skriðhraða á Hoffellsjökli 1936–1938<sup>36</sup> og Jack Ives og félagar á Morsárjökli snemma á sjötta áratug síðustu aldar.<sup>37,38</sup> Þessar mælingar fóru fram á leysingarsvæðum jöklanna með hefðbundnum landmælingatækjum og voru mjög fyrirhafnarsamar. Þær sýndu að jökullinn skreið frá nokkrum tugum cm upp í nokkra metra á dag. Skriðhraði að sumri reyndist meiri en að vetri, í sumum tilfellum allt að tvöfalt meiri.

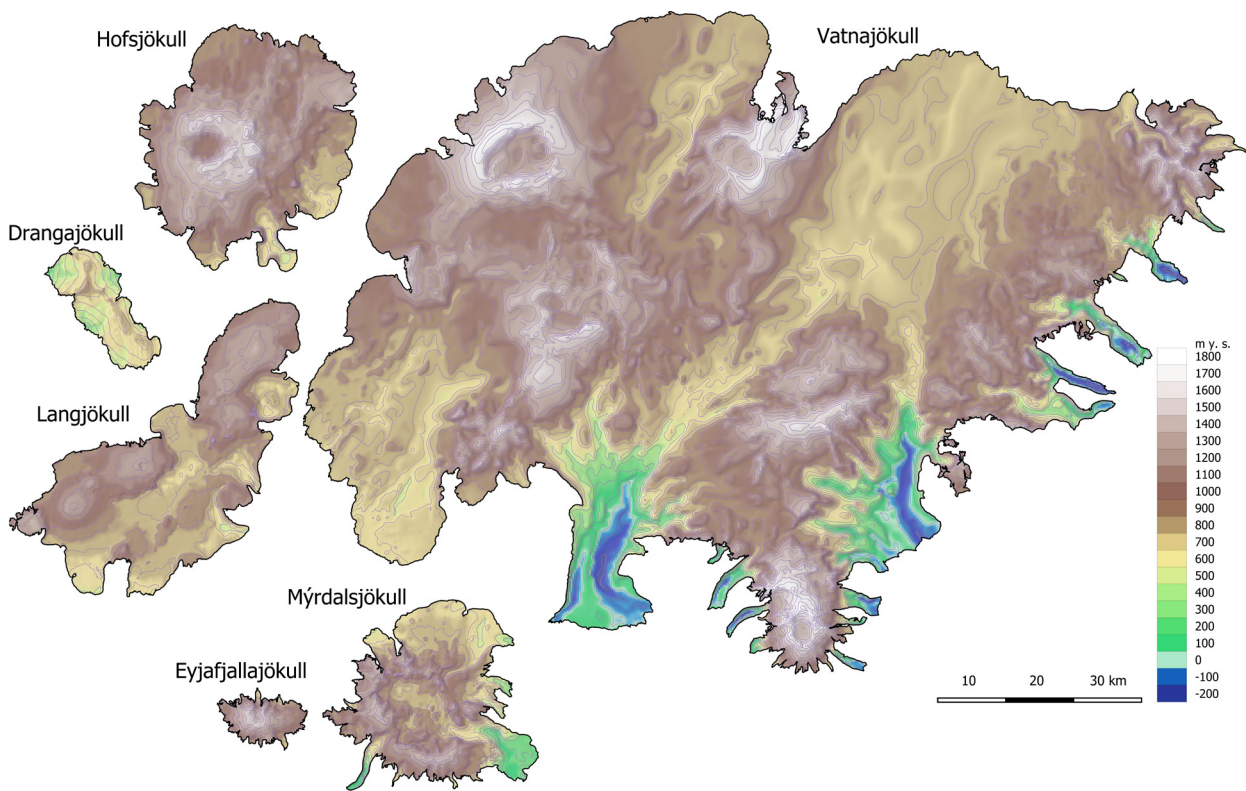
Þegar afkomumælingar á stóru jöklunum hófust um 1990 var nákvæm staðsetning afkomustikna mæld reglulega og eftir að GPS-tæki komu til sögunnar var unnt að nota endurteknar mælingar á sömu stikum til þess að reikna skriðhraða milli mæliferða í nokkrum tugum punkta á hverjum jökli. Á síðustu áratugum hafa síritandi GPS-tæki jafnframt verið sett upp á nokkrum stöðum á jöklunum, og sýna þau hreyfingu íssins á ákveðnum stað með mikilli tímaupplausn. Þessar mælingar juku skilning á hreyfingu jöklanna, en örðugleikar við mælingar af þessum toga og mikill

tilkostnaður gerðu það að verkum að upplýsingar um skrið íslensku jöklanna voru takmarkaðar framan af. Beiting fjarkönnunar við skriðhraðamælingar á jöklum síðastliðin 30 ár hefur umbylt þekkingu okkar, ekki bara um íslenska jökla heldur um alla jökla og ísbreiður heimsins.

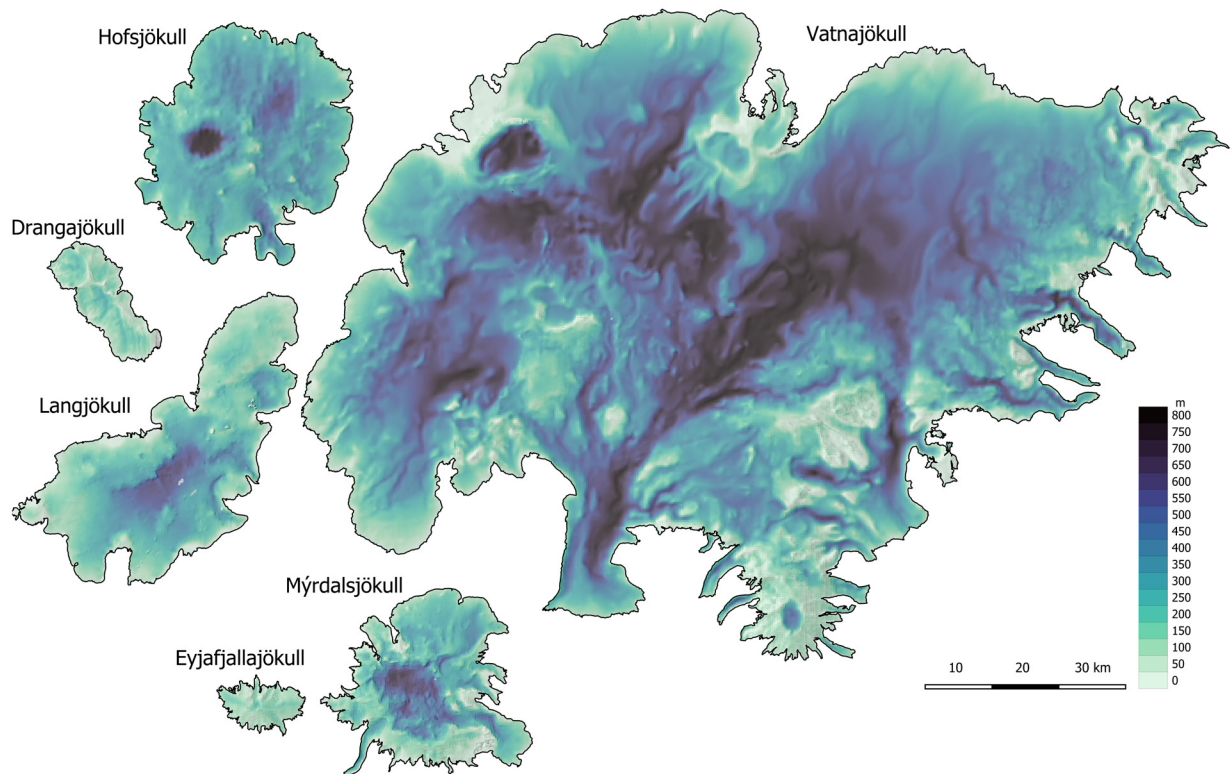
Fjarkönnun á skriðhraða jökla byggist á því að ljósmyndir og ratsjármyndir úr gervihnöttum eða flugvélum sýna breytilegt endurkast frá yfirborði jarðar. Það endurspeglar óreglu í ýmsum eiginleikum yfirborðs og efstu jarðlaga. Þar sem hreyfing er á jarðlögum eða jöklunum er unnt er að meta hraða hreyfingarinnar með því að greina hliðrun í endurkastsmynstri milli ratsjármynda frá mismunandi tímum (e. offset tracking). Einnig er unnt að mæla hraða með svokallaðri bylgjuvíxlgreiningu ratsjármynda (e. interferometric synthetic aperture radar, InSAR). Þessar fjarkönnunaraðferðir gera það að verkum að nú er unnt að mæla yfirborðshraða ísskriðs á reglulegu neti yfir heilu jöklana með allt frá eins dags millibili upp í vikur eða mánuði. Þegar framhlaup eða jökulhlaup valda skyndilegum breytingum í jökulskriði er unnt að taka sérstakar



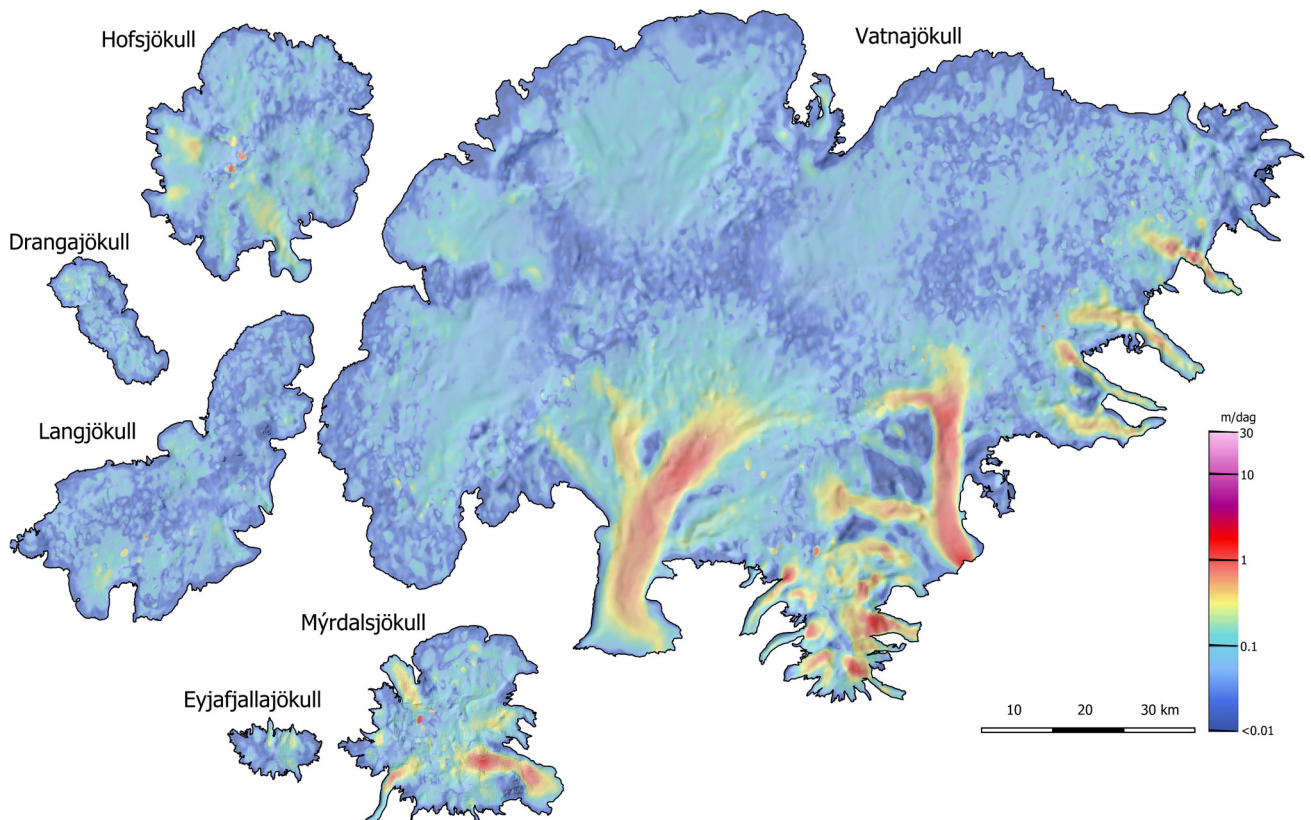
8. mynd. Yfirborðshæð helstu jökla á Íslandi. Byggt á gervitunglagögnum frá 2020–2022.<sup>93,94</sup> Surface elevation of Iceland's major glaciers, based on satellite data from 2020–2022.



9. mynd. Botnhæð helstu jökla Íslands. Byggt á íssjarmælingum.<sup>31</sup> – Bed elevation of Iceland's major glaciers based on radio-echo sounding measurements.



10. mynd. Ísþykkt helstu jökla Íslands, mismunur á hæð yfirborðs og botns. Sjá má hvar ísinn er þykkastur á Vatnajökli, allt að 900 m, nærri ísaskilum Skeiðarárjökuls og Brúarjökuls.. – Ice thickness of Iceland's major glaciers, showing the difference between surface and bed elevation. The thickest ice on Vatnajökull can be seen near the ice divides of Skeiðarárjökull and Brúarjökull, reaching up to 900 m.



11. mynd. Skriðhraði íss á yfirborði á helstu jöklum Íslands.<sup>39</sup> – Ice surface flow velocity on the major glaciers of Iceland.



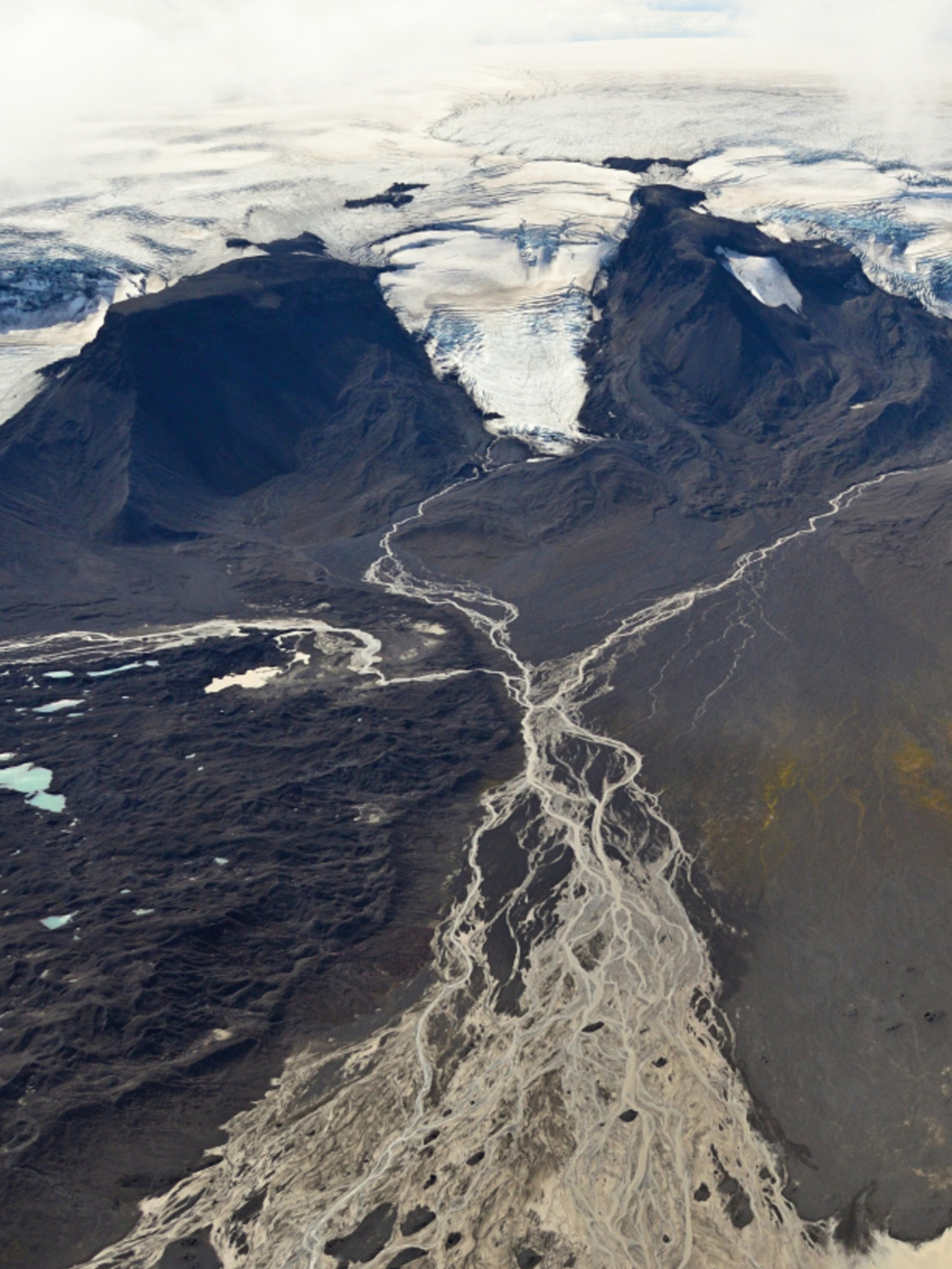
Skaftráketil eystri, í fjarska sést Pálsfjall og Þórðarhyrna, 2015.  
Ljósmynd/Photo: Oddur Sigurðsson



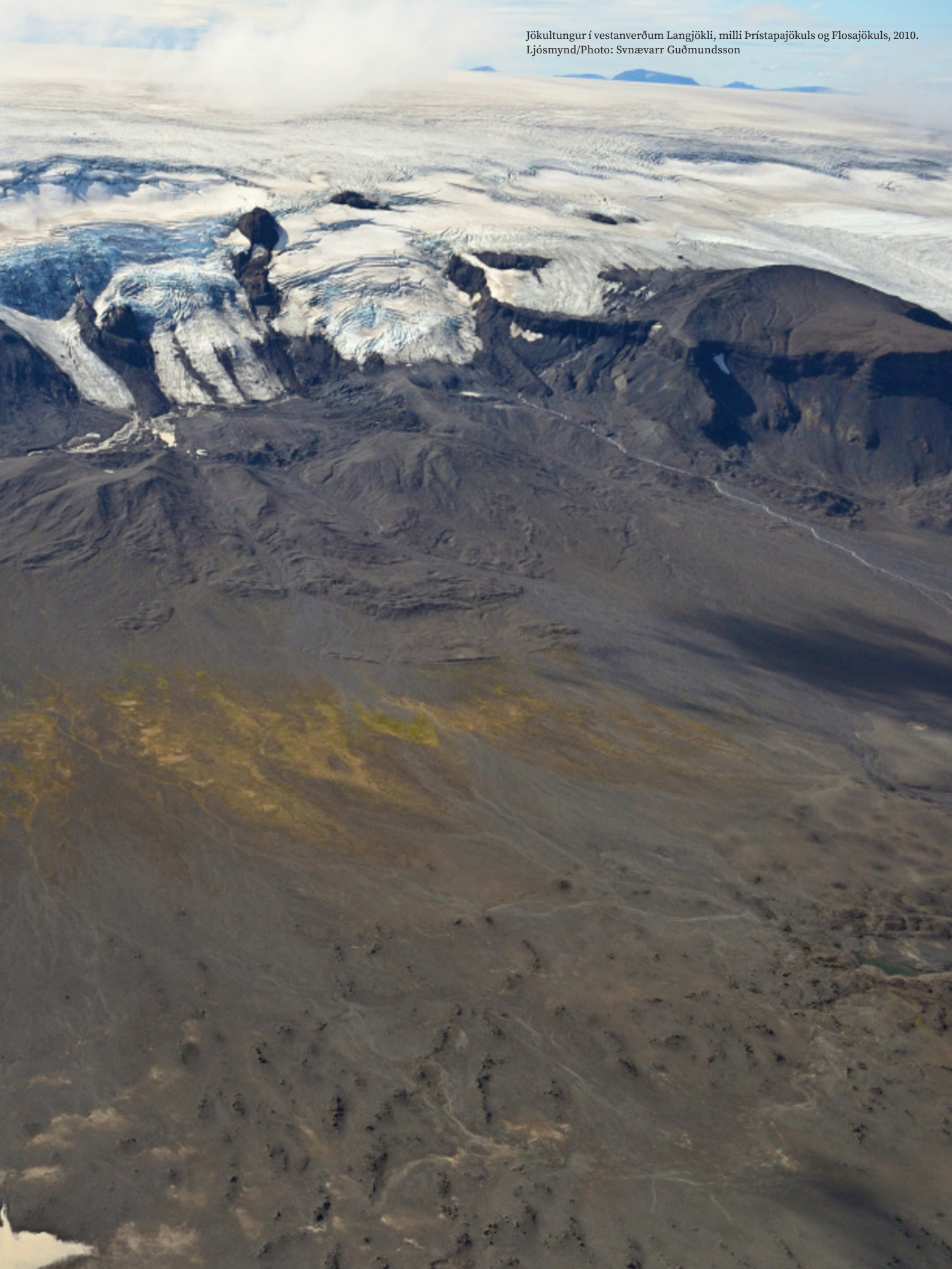
Skeiðarárjökull, horft yfir Skaftafellsfjöll. Fjær sjást Súlutindar, 2010.  
Ljósmynd/Photo: Snævarr Guðmundsson







Jökultungur í vestanverðum Langjökli, milli Þrístapajökuls og Flosajökuls, 2010.  
Ljósmynd/Photo: Svnævarr Guðmundsson







Jökultindaborg í Fossadal í Esjufjöllum, 2022.  
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson



Horft yfir öskulög á leysingarsvæði Tungnaárjökuls. Í fjarska sjást Kerlingar og Hamarinn, 2022.  
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson





Framhlaup Tungnaárjökuls haustið 1994.  
Ljósmynd/Photo: Hannes H. Haraldsson



9 15 '94

Svöludalsjökull sem mætir Breiðamerkurjökli, 2006.  
Ljósmynd/Photo: Snævarr Guðmundsson









Grímsfjall og Grímsvötn. Til vinsti sjást skálar Jöklarannsóknafélagsins á Svíahnúk eystri, 2023.  
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson



Vorferðarlangar á Skarphéðinstindi með sýn yfir Brúarjökul og Snæfell, 2024.  
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson







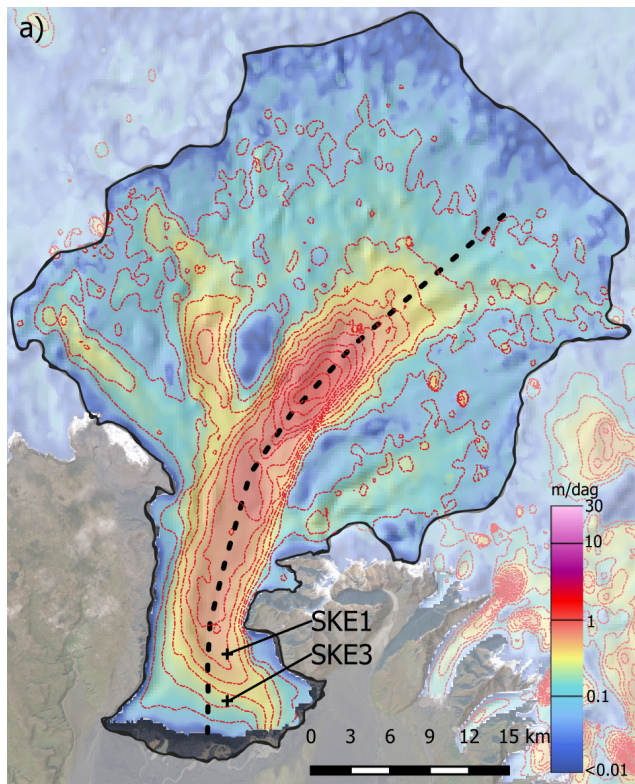
myndir í rannsóknaskyni og greina hraðabreytingar frá degi til dags á þéttu neti á áhugaverðum svæðum. Frá sjónarhóli náttúrufræðinga, sem eitt sinn fóru gangandi um jöklana, boruðu niður stikur og mældu staðsetningu þeirra með landmælingatækjum, eru þessar tækni framfarir göldrum líkastar.

Copernicus Sentinel-1A-, 1B- og 1C-gervihnettir Geimvísindastofnunar Evrópu (ESA) hafa tekið ratsjármyndir af Íslandi á 6 eða 12 daga fresti síðan haustið 2014. Hliðrunargreiningu hefur verið beitt til þess að greina skriðhraða jökla hér á landi á grundvelli þessara gagna, sem og skriðhraða á ísbreiðum heimskautanna<sup>39</sup> (11. mynd). Meðalskriðhraði íslensku jöklanna er samkvæmt þessum mælingum langmestur um miðbik þeirra. Á Skeiðarárjökli (12. mynd) og Kötlujökli getur hraðinn verið 400–800 metrar á ári þar sem hann er mestur. Á Breiðamerkurjökli mælist einnig slíkur hraði en þar nær háhraðasvæðið alveg niður að kelfandi jökulsporðinum. Hraðinn er einnig tiltölulega mikill á skriðjöklum Örafajökuls og á skriðjöklum suðaustanverðs Vatnajökuls. Hraðinn á stóru skriðjöklunum í norðan- og vestanverðum Vatnajökli, sem og á jöklum á miðhálandinu, Vesturlandi og Vestfjörðum, er mun minni eða nokkrir tugir metra á ári. Einnig má sjá að jökulísinn skriður mjög hægt í grennd við ísaskil og víðast nærri jöðrum jöklanna. Þessar mælingar sýna jafnframt að jöklarnir skriða hraðar að sumri en vetri eins og Jack Ives og félagar komust að (12. mynd).

Samfelldar GPS-mælingar úr mælistöðvum á leysingarsvæði Skeiðarárjökuls og Breiðamerkurjökuls sýna ekki bara árstíðasveiflur í hraða heldur einnig dægursveiflur yfir leysingartímann, sem tengjast auknu vatnsrennsli við jökulbotn<sup>40</sup> (12. mynd).

## FRAMHLAUP JÖKLA

Framgangur eða framhlaup er óregla í hreyfingu jökla sem enn hefur ekki tekist að skýra að fullu og felst í því að jökulskriðið herðir tímabundið á sér, oft tífalt, hundraðfalt eða jafnvel meira, og jökullinn springur allur upp. Er þá sagt að gangur sé í jöklinum. Á tímabilum milli framhlaupa er skriðhraði jökuls ekki nægur til að bera uppsafnaða afkomu frá safnsvæðinu niður á leysingarsvæðið. Jökullinn þykkar því á safnsvæðinu en þynnist á leysingarsvæðinu, sporðurinn hopar og jökullinn verður brattari. Í framhlaupum flyst ís af safnsvæði niður fyrir jafnvægislínu, jökulyfirborð lækkar á safnsvæðinu (dæmigert um ~50 m) en þykkar á leysingarsvæðinu og sporðurinn gengur fram um hundruð metra eða jafnvel marga kílómetra. Samfara þessu eykst afrennsli frá jöklinum og vatn sprettur fram undan jökulsporði mun víðar en allajafna. Aurburður í ám sem frá jöklinum falla vex margfalt og getur haldist yfir meðallagi í nokkur ár eftir að framhlaupi lýkur.<sup>41</sup> Fyrstu merki um framhlaup koma oft fram sem aukinn skriðhraði nærri jafnvægislínu nokkrum árum áður en verulega herðir á hraðanum.

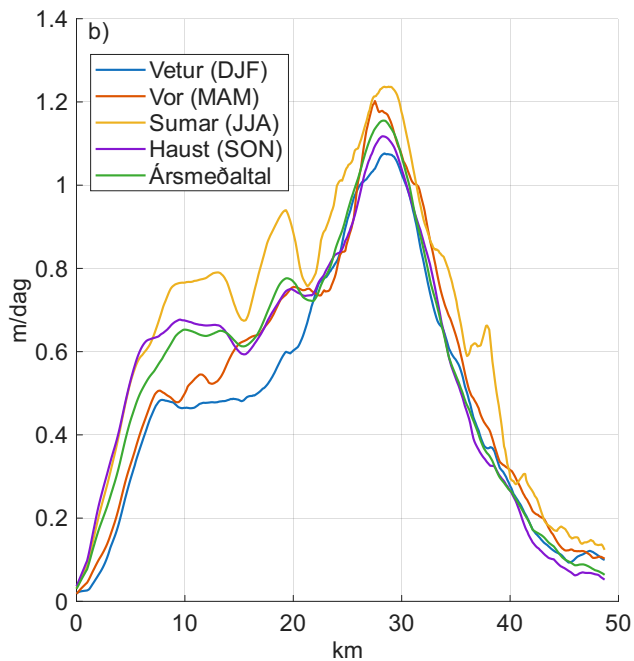


12. mynd. Dæmi um skriðhraða á Skeiðarárjökli. – Example of surface ice velocity on Skeiðarárjökull.

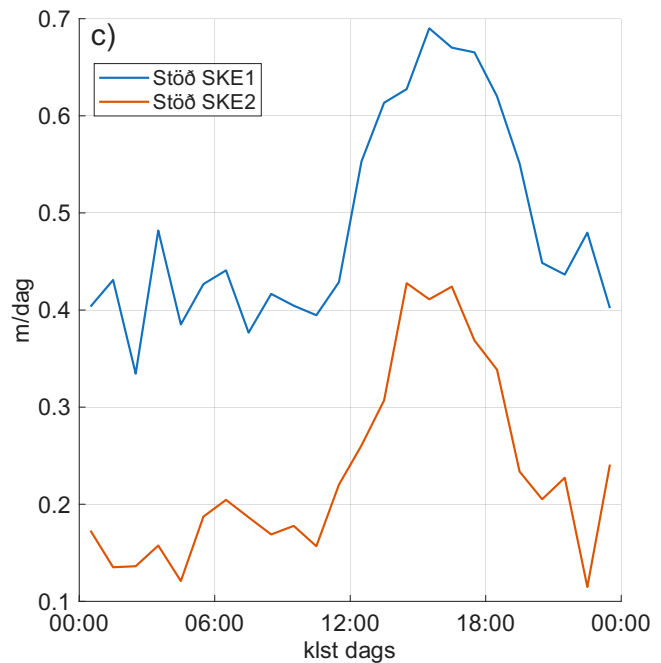
a) Gögn úr hliðrunargreiningu skriðhraða fyrir meðaltal árána 2014 til 2024.<sup>39</sup> Gulir og rauðir litir sýna hærri hraða en bláir lægri. Svört heildregin lína sýnir ísaskil Skeiðarárjökuls og svört strikuð lína sýnir snið niður jökulinn. – Data from displacement analysis of flow velocity averaged over the years 2014–2024. Yellow and red colors indicate higher velocities, while blue colors indicate lower velocities. The solid black line shows the ice divide of Skeiðarárjökull, and the dashed black line shows a profile down the glacier.

Framhlaupa gætir í flestum stóru íslensku skriðjöklunum og mörgum hinna minni.<sup>42</sup> Heimildir er um framhlaup hérlendis sem ná yfir 80% af flatarmáli jökulsins. Stór framhlaup geta verið mikið sjónarspil. Þannig gekk Brúarjökull fram um hér um bil 9 km á árunum 1963 og 1964. Framrásarhraði sporðsins var um tíma yfir 100 m á dag<sup>43</sup> og mesti skriðhraði jökulsins ofan við sporðinn hefur væntanlega verið umtalsvert meiri en það. Oft verða framhlaup í ákveðnum jökli með nokkuð reglulegu millibili, afar breytilegu milli jökla. Stór framhlaup verða í Brúarjökli á um það bil 50–100 ára fresti<sup>41,43,44</sup> og hafa lengstu framhlaupin þar hrúgað upp stórum jarðvegshraukum. Framhlaup verða með 25–50 ára millibili í Dyngjujökli, Tungnaárjökli og Síðujökli en einungis 5–20 ár líða á milli tiltölulega lítilla framhlaupa í Múlajökli.

Framhlaup hafa skilið eftir sig margvísleg ummerki undir jökulum og í nágrenni þeirra, meðal annars stóra jökulgarða, jökulöldur, jökulkembur, haugaruðninga, krákustígamalarása og sprungufyllingar.<sup>5,45–50</sup> Þessi ummerki hafa verið kortlögð víða á landinu af mikilli elju. Sem dæmi má nefna að landmótun framan við Brúarjökul og Eyjabakkajökul hefur verið kortlögð ýtarlega,<sup>51,52</sup> og sambærileg kortlagning hefur verið



b) Skriðhraði fyrir snið sem sýnt er á a) fyrir meðaltöl árstíða, vetur, vor, sumar og haust, auk ársmeðaltals. – Surface ice velocity along the profile shown in (a) for seasonal averages, winter, spring, summer, and autumn, as well as the annual average.



c) Mælingar úr GPS-stöð á Skeiðarárjökli í ágúst 2006 sýna breytileika í skriðhraða innan dagsins.<sup>40</sup> – Measurements from a GPS station on Skeiðarárjökull recorded in August 2006, showing sub-daily variability of ice flow.

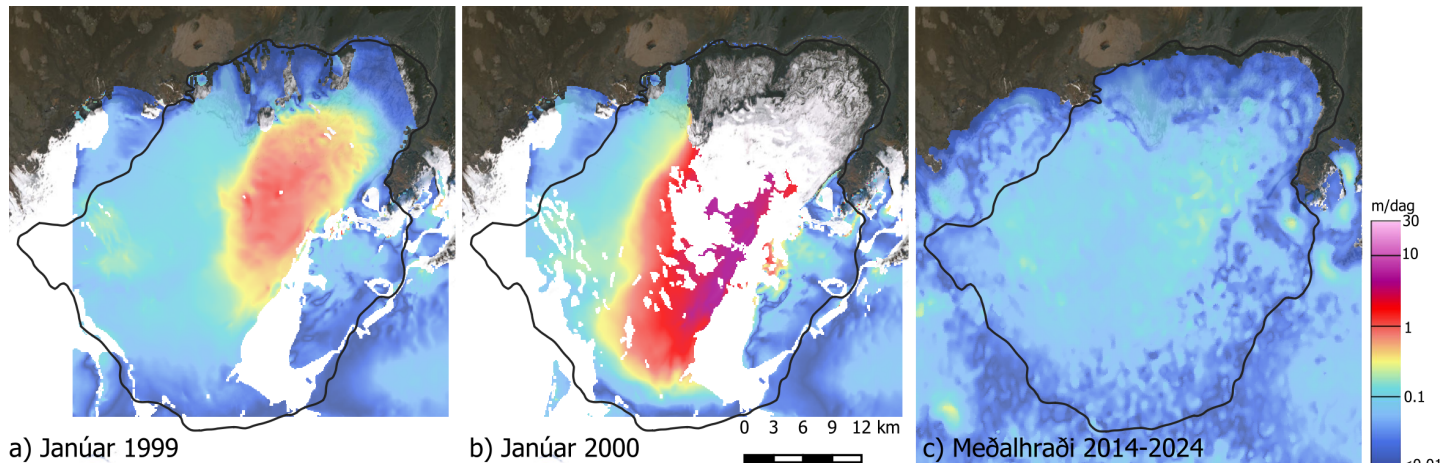
unnin fyrir marga aðra jökla hér á landi.<sup>5,6,47</sup> Hérlendis eru einstakar aðstæður til rannsókna á þessu sviði sökum auðvelds aðgengis að jökulsporðum og lítillar gróðurhulu framan jökuls. Þessar rannsóknir hafa aukið mjög þekkingu á landmótun af völdum framhlaupa og kennt jarðfræðingum hvernig þekking má svæði þar sem framhlaup hafa haft áhrif á landslag og mótað það.

Ekki hefur enn náðst góður skilningur á orsök eða eðli framhlaupa. Líkur benda þó til þess að vatn undir þrýstingi við jökulbotn komi þar við sögu.<sup>52–54</sup> Framhlaup byrja oft tiltölulega ofarlega á jöklinum og berast síðan undan halla sem eins konar bylgja á yfirborðinu, þar sem jökulskriðið er mun hraðara ofan bylgjunnar en neðan hennar. Þegar bylgjan nær jökulsporðinum þrýstist hann fram eins og trölsleg jarðýta, þykknar og springur. Einnig eru dæmi um að framhlaups verði vart einhvers staðar inni á miðjum jökli og það deyi út áður en það nær til sporðsins, til dæmis á Vestari-Hagfellsjökli 1998–2000, og fyrir kemur að bylgja í skriðhraða berst upp eftir jöklinum öfugt við skriðstefnuna, eins og þekkt er á Tungnaárjökli. Svo er til í dæminu að framhlaup nái einkum til leysingarsvæðisins, eins og í framhlaupum

í Þjórsárjökli árin 1991 og 1994. Sú regla sem virðist vera á tímabili milli framhlaupa í sama jökli hefur heldur ekki verið skýrð, né heldur mismunur á milli svæða á jörðinni. Á Íslandi eru framhlaup algeng<sup>55</sup> en miklu fátíðari í Ölpunum og Skandinavíu til dæmis. Framhlaupsjökklar á Íslandi og svæði framan við þá eru því kjörinn vettvangur fyrir ungt vísindafólk til þess að láta að sér kveða og auka þekkingu okkar á þessari hegðun jökla með frekari rannsóknum.

Frá því að Sentinel-1-tunglin hófu að afla ratsjármynda árið 2014 hefur ekki komið til umtalsverðra framhlaupa í íslenskum jökum. Þó sáust ummerki um lítið framhlaup í Kverkjökli eftir 2008<sup>56</sup> í Entujökli árið 2019<sup>39</sup> og Teigardalsjökli í Svarfaðardal 2023–2025 (Skafti Brynjólfsson, munnl. uppl.). Á tímabilinu 1995–2000 öfluðu ERS1/2-gervihnettir ESA fjölda bylgjuvíxlmynda af íslenskum jökum sem sýna sólarhringshreyfingu þeirra.<sup>57</sup> Þau gögn sýna Tungnaár- og Sylgjujökul (í vestanverðum Vatnajökli) og Þjórsárjökul í Hofsjökli í framhlaupi árið 1995, sem og framhlaup Dyngjujökuls 1999–2000 (13. mynd). Þegar kemur að næsta stóra framhlaupi má gera ráð fyrir að fjarkönnun á skriðhraða og hæð jökulyfirborðs komi að miklum notum við rannsóknir.

13. mynd. Skriðhraði mældur með bylgjuvíxlmyndum teknar af ERS1/2 gervitunglum ESA á Dyngjujökli. Svört lína sýnir mörk ísaskila á jöklinum. – Flow velocities measured with interferometry at Dyngjujökull. The black line shows the ice-divide boundary of Dyngjujökull.



a) Janúar 1999

a) Skriðhraði mældur í janúar 1999 þegar framhlaup Dyngjujökuls var í upphafsfasa. – Flow velocity measured in January 1999, when the surge of Dyngjujökull was in its initial phase.

b) Janúar 2000

b) Skriðhraði mældur í janúar 2000 þegar framhlaup Dyngjujökuls var nærri hámarki. – Flow velocity measured in January 2000, when the surge of Dyngjujökull was at or near its peak.

c) Meðalhraði 2014-2024

c) Meðalskriðhraði á tímabilinu 2014 til 2024. Sýnir meðalástand jökulsins þegar framhlaupa gætir ekki. – Average flow velocity for the period 2014–2024, showing the typical state of the glacier when no surge activity is present.

Oft verður yfirborð jökla í framhlaupi alsett stórum sprungum sem geta legið bæði samsíða skriðstefnunni og þvert á hana, og er jökullinn þá ófær með öllu. Þess vegna er mikilvægt að fylgjast með framhlaupum og vara jöklaflöðum við hættulegum svæðum. Slík svæði kunna að vera merkt sem ágætlega fær á óuppfærðum kortum og gögnum í GPS-tækjum sem notuð eru til þess að velja leiðir á jökli. Frá árinu 2010 hefur Landsbjörg í samstarfi við hóp vísindamanna gefið út sprungukort sem sýna þekkt sprungusvæði og sigkatla, og gagnast fyrir ferðalög um jökla.

## JÖKULHLAUP

Jökulhlaup eru skyndileg vatnsflöð frá jökulum. Þau eiga oftast uppruna sinn í jökulstífluðum lónum en ísbráðnun af völdum eldgosa og jarðhita getur einnig valdið jökulhlaupum. Jökulstífluð lón geta myndast á mismunandi hátt en algengast er að vatn safnist fyrir í dölum eða dalverpum sem skriðjökla hafa lokað.<sup>58</sup> Jökulhulin lón myndast vegna jarðhita undir hvilft í yfirborði jökuls. Bræðsluvatn vegna ísbráðunar við botninn og yfirborðsvatn rennur með jökulbotni að slíkum hvilftum og getur myndað þar lón með svipuðum hætti og stöðuvötn verða til þar sem vatn safnast fyrir í lægðum í landslagi.<sup>59</sup> Hérlandis er oft talað um þessi fyrirbrigði sem katla, samanber heitin Skaftárkatlar og Kötluakatlar.

Flæði vatns í jökulhlaupum er í eðli sínu óstöðugt. Varmi frá losun stöðuorku flæðandi vatns bræðir ís. Við það stækkar vatnsfarvegurinn undir jöklinum og eykur vatnsflæðið meðan af nægu vatni er að taka.<sup>60,61</sup> Þegar jökulstífluð lón nær tengingu við rennslisleiðir undir jöklinum eykst rennsli úr því og jökulhlaup

hefst. Það er misjafnt hvernig lón ná tengingu við rennsliskerfið og ólíkir flöskuhálsar stýra flæði hvers hlaups og vatnsmagni þess. Jökulhlaup geta verið hamfarafloð sem jafnast á við stærstu fljót í heimi en eru stundum aðeins lítillga aukinn vatnangangur í ám (14. mynd). Sem dæmi um hamfarafloð má nefna Skeiðarárhlaupið 1996<sup>62,63</sup> og Kötluhlaupið 1918,<sup>64</sup> en dæmi um minni jökulhlaup eru hin nær árlegu hlaup úr jarðhitakötum undir Mýrdalsjökli í Múlakvísl og Fremri-Emstrúa.<sup>65</sup> Slík hlaup hafa stundum verið kölluð jarðhitaleki.

Helstu upprunastaðir jökulhlaupa á Íslandi eru jarðhitakatlar undir Mýrdalsjökli, Skaftárkatlar í vestanverðum Vatnajökli og Grímsvötn. Einnig koma hlaup úr jökulstífluðum lónum í Fossadal í Esjufjöllum og í Innri-Veðurárdal, en þeirra verður ekki mikið vart þar sem þau renna undir Breiðamerkurjökul og beint í Jökulsárlón. Einnig eru þekkt jökulhlaup úr Gengissigi í Kverkfjöllum og úr Hafrafellslóni við vestanverðan Langjökul. Það er nýlegt jaðarlón sem valdið hefur hlaupum í Svartá og Hvítá í Borgarfirði síðan 2017 að minnsta kosti.<sup>66</sup> Myndun Hafrafellslóns og úr Vatnsdalslóni austan Heinabergsjökuls í kjölfar þynningar jökulsins sýnir þau áhrif sem jöklabreytingar geta haft á jökulhlaup og hættu af þeirra völdum.

Á síðustu áratugum hafa eldgos eða aukin jarðhitavirkni undir jökli valdið nokkrum stórum jökulhlaupum. Má þar helst nefna Skeiðarárhlaupið 1996 í kjölfar Gjalpargossins, jökulhlaup niður Gígjökul og sunnanverðan Eyjafjallajökull samfara eldgosum 2010, hlaup undan Sólheimajökli 1999, hlaup undan Kötlujökli í Múlakvísl 2011, hlaup undan Köldukvíslarjökli 2011 sem fór í Hágöngulón, og hlaup undan

Sandfellsjökli sem gekk í Syðri-Leirá og þaðan í Skálm sumarið 2024.

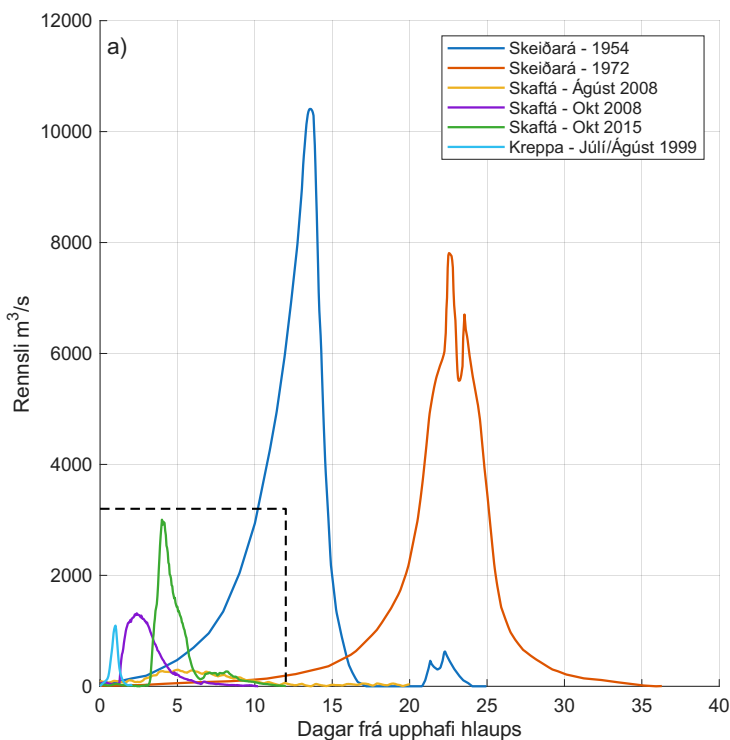
Jökulhlaup eru ein helsta náttúruvá sem tengist jöklum. Hlaup hafa valdið mannskaða fyrr á öldum. Heimildir eru um mannlát í hlaupi í Jökulsá á Fjöllum 1684.<sup>13</sup> Maður féll í Jökulsá á Breiðamerkursandi 1927 þegar ís yfir útfalli jökulhlaups undan jöklinum hrundi. Þá fórust maður og hestur í jökulkeri sem myndaðist við bráðnun ísjaka sem hlaup úr Grímsvötnum árið 1861 bar fram á Skeiðarásand.<sup>13</sup> Jökulhlaup hafa einnig valdið miklu tjóni á innviðum, svo sem ræktarlandi, vegum, brúm og byggingum.<sup>67</sup>

Jökulhlaup eru algeng á Íslandi, einkum vegna þess að hérlendis er bæði um að ræða hlaup úr dölum eða dalverpum sem skriðjöklar hafa lokað og hlaup af völdum jarðhita og eldvirkni undir jöklum. Fjölmargar lýsingar eru til á jökulhlaupum og þekking á hegðun þeirra mikil. Vísindalegar rannsóknir á jökulhlaupum hófust því fyrr hér en víðast hvar annars staðar<sup>68-71</sup> og hefur það leitt til þess að í fræðilegri umfjöllun um þetta náttúrufræðingur er íslenska orðið jökulhlaup notað. Orðið jökulhlaup er alþjóðlega viðurkennt fræðiorð um það sem á ensku er nefnt „glacial lake outburst flood“ og skammstafað GLOF.

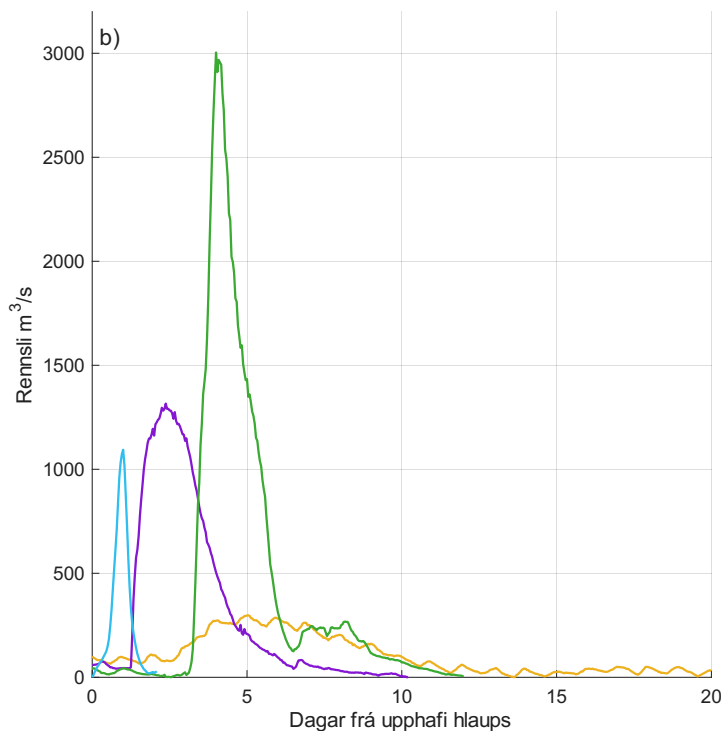
Þörfin fyrir að skilja og þekkja jökulhlaup hér á landi leiddi til þess að greining Helga Björnssonar<sup>60</sup> og rennismælingar Sigurjóns Rists<sup>72</sup> á hlaupum

úr Grímsvötnum urðu grunnurinn að fræðilegum líkanreikningum slíkra flóða.<sup>61</sup> Grímsvatnahlaup hafa verið kölluð hægrísandi eða veldisvaxandi hlaup og rennislitir þeirra ræðst af bráðnun hlauprásarinnar í eða undir ísnum.<sup>73</sup> Íslensk jökulhlaup hafa einnig verið nýtt til rannsókna á hraðrísandi eða línulega rísandi hlaupum, þar sem þrýstibylgja með vatnsþrýsting yfir fargþrýstingi jökulsins brýst fram.<sup>73,74</sup> Rannsóknir á jökulhlaupum úr Skaftárkötlum og Grímsvötnum hafa á síðari árum sýnt að lyfting jökuls vegna vatns-söfnunar við botn getur átt sér stað í hægrísandi jökulhlaupum. Einnig geta hraðrísandi jökulhlaup runnið í rásum sem myndast við jökulbotn þar sem ís bráðnar í hluta farvegarins.<sup>75</sup> Báðar þessar gerðir hlaupa valda margföldun í skriðhraða jökulsins vegna hlaupvatns sem dreifist um stóran hluta jökulbotns í nágrenni rennislisleiða og virkar sem smurning á mótum botns og íss.<sup>57,75</sup> Jökulhlaup falla því ekki einvörðungu í tvo meginflokkka hæg- og hraðrísandi jökulhlaupa, heldur mynda róf á milli þessara megingunda. Það er því líkt á komið með jökulhlaupafræði og öðrum náttúruvísindum, og mannlífinu, að tvíhyggja tveggja meginflokkka dugir ekki til að lýsa að fullu fjölbreytileika náttúrunnar.

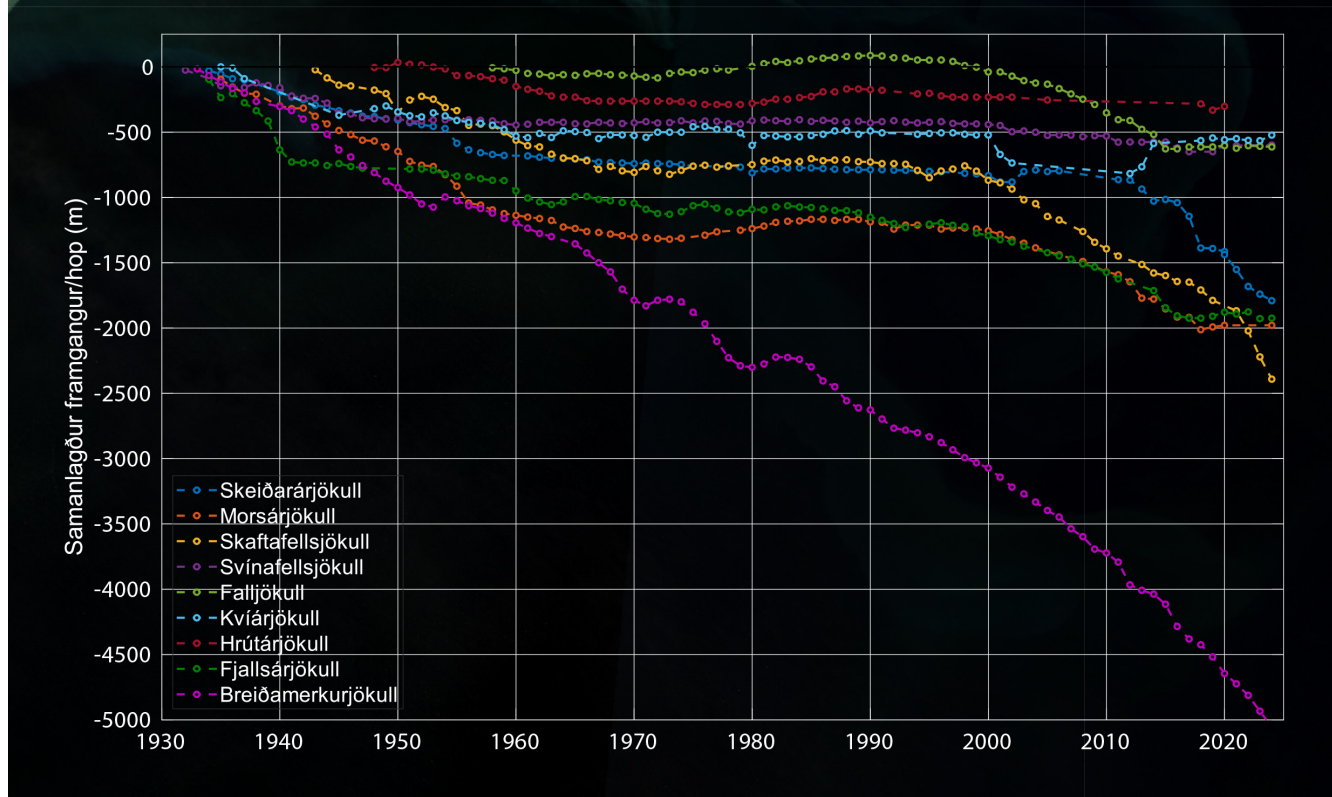
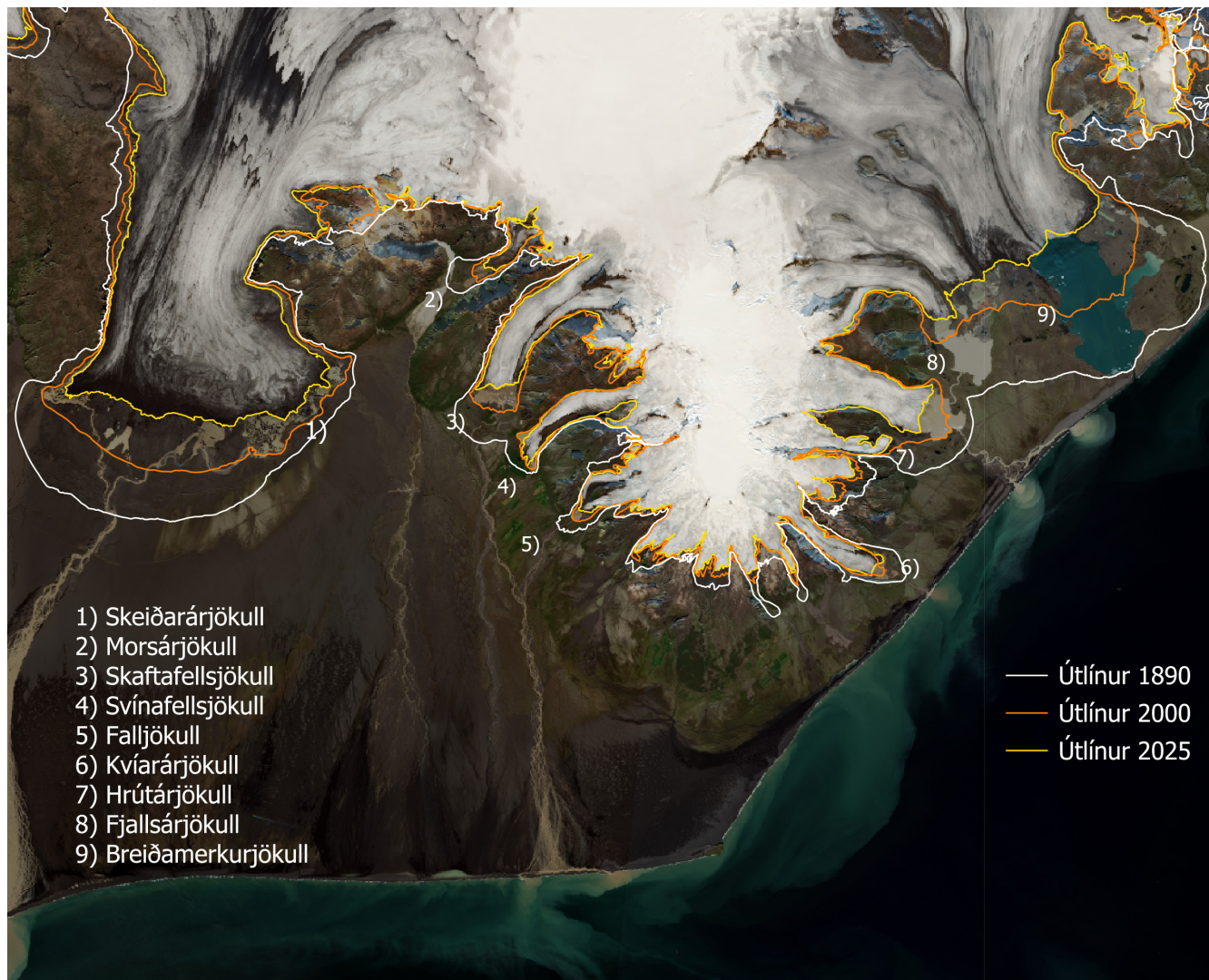
14. mynd. Rennislisferlar valinna jökulhlaupa á Íslandi. Gögn frá Veðurstofu Íslands. – Hydrographs of selected jökulhlaups in Iceland. Data from the Icelandic Meteorological Office.



a) Valdís rennislisferlar jökulhlaupa í Skeiðará, Skaftá og Kreppu. Myndin sýnir þann mikla breytileika rennslis sem jökulhlaup hafa eftir uppruna sínum. – Selected hydrographs of jökulhlaups in Skeiðará, Skaftá, and Kreppa. The figure highlights the large flow variability that jökulhlaups can exhibit depending on their source.



b) Rennislisferlar minni jökulhlaupanna á a) (innan punktalínu). – Hydrographs of the smaller jökulhlaups shown in (a) (within the dashed boundary).



15. mynd. T.v. Útlínur Vatnajökuls á mismunandi tíma og sporðamælingar fyrir valda skriðjökla Vatnajökuls. Sporðamælistaðir, þar sem sjálfboðaliðar Jökjarannsóknafélagsins hafa stundað mælingar áratugum saman, eru sýndir með númerum við hvern jökul. Línuritið sýnir samanlagðan framgang eða hop jöklanna frá upphafi mælinga – Glacier outlines of Vatnajökull at various times and frontal measurements for selected outlet glaciers. Individual outlet glaciers have retreated from several hundred m up to a few km since around 1890. The sites where volunteers of the Iceland Glaciological Society conduct their measurements are numbered. The plot shows the advance and retreat of selected outlet glaciers with continuous record of frontal measurements.

## ÞRÓUN JÖKLA FRÁ LITLU ÍSÖLD

Jöklar í heiminum hafa hörfað frá hámarksútbreiðslu sinni á litlu ísöld, kuldaskiðinu sem hófst á 14. öld og stóð til aldamótanna 1900. Á öðrum áratug síðustu aldar hófst hlýindaskið hér á landi og náði hámarki á fjórða áratug 20. aldar, en um miðja öldina tók að kólna á ný og hélst sú þróun fram á miðjan tíunda áratuginn.<sup>76</sup> Þá hlýnaði aftur, og stendur þetta hlýinda-tímabil enn. Jöklar leitast við að vera í jafnvægi við loftslag á hverjum tíma og eru eins konar minnisbækur náttúrunnar; geyma sögu loftslagsins um aldir.

Með kortlagningu á ystu jökulgörðum, hæstu jaðarurðum, roflínunum og grettistöku má finna líklegar útlínur jöklanna þegar þeir voru hvað stærstir á litlu ísöld. Langflestir jöklar á Íslandi tóku að hörfa frá þessari hámarksstöðu um 1890, samfara hlýnandi loftslagi, en þá var jökulhulið land um 12.600 km<sup>2</sup>. Jöklar hafa síðan minnkað um 2.500 km<sup>2</sup>, eða um 20%, sem samsvarar því að Hofsjökull, Langjökull og Mýrdalsjökull, eins og við þekkjum þá nú, væru horfnir. Flatarmálsrýrnunin frá lokum litlu ísaldar fram á miðja 20. öld var um 1.000 km<sup>2</sup>. Tæplega 40% af flatarmálsrýrnuninni síðan um 1890 varð eftir aldamótin 2000, en á síðastliðnum rúmum tveimur áratugum hafa jöklar tapað að meðaltali um 40 km<sup>2</sup> árlega.<sup>77</sup>

Jöklar á Íslandi hylja nú (2025) um 10.009 km<sup>2</sup> (1. tafla). Stærstu jöklarnir (>500 km<sup>2</sup>) hafa tapað 10–30% af flatarmáli sínu frá hámarki litlu ísaldar, margir minni jöklar (3–40 km<sup>2</sup> árið 2000) hafa tapað allt að 80% flatarmáls og frá síðustu aldamótum hafa um 70 smájöklar horfið. Flatarmál þeirra flestra var á bilinu 0,1–3 km<sup>2</sup> í upphafi aldarinnar. Á Tröllaskaga eru horfnir rúmlega 20 jöklar sem töldust nægilega merkilegir til þess að ganga undir eigin nafni,<sup>25</sup> á Austfjörðum, 10 nærri Vatnajökli, 8 í Kerlingarfjöllum, 2 nærri Langjökli og 3 á öðrum svæðum landsins. Fyrirséð er að fleiri nafnkunnir jöklar muni hverfa á næstu áratugum. Meðal þeirra eru Hofsjökull eystri, Þrándarjökull, Torfajökull og Kaldaklofsjökull (1. tafla).<sup>77</sup>

Á fyrri hluta 20. aldar var ljóst að margir jökulsporðar voru teknir að hopa og árið 1930 var komið á fót sjálfboðaliðaverkefni um sporðamælingar undir forystu Jóns Eyþórssonar veðurfræðings.<sup>78</sup> Verkefnið var síðar tekið upp hjá Jökjarannsóknafélagi Íslands við stofnun þess árið 1950 og stendur enn.<sup>79</sup> Á hverju hausti er mæld vegalengd að jökulsporði frá föstum viðmiðunarstað sem upphaflega var merktur

með vörðu eða járnstöng. Fyrstu áratuginu voru ýmist notuð málbönd eða spotti af þektri lengd til þess að mæla fjarlægðina, en nú eru oftast notuð GPS-tæki og fjarlægðarmælur til þess að skrá stöðu sporðanna. Sporðamælingarnar eru fyrstu samfelldu og kerfisbundnu mælingar á breytingum jökla á Íslandi. Mælingarnar sýna skýr tengsl veðurfars- og jöklabreytinga en gagnasafnið geymir einnig upplýsingar um framhlaup margra skriðjökla. Ólíkt flatarmálsmati jökla, sem er byggt á kortum og loftmyndum, sem eru fáar á síðustu öld, veita sporðamælingar árlegt mat á framgangi eða hörfun jökla og geta því lýst jöklabreytingum með meiri tímaupplausn. Nú er reyndar slíkur fjöldi gervihnatta á braut um jörðu að hægt er að meta flatarmál jökla árlega, og jafnvel innan ársins. En sporðamælingar á jörðu niðri eru engu að síður gagnlegar vegna þess að í þeim felast beinar athuganir og ljósmyndun á jökluum og nágrenni þeirra.

Frá síðustu aldamótum hafa langflestir jökulsporðar hörfað á ári hverju og er breytingin einna mest á stærri skriðjöklum Vatnajökuls, Langjökuls og Mýrdalsjökuls. Dæmi eru um að skriðjöklar þeirra hörfi um allt að 100–200 m árlega. Mesta hopið sem mælt hefur er við Breiðamerkurjökul, þar sem mælingar hafa sýnt allt að 300 m hop milli ára<sup>80,81</sup> (15. mynd).

Vísindamenn hafa í rúma öld leitast við að skilja þessar jöklabreytingar og orsakir þeirra og hefur afkomusaga íslenskra jökla frá lokum litlu ísaldar nýlega verið tekin saman.<sup>82</sup> Þessi saga er rakin með því að nýta ólík gagnasöfn frá mismunandi tímum og aukast upplýsingar sem nýta má í slíkar rannsóknir mikið þegar kemur fram á síðari hluta 20. aldar. Áður en reglulegar afkomumælingar hófust, eða fyrir níunda áratug síðustu aldar, voru athuganir ekki nægar til að meta breytileika í afkomu milli ára eða áratuga. Því hefur verið stuðst við flatarmáls- og rúmmálslíkan til þess að áætla heildarbreytingar yfir lengri tímabil, en samband flatarmáls og rúmmáls jökla má nýta til þess að áætla massabreytingar.<sup>83</sup> Eftir níunda áratug síðustu aldar liggja hins vegar fyrir árlegar athuganir og ýtarlegri, sem gera kleift að meta bæði massa- og rúmmálsbreytingar með mun meiri nákvæmni og hærri tímaupplausn.<sup>18,19</sup>

Íslenskir jöklar hafa frá lokum litlu ísaldar til ársins 2025 tapað 600 ± 130 gíгатонnum. Það jafngildir um 17 ± 4% af massa jöklanna um 1890, eða að meðaltali 4,2 ± 1,0 Gt á ári. 1 gíгатонn jafngildir ~1 cm af vatni, jafndreift yfir Ísland. Massatapið frá því um 1890 samsvarar um 1,6 mm sjávarstöðuhækkun heimshafanna. Árið 2025 var heildarrúmmál íslenskra jökla um 3.330 km<sup>3</sup>, sem svarar til um 9 mm hækkunar sjávarstöðu ef þeir bráðnuðu allir.<sup>82</sup> Um helmingur jökulrýrnunarinnar eftir lok 19. aldar, 240 ± 20 Gt, hefur átt sér stað frá árinu 1994/95, og nemur að meðaltali 9,6 ± 0,8 Gt á ári. Hraðasta rýrnunin mældist á tímabilinu 1994/95 til 2009/10, að meðaltali 11,6

Tafla 1

Þróun flatarmáls jökla á Íslandi frá lokum litlu ísaldar (~1890 til 2025).<sup>77</sup> Dálkarnir sýna mat á flatarmáli jökla landsins á ákveðnum tímupunkti. Öftustu tveir dálkarnir sýna annars vegar hlutfallslegt tap á 20. öld (1890–2000) og svo það sem af er 21. öld (2000–2025). – Area of glaciers in Iceland for selected years since the end of the Little Ice Age (~1890 to 2025).<sup>77</sup> The last two columns show area decrease of the 20th century (1890–2000) and the first quarter of the 21st century (2000–2025).

	~1890 km <sup>2</sup>	1945/1946 km <sup>2</sup>	~2000 km <sup>2</sup>	~2010 km <sup>2</sup>	2025 km <sup>2</sup>	Tap á 20. öld (1890–2000)	Tap á 21. öld (2000–2025)
Vatnajökull	8.789	8.326	8.122	7.881	7.569	7,6%	6,8%
Langjökull	1.093	992	921	896	811	15,7%	11,9%
Hofsjökull	1.038	948	892	852	788	14,1%	11,7%
Mýrdalsjökull	736	652	594	562	502	19,3%	15,5%
Drangajökull	220	161	146	144	134	33,6%	8,3%
Eyjafjallajökull	116	87	81	72	62	30,2%	23,5%
Tungnafellsjökull	53,7	39,7	39,2	34,3	30,6	27,0%	21,9%
Þórisjökull	44	30	30	24,4	22,2	31,8%	26,0%
Eiríksjökull	37,3	25,3	22,6	22,8	19,8	39,4%	12,4%
Þrándarjökull	34,5	27	17	14,9	12	50,7%	29,4%
Tindfjallajökull	22,6	16,8	15,6	13,2	11,2	31,0%	28,2%
Snæfellsjökull	25,0	13,9	12,5	9,9	7,8	50,0%	37,6%
Torfajökull	22,8	16,0	11,4	9,3	6,7	50,0%	41,2%
Hofsjökull eystri	11,6	7,1	5	3,5	2,2	56,9%	56,0%
Hrútfellsjökull	10,8	7,7	8,3	5	4	23,1%	51,8%
Okjökull	10,3	7,4	4	1,5	0	61,2%	100,0%
Kaldaklofsjökull	7,9	3,9	2,5	1,8	1,3	68,4%	48,0%
Snæfell (Tindsjökull)	8	5,3	5	4,3	3,6	37,5%	28,0%
Tröllaskagi	201	192	126	113,4	92,7	37,3%	26,4%
Flateyjarskagi	18,4	15,2	10,8	9,72	8,7	41,3%	19,4%
Austurland	10,8	6,7	5,6	5,04	4,4	48,1%	21,4%
Suðausturland	12,6	8,5	6,3	5,67	3,1	50,0%	50,8%
Kerlingarfjöll	13,6	5,8	4,9	4,41	1,5	64,0%	69,4%
Vestfirðir	5,5	3	2	1,8	0,8	63,6%	60,0%
Suðurland	2,5	1,5	1,1	0,99	0,7	56,0%	36,4%
Vesturland	4,1	0,7	0,6	0,54	0,1	85,4%	83,3%
Allir jöklar	12.549	11.600	11.087	10.693	10.099	11,7%	8,9%

± 0,8 Gt á ári. Eftir 2010 hefur meðalhraði rýrnunar hins vegar verið um helmingi hægari, þó með undantekningum. Sérstaklega stóð árið 2018/19 upp úr, þegar árlegt massatap mældist 15,0 ± 1,6 Gt.<sup>76, 82</sup> Gögnin sýna einnig að afkoma íslensku jöklanna fylgir vel sveiflum í hita. Á árunum 1930/31 til 1949/50 var meðalrýrnun jöklanna líklega svipuð og mælst hefur eftir 1994. Marktæk massaaukning varð á árunum 1980/81–1993/94, eða að meðaltali 1,5 ± 1,0 Gt á ári.

Miklar breytingar hafa orðið á landslagi framan við marga skriðjökla á undanförunum áratugum. Sporðlón hafa víða myndast og önnur stækkað þar sem jöklarnir hafa grafið djúpar dældir.<sup>84</sup> Lónin hafa áhrif á stöðu jökulsporðanna og er þess að vænta að fleiri jökulsporða bíði sömu örlög og Heinabergs-

jökuls og Hoffellsjökuls sem hafa verið að brotna upp á síðastliðnum árum.

## FRAMTÍÐ ÍSLENSKU JÖKLANNA

Líkanreikningar benda til þess að jöklar heimsins rýrni tvöfalt meira við 2,7°C hlýnun en við 1,5°C hlýnun fram til 2100.<sup>85</sup> Spár benda til þess að jöklar í öllum heimshlutum haldi áfram að tapa massa og að núverandi stærð þeirra, ásamt hraða hlýnunar, ráði mestu um hversu fljótt þeir hverfa eða dragast verulega saman.<sup>86</sup> Litlu jöklarnir fara fyrst. Nú þegar eru margir þeirra alveg horfnir og líkanreikningar benda til að um 60% jökla sem eru minni en 1 km<sup>2</sup> hverfi vegna hlýnunar sem þegar hefur átt sér stað. Hlýni meira



Leysingartjörn í Grímsvötnum, 2025.  
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson

gætu rúmlega 90% lítilla jökla í heiminum horfið.

Íslenskra jökla bíður áframhaldandi rýrnun vegna loftslagsbreytinga. Spálíkön sýna að framhaldið ræðst að miklu leyti af því hversu hratt tekst að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda á næstu áratugum. Jöklalíkön byggjast á reikningum á afkomu jökulsins og ísflæði. Til þess að hægt sé að líkja eftir viðbrögðum jökulsins við breytingum í veðurfari þarf margvísleg gögn, meðal annars botn- og yfirborðskort, og tímaraðir hita og úrkomu. Til þess að stilla líkönin eru notuð gögn um afkomu og rúmmáls- og flatarmálsbreytingar jökulsins frá fyrri tíð.

Líkanreikningar fyrir Vatnajökul sýna að fram til ársins 2100 verður rúmmálstap hans um það bil 20%, óháð sviðsmyndum um framhald loftslagsbreytinga.<sup>87</sup> Eftir það skiptir miklu máli hversu mikil losun gróðurhúsalofttegunda verður. Ef hlýnun takmarkast við 2°C við lok aldarinnar, í samræmi við markmið Parísarsamningsins, gæti Vatnajökull fundið nýja jafnvægisstærð í hlýrra loftslagi með um 30–60% af núverandi rúmmáli. Eldri líkanreikningar fyrir Hofsjökul og Langjökul bentu til að 2°C hlýnun gæti orðið til þess að þeir hyrfu alveg á um 200–300 árum.<sup>7</sup>

Eins og komið hefur fram hverfa minni jöklarnir fyrst. Ekki hefur verið lögð jafnmikil áhersla á að meta framtíð þeirra á Íslandi og hinna stærri, meðal annars vegna þess að ófullkomnari gögn eru til um þá en stærri jöklana. Nýlega hefur framtíð Hofsjökuls eystri verið metin, enda er hann talinn eiga stutt eftir.<sup>88</sup> Frá lokum litlu ísaldar hefur jökullinn tapað um 80% af flatarmáli sínu (~11,6 km<sup>2</sup> um 1890, ~2,2 km<sup>2</sup> haustið 2025) og talið er að innan 30 ára verði hann allur (16. mynd).

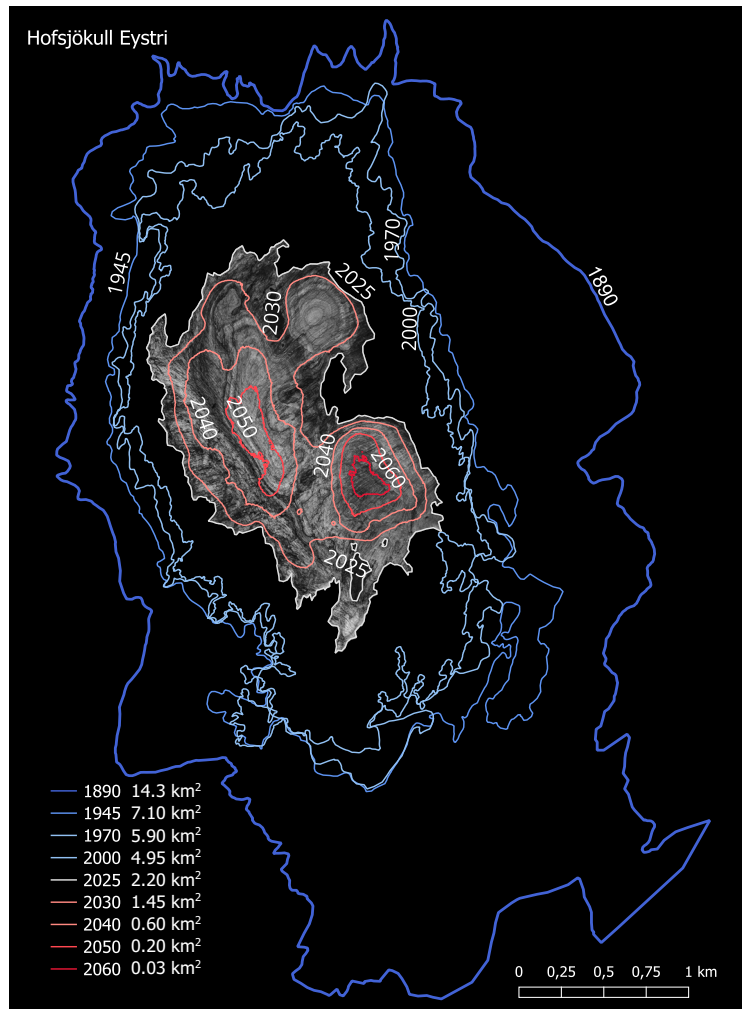
Alþjóðlegar rannsóknir, þar sem teknir eru fyrir allir jöklar í heiminum, hafa einnig rakið þróun íslenskra jökla. Í einni slíkri rannsókn er byggt á sex jöklalíkönunum sem keyrð voru með fjórum loftslagssviðsmyndum og 25 mismunandi lofthjúpslíkönunum.<sup>88</sup> Niðurstöður rannsóknarinnar sýna að fyrir köldustu sviðsmyndina verður massatap til ársins 2100 um 18% af heildarmassa jökla í heiminum (m.v. 2015). Hins vegar verður massatapið um 36% ef hlýjasta

sviðsmyndin nær fram að ganga. Þá rýrna íslenskir jöklar um 30–50% af núverandi massa sínum, sem er í samræmi við þá líkanreikninga fyrir Vatnajökul, Hofsjökul og Langjökul sem nefndir voru hér að framan.

Margir óvissuþættir eru um þróun jökla á jörðinni og hefur þeim verið skipt í fjóra meginflokkka.<sup>90</sup> Stærsti óvissuþátturinn á seinni hluta 21. aldar varðar losun gróðurhúsalofttegunda og kemur fram í mismunandi loftslagssviðsmyndum. Á fyrri hluta aldarinnar tengist stærsti óvissuþátturinn mismunandi jökla- og lofthjúpslíkönunum. Óvissa vegna náttúrulegs breytileika í veðurfari er um 30% af heildaróvissu í upphafi aldarinnar en minnkar þegar líður á öldina. Þessi óvissa getur tímabundið haft veruleg áhrif á einstök svæði, svo sem Ísland, eyju í miðju Norður-Atlantshafi þar sem breytingar á hafstraumum geta skipt miklu máli.

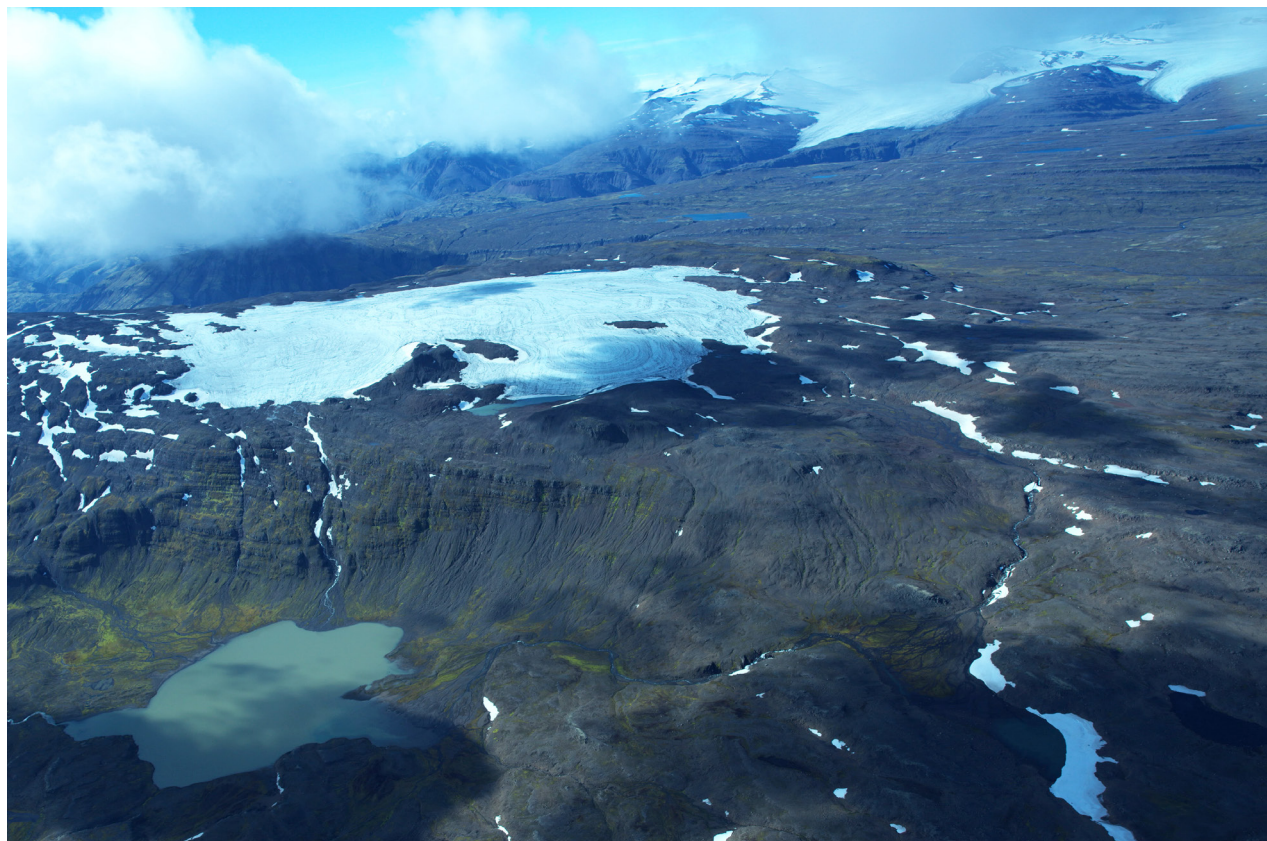
Verði hafsvæðin sunnan Íslands og Grænlands áfram kaldari en nærliggjandi svæði á næstu áratugum, líkt og verið hefur undanfarið, eða ef dregur úr styrk veltihringrásar hafsins í Norður-Atlantshafi, má gera ráð fyrir að rýrnun íslenskra jökla verði hægt fram undir miðja öldina en herði á sér eftir það.<sup>90</sup> Þetta kaldara svæði verður ekki til í öllum lofthjúpslíkönunum og því er mikil óvissa um þróunina hér næstu áratugi. Í sumum líkönunum er hlýnunin suður af landinu meiri, sem myndi leiða til hraðari rýrnunar jökla á Íslandi. Það yrði þá sambærileg við þróun annarra jökla heimsins, eða um 40–50% rýrnun til 2100. Rýrnun jökla á Íslandi á komandi áratugum hefur margvísleg og víðtæk áhrif á náttúru og samfélag. Þegar skriðjökla hörfa myndast jökullón í djúpum dölum sem þeir hafa grafið og hætta eykst á skriðuföllum úr hlíðum sem jöklar lágu áður upp að.<sup>91</sup>

Rennsli jökuláa eykst tímabundið með vaxandi leysingu en þegar stærð jöklanna nær ákveðnum vendipunkti dregur úr rennslinu og rennslisaukningin gengur til baka. Samhliða vaxandi rennsli eykst aurburður í ánum tímabundið. Breytingar á farvegum verða algengar. Sumir farvegir hverfa og aðrir myndast og brýr gætu staðið á þurru.



16. mynd. Fortíð og framtíð Hofsjökuls eystri. Bláar línur sýna útlínur jökulsins frá lokum litlu ísaldar fram til haustsins 2025 með hvítri útlínu og loftmynd sem tekin var í ágúst 2025. Rauðar línur sýna líklega þróun á útlínunum jökulsins miðað við þróunina undanfarin ár.<sup>88</sup> – Past and future of Hofsjökull eystri. The blue lines show the glacier's outlines from the end of the Little Ice Age up to autumn 2025, with a white outline and an aerial photograph taken in August 2025. The red lines show the likely future development of the glacier's outline based on the trends observed in recent years.

Hofsjökull eystri 2024. Ljósmynd /Photo: Birgir Óskarsson



Við rýrnun jökla minnkar farg þeirra á jarðskorpuna og landið rís, einkum nærri jökuljaðrinum. Þetta veldur óvissu um framtíð ýmissa mannvirkja og innviða. Sem dæmi má nefna Hornafjarðarós þar sem landrís er mun hraðara en hækkun sjávarborðs. Ósinn grynnist því stöðugt, sem veldur vandræðum fyrir skipaumferð.

Rýrnun jökla hefur einnig áhrif undir yfirborði jarðar. Farglétting jarðskorpunnar er talin örva kvikuframleiðslu ofarlega í möttlinum og auka líkur á eldgosum þegar frá líður. Hérlandis á þetta einkum við um Vatnajökul.<sup>92</sup> Þessi hugsanlegu tengsl milli rýrnunar jökla og aukinnar eldvirkni minna á hversu margslungin tengsl eru milli breytinga á loftslagi, jöklum og jarðfræði.

Dæmin sem rakin eru hér að framan sýna að rýrnun jökla hefur áhrif bæði á landslag og vistkerfi, náttúruvá, innviði og jafnvel eldvirkni. Hún er áminning um að jöklarnir eru ekki aðeins náttúruundur heldur lykilþáttur í náttúru landsins og breytingar á þeim hafa afleiðingar sem ná langt út fyrir jökuljaðarinn.

## SAMANTEKT

Jöklarnir eru óaðskiljanlegur hluti íslenskrar náttúru og hafa mótað loftslag, vatnafar, landslag og efnahag þjóðarinnar. Rannsóknir sýna að þeir hafa rýrnað frá lokum litlu ísaldar, margir gengu fram þegar kólnaði eftir miðja 20. öld. En jökulrýrnunin hefur verið hröð frá miðjum 10. áratug síðustu aldar. Þessi þróun hefur víðtæk áhrif, allt frá landrís, aukinni kvikuframleiðslu, myndun jökullóna og breyttu rennsli vatnsfalla til áhrifa á samfélagsinnviði, byggð og öryggi ferðamanna.

Með reglulegum mælingum, líkangerð og nýtingu fjarkönnunargagna geta vísindamenn fylgst náið með breytingum jöklanna, skriði þeirra, framhlaupum, flatarmáls- og rúmmálsbreytingum. Rannsóknir á íslenskum jöklum hafa ekki aðeins fært okkur Íslendingum dýrmæta þekkingu heldur einnig lagt mikilvægan skerf til alþjóðlegra jöklarannsókna. Þær hafa veitt innsýn í samspil jökla og eldvirkni, aukið vitneskju um orsakir jökulhlaupa, varpað ljósi á sögu loftslagsbreytinga og bætt skilning á framtíð jöklanna á jörðinni í breyttu loftslagi.

Niðurstöður jöklarannsókna eru grunnur að áreiðanlegu mati á framtíðarþróun jökla og lykilþáttur í aðlögun að loftslagsbreytingum hér á landi. Án kerfisbundinna mælinga, gagnavinnslu og miðlunar minnkar hæfni samfélagsins til þess að bregðast tímanlega við breyttum aðstæðum og nýta tækifæri sem kunna að skapast.

Brýnt er að styrkja langtímavöktun jökla, viðhalda opnum gagnasöfnum og koma skýrum og aðgengilegum upplýsingum til almennings og hagsmunaaðila. Jöklarnir eru náttúruarfur og mikilvæg auðlind fyrir samfélagið. Jöklarannsóknir og fagleg miðlun niðurstaðna eru lykillinn að skynsamlegri stefnu-

mótun og aðlögun að óhjákvæmilegum loftslagsbreytingum af mannavöldum næstu áratuginum.

Síðast en ekki síst: Ef mannkyn nær ekki tókum á losun gróðurhúsalofttegunda er jökullaust Ísland ekki óljós forspá, heldur raunveruleiki sem ófluga nálgast.

## ABSTRACT

Glaciers are an integral part of Iceland's natural environment, shaping its climate, hydrology, landscape, and economy. Research shows that Icelandic glaciers have retreated since the end of the Little Ice Age, with some advances following colder climate after the mid-20th century. Glacier recession has been rapid since the mid-1990s. This ongoing retreat has widespread consequences, including land uplift, changes in river discharge, the formation of pro-glacial lakes, and impacts on infrastructure, settlements, and tourist safety.

Through continuous measurements, modelling, and the use of remote-sensing data, scientists closely monitor changes in glacier dynamics such as ice flow, surges, and variations in area and volume. Studies of Icelandic glaciers have provided not only invaluable local insights but also significant contributions to international glaciology. They have deepened our understanding of glacier-volcano interactions, glacial outburst floods, past climate variations, and the future of glaciers in a warming world.

The results of glaciological research form the foundation for reliable projections of glacier evolution and are essential for developing climate-adaptation strategies in Iceland. Without systematic monitoring, effective data management, and open dissemination of information, society's ability to respond effectively to changing conditions and emerging challenges is weakened. Strengthening long-term glacier monitoring, maintaining open data repositories, and ensuring clear and accessible communication to the public and stakeholders are therefore of utmost importance. Glaciers are a vital part of Iceland's natural heritage and an important national resource. Glaciological research and effective knowledge sharing are key to informed policymaking and adaptation to the inevitable human-driven climate changes of the coming decades. If global greenhouse gas emissions are not curbed, a glacier-free Iceland may not remain a distant possibility - but a rapidly approaching reality, bringing profound transformation to the nation's landscape.

## ÞAKKIR

Við þökkum Þorsteini Jónssyni, Vilhjálmi Kjartanssyni, Sveinbirni Steinþórssyni, Hlyni Skagfjörð Pálssyni, Hannesi H. Haraldssyni, Ragnari Þórhallssyni, Sverrir Guðmundssyni, Ástvaldi Guðmundssyni, sem og sjálfboðaliðum Jöklarannsóknafélags Íslands.

## HEIMILDIR

1. Sameinuðu þjóðirnar 2025. International year of glaciers prevention. Slóð (skoðað 18.11. 2025): <https://www.un-glaciers.org/en>
2. Ólafur Ingólfsson, Hreggviður Norðdahl & Schomacker, A. 2009. Deglaciation and Holocene glacial history of Iceland. *Developments in Quaternary Science* 13. 51–68. doi: 10.1016/S1571-0866(09)01304-9
3. Ívar Örn Benediktsson, Skafti Brynjólfsson & Lovísa Ásbjörnsdóttir 2022. Iceland: Glacial landforms from the Last glacial maximum. Bls. 427–433 (55. kafli) í: *European glacial landscapes: Maximum extent of glaciation* (ritstj. D. Palacios, P.D. Hughes, J.M. García-Ruiz & N. Andrés). Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-12-823498-3.00055-8
4. Krüger, J. 1993. Moraine-ridge formation along a stationary ice front in Iceland. *Boreas* 22(2). 101–109. doi:10.1111/j.1502-3885.1993.tb00169.x
5. Ívar Örn Benediktsson, Schomacker, A., Johnson, M.D., Geiger, A.J., Ólafur Ingólfsson & Esther Rut Guðmundsdóttir 2015. Architecture and structural evolution of an early Little Ice Age terminal moraine at the surge-type glacier Múlajökull, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 120. 1895–1910. doi:10.1002/2015JF003514
6. Snævarr Guðmundsson & Evans, D.J.A. 2022. Geomorphological map of Breiðamerkursandur 2018: The historical evolution of an active temperate glacier foreland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 104. 298–332. doi: 10.1080/04353676.2022.2148083
7. Andri Gunnarsson, Hörður B. Helgason, Óli G.B. Sveinsson & Gunnar G. Tómasson 2024. Climate change, water resources and the hydropower system in Iceland, EGU General Assembly, í Vín 14.–19. apríl 2024. Doi:10.5194/egusphere-egu24-9926
8. Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, Chrochet, P., Elías B. Elíasson, Sverrir Guðmundsson, Jóna Finndís Jónsdóttir, Haraldur Ólafsson, Finnur Pálsson, Ólafur Rögnvaldsson, Oddur Sigurðsson, Árni Snorrason, Óli G.B. Sveinsson & Þorsteinn Þorsteins-son 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. *Orkustofnun, Reykjavík*.
9. Matti, S., Helga Ögmundardóttir, Guðfinna Aðalgeirsdóttir & Reichardt, U. 2022. Communicating risk in glacier tourism: A case study of the Svínafellsheiði fracture in Iceland. *Mountain Research and Development* 42(2). D1–D12. doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00051.1
10. Welling, J. & Abegg, B. 2021. Following the ice: Adaptation processes of glacier tour operators in Southeast Iceland. *International Journal of Biometeorology* 65. 703–715. doi: 10.1007/s00484-019-01779-x
11. Snorri Baldursson 2021. *Vatnajökulsþjóðgarður: Gersemi á heimsvísu*. JPV, Reykjavík. 176 bls.
12. Sigurður Þórarinnsson 1956. The thousand years struggle. Bls. 5–33 í: *The thousand years struggle against ice and fire: Two lectures delivered 21 and 26 February, 1952 at Bedford College, London University*. Höf. S.Þ. Menningarsjóður, Reykjavík.
13. Sigurður Þórarinnsson 1974. Vötnin stríð: Saga Skeiðarárhlaupa og Grímsvatnagosa. *Menningarsjóður, Reykjavík*. 254 bls.
14. Oddur Sigurðsson, Williams, R.S. Jr. & Skúli Víkingsson 2017. *Jöklakort af Íslandi*. 2. útg. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
15. Oddur Sigurðsson & Williams, R.S. Jr. 2008. *Geographic names of Iceland's glaciers: Historic and Modern*. US Geological Survey (Professional Paper 1746), Reston. 232 bls. <https://pubs.usgs.gov/publication/pp1746>. doi:10.3133/pp1746
16. Helgi Björnsson 2016. *The glaciers of Iceland: A historical, cultural and scientific overview*. Atlantis Press, Paris. 613 bls. doi:10.2991/978-94-6239-207-6.
17. Hálfán Ágústsson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Þorsteinn Þorsteins-son, Finnur Pálsson & Björn Oddsson 2013. Mass balance of Mýrdals-jökull ice cap accumulation area and comparison of observed winter balance with simulated precipitation. *Jökull* 63. 91–104. doi: 10.33799/jokull2013.63.091
18. Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Eyjólfur Magnússon, Sveinbjörn Steinþórssón & Hlynur Skagfjörð Pálsson 2025. *Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2023–24*. Landsvirkjun (LV-2025-009), Reykjavík. 56 bls. Slóð (skoðað 21.11. 2025): <https://gogn.lv.is/files/2025/2025-009.pdf>
19. Þorsteinn Þorsteinsón, Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson & Bergur Einarsson 2017. *Afkommumælingar á Hofsjökli 1988–2017*. Veðurstofa Íslands (VÍ 2017-016), Reykjavík. 82 bls.
20. Magnús Tumi Guðmundsson 2000. Mass balance and precipitation on the summit plateau of Öræfajökull, SE-Iceland. *Jökull* 48. 49–54. doi: 10.33799/jokull2000.48.049
21. Crochet, P., Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Oddur Sigurðsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Barstad, I. 2007. Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *Journal of Hydrometeorology* 8. 1285–1306. doi:10.1175/2007JHM795.1
22. Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová & Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. *Aeolian Research* 20. 176–195. doi:10.1016/j.aeolia.2016.01.004
23. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds & Haraldur Ólafsson 2014. Long-term variability of dust events in Iceland (1949–2011). *Atmospheric Chemistry and Physics* 14. 13411–13422. doi: 10.5194/acp-14-13411-2014
24. Helgi Björnsson 1985. The winter balance in Grímsvötn, Vatnajökull, 1950–1985. *Jökull* 35. 107–109. doi: 10.33799/jokull1985.35.107
25. Alexander, D., Shulmeister, J. & Davies, T. 2011. High basal melting rates within high-precipitation temperate glaciers. *Journal of Glaciology* 57. 789–795. doi: 10.3189/002214311798043726
26. Alexander, D., Davies, T. & Shulmeister, J. 2013. Basal melting beneath a fast-flowing temperate tidewater glacier. *Annals of Glaciology* 54(63). 265–271. doi: 10.3189/2013-AoG-63-A-259
27. Oerlemans, J. 2013. A note on the water budget of temperate glaciers. *The Cryosphere* 7. 1557–1564. doi: 10.5194/tc-7-1557-2013
28. Tómas Jóhannesson, Bolli Pálmason, Árni Hjartarson, Jaroch, A.H., Eyjólfur Magnússon, Belart, J.M.-C. & Magnús Tumi Guðmundsson 2020. Non-surface mass balance of glaciers in Iceland. *Journal of Glaciology* 66. 685–697. doi: 10.1017/jog.2020.37
29. Sigurður Þórarinnsson, Williams, R.S. Jr. & Kristján Sæmundsson 1973. ERTS-1 image of Vatnajökull: Analysis of glaciological, structural and volcanic features. *Jökull* 23. 7–17. doi: 10.33799/jokull1973.23.007
30. Williams, R.S. Jr. 1974. Satellite geological and geophysical remote sensing of Iceland. *Progress report, 1 Sep 1973-28 Feb 1974*. US Geological Survey E-74-10467, NASA-CR-136868.
31. Helgi Björnsson & Finnur Pálsson 2020. Radio-echo soundings on Icelandic temperate glaciers: History of techniques and findings. *Annals of Glaciology* 61(8). 25–34. doi: 10.1017/aog.2020.10
32. Jón Eyþórssón 1951. *Fransk-íslenski Vatnajökulsleiðangurinn, marz-apríl 1951*. *Jökull* 1. 10–14. doi: 10.33799/jokull1951.01.010
33. Helgi Björnsson 1982. Drainage basins on Vatnajökull mapped by radio echo soundings. *Hydrology Research* 13(4). 213–232. doi: 10.2166/nh.1982.0018
34. Sveinn Pálsson 1945. *Ferðabók Sveins Pálssonar: Dagbækur og ritgerðir 1791–1797*. Útg., þýð. Jón Eyþórssón, Pálmi Hannesson, Steindór Steindórssón. *Jöklaritið* bls. 423–552. Snælandsútgáfan, Reykjavík. (2. útg. 1984, Örn og Örlygur, Reykjavík).
35. Torell, O. 1858. *Bref om Island. Öfversigt af Kongl. Vetenskaps-Akademiens förhandlingar 1857* 14. 325–335.
36. Sigurður Þórarinnsson 1939. *Vatnajökull: Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936–37–38*. Chapter VIII. Hoffellsjökull, its movements and drainage. *Geografiska Annaler* 21. 189–215.
37. Ives, J.D. & King, C.A.M. 1954. Glaciological observations on Morsárjökull, S.W. Vatnajökull. Pt. I: The ogive banding. *Journal of Glaciology* 2(16). 423–428. doi: 10.3189/002214354793702443
38. Ives, J.D. & King, C.A.M. 1955. Glaciological observations on Morsárjökull, S.W. Vatnajökull. Pt. II: Regime of the glacier, present and past. *Journal of Glaciology* 2(17). 477–482. doi: 10.3189/002214355793702325
39. Wuite, J., Libert, L., Nagler, T. & Tómas Jóhannesson 2022. Continuous monitoring of ice dynamics in Iceland with Sentinel-1 satellite radar images. *Jökull* 72. 1–20. doi: 10.33799/jokull2022.72.001

40. Eyjólfur Magnússon, Helgi Björnsson, Rott, H., Roberts, M.J., Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Bennett, R.A., Halldór Geirsson & Sturkell, E. 2011. Localized uplift of Vatnajökull, Iceland: Subglacial water accumulation deduced from InSAR and GPS observations. *Journal of Glaciology* 57. 475–484. doi: 10.3189/002214311796905703
41. Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir & Helgi Björnsson 1996. Brúarjökull. Framhlaupið 1963–1964 og áhrif þess á rennsli Jökulsár á Brú. Raunvísindastofnun Háskólans (RH-11-96), Reykjavík. 34 bls.
42. Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson & Flowers, G.E. 2003. Surges of glaciers in Iceland. *Annals of Glaciology* 36. 82–90. doi: 10.3189/172756403781816365
43. Sigurður Þórarinnsson 1969. Glacier surges in Iceland, with special reference to the surges of Brúarjökull. *Canadian Journal of Earth Sciences* 6(4). 875–882.
44. Ingibjörg Kaldal, Oddur Sigurðsson & Skúli Víkingsson 2001. Framhlaup Brúarjökuls á sögulegum tíma. *Glettingur* 11(2–3). 26–30.
45. Ívar Örn Benediktsson, Möller, P., Ólafur Ingólfsson, van der Meer, J.J.M., Kjær, K.H. & Krüger, J. 2008. Instantaneous end moraine and sediment wedge formation during the 1890 glacier surge of Brúarjökull, Iceland. *Quaternary Science Reviews* 27 (3–4). 209–234. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.10.007
46. Ívar Örn Benediktsson, Ólafur Ingólfsson, 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. doi: 10.1111/j.1502-3885.2008.00077.x
47. Ívar Örn Benediktsson, Sverrir A. Jónsson, Schomacker, A., Johnson, M.D., Ólafur Ingólfsson, Zoet, L., Iverson, N.R. & Stötter, J. 2016. Progressive formation of modern drumlins at Múlajökull, Iceland: Stratigraphical and morphological evidence. *Boreas* 45(4). 567–583. doi: 10.1111/bor.12195
48. Óskar Knudsen 1995. Concertina eskers, Brúarjökull, Iceland: An indicator of surge-type glacier behaviour. *Quaternary Science Reviews* 14(5). 487–493. doi: 10.1016/0277-3791(95)00018-K
49. Ólafur Ingólfsson, Ívar Örn Benediktsson, Schomacker, A, Kjær, K.H., Skafti Brynjólfsson, Sverrir A. Jónsson, Korsgaard, N.J. & Johnson, M.D. 2016. Glacial geological studies of surge-type glaciers in Iceland Research status and future challenges. *Earth Sciences Reviews* 152. 37–69. doi: 10.1016/j.earsci-rev.2015.11.008
50. Evans, D.J.A., Twigg, D.R., Rea, B.R. & Shand, M. 2007. Surficial geology and geomorphology of the Brúarjökull surging glacier landsystem. *Journal of Maps* 3(1). 349–367. doi: 10.4113/jom.2007.94
51. Schomacker, A., Ívar Örn Benediktsson & Ólafur Ingólfsson 2014. The Eyjabakkajökull glacial landsystem, Iceland: Geomorphic impact of multiple surges. *Geomorphology* 218. 98–107. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.07.005
52. Kamb, B., Raymond, C.F., Harrison, W.D., Engelhardt, H., Echelmayer, K.A., Humphrey, N., Brugmann, M.M. & Pfeffer, T. 1985. Glacier surge mechanism: 1982–1983 Surge of Variegated glacier, Alaska. *Science* 227. 469–479. doi: 10.1126/science.227.4686.469
53. Helgi Björnsson 1998. Hydrological characteristics of the drainage system beneath a surging glacier. *Nature* 395. 771–774. doi: 10.1038/27384
54. Raymond, C.F. 1987. How do glaciers surge? A review. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92(89). 9121–9134. doi: 10.1029/JB092iB09p09121
55. Sevestre, H. & Benn, D.I. 2015. Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: Implications for a unifying model of surging. *Journal of Glaciology* 61. 646–662. doi: 10.3189/2015JG14J136
56. Carrivick, J.L., Tweed, F.S., James, W.M. & Tómas Jóhannesson 2016. Surface and geometry changes during the first documented surge of Kverkjökull, central Iceland. *Jökull* 66. 27–49 (2016). doi: 10.33799/jokull2016.66.027
57. Eyjólfur Magnússon, Rott, H., Helgi Björnsson & Finnur Pálsson 2007. The impact of jökulhlaups on basal sliding observed by SAR interferometry on Vatnajökull, Iceland. *Journal of Glaciology*. 53(181). 232–240. doi: 10.3189/172756507782202810
58. Helgi Björnsson 1976. Glacier lakes and explanation of jökulhlaups. Í: Nordic Hydrological Conference, Reykjavík ágúst og september 1976. 64–74.
59. Helgi Björnsson 1975. Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull* 25. 1–14. doi: 10.33799/jokull1975.25.001
60. Helgi Björnsson 1974. Explanation of jökulhlaups from Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland. *Jökull* 24. 1–26. doi: 10.33799/jokull1974.24.001
61. Nye, J.F. 1976. Water flow in glaciers: Jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology* 17(76). 181–207. doi: 10.3189/S00221430001354X
62. Magnús Tumi Guðmundsson & Guðrún Þorgerður Larsen. Jökulhlaup. Bls. 156–170 í: Náttúruvá á Íslandi. Eldgos og jarðskjálftar (ritstj. Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson, Bjarni Bessason). Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan, Reykjavík. 786 bls.
63. Árni Snorrason, Páll Jónsson, Svanur Pálsson, Sigvaldi Árnason, Oddur Sigurðsson, Skúli Víkingsson, Ásgeir Sigurðsson og Snorri Zóphóníason 1997. Hlaupið á Skeiðarársandi haustið 1996: Útbreiðsla, rennsli og aurburður. Bls. 79–137 í: Vatnajökull – Gos og hlaup. Skýrsla Raunvísindastofnunar Háskólans og Orkustofnunar fyrir Vegagerðina (ritstj. Hreinn Haraldsson). Raunvísindastofnun Háskólans og Orkustofnun, Reykjavík. 184 bls.
64. Haukur Tómasson 1996. The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology* 22. 249–254. doi: 10.3189/1996AoG22-1-249-254
65. Oddur Sigurðsson & Bergur Einarsson 2005. Jökulhlaupaannáll 1989–2004. Orkustofnun (OS-2005/031), Reykjavík. 46 bls.
66. Þorsteinn Þorsteinsson, Kristjana G. Eyþórsdóttir, Esther Hlíðar Jensen, Ingibjörg Jónsdóttir, Finnur Pálsson, Gunnar Sigurðsson, Andri Gunnarsson, Hlynur Skagfjörð Pálsson, Ragnar H. Þrastarson, Oddur Sigurðsson, Tómas Jóhannesson & Roberts, M.J. 2021. Jökulhlaup úr Hafrafellslóni við Langjökul. Veðurstofa Íslands (VÍ 2001/001), Reykjavík. 33 bls.
67. Helgi Björnsson 1997. Grímsvatnahlaup fyrr og nú. Bls. 61–77 í: Vatnajökull – Gos og hlaup. Skýrsla Raunvísindastofnunar Háskólans og Orkustofnunar fyrir Vegagerðina (ritstj. Hreinn Haraldsson). Raunvísindastofnun Háskólans og Orkustofnun, Reykjavík. 184 bls.
68. Nielsen, N. 1937. Vatnajökull: Kampen mellem Ild og Is. Hagerup, Kaupmannahöfn. 123 bls.
69. Sigurjón Rist 1955. Skeiðarárhlaup 1954. *Jökull* 5. 30–36.
70. Sigurður Þórarinnsson 1939. Vatnajökull: Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936–37–38. Chapter IX. The ice dammed lakes of Iceland with particular reference to their values as indicators of glacier oscillations. *Geografiske Annaler* 21. 216–242.
71. Sigurður Þórarinnsson & Steinþór Sigurðsson 1947. Volcano-glaciological investigations in Iceland during the last decade. *Polar Record* 5. 33–34, 60–64.
72. Sigurjón Rist 1973. Jökulhlaupaannáll 1971, 1972 og 1973. *Jökull* 23. 55–60. doi: 10.33799/jokull1973.23.0550
73. Helgi Björnsson 2003. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change* 35(3–4). 255–271. doi: 10.1016/S0921-8181(02)00130-3
74. Tómas Jóhannesson 2002. Propagation of a subglacial flood wave during the initiation of a jökulhlaup. *Hydrological Scientific Journal* 47(3). 417–434. doi: 10.1080/02626660209492944
75. Bergur Einarsson, Eyjólfur Magnússon, Roberts, M.J., Finnur Pálsson, Þorsteinn Þorsteinsson 2016. A spectrum of jökulhlaup dynamics revealed by GPS measurements of glacier surface motion. *Annals of Glaciology* 57(72). 47–61. doi: 10.1017/aog.2016.8
76. Halldór Björnsson, Anna Hulda Ólafsdóttir, Bjarni Diðrik Sigurðsson, Borgný Katrínardóttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Gígja Gunnarsdóttir, Guðfinna Th. Aðalgeirsdóttir, Guðjón Már Sigurðsson, Helga Ögmundardóttir, Hildur Pétursdóttir, Hlynur Bárðarson, Starri Heiðmarsson og Theódóra Matthíasdóttir 2023. Umfang og afleiðingar hnattrænna loftslagsbreytinga á Íslandi: Fjórða samantektarskýrsla Vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Veðurstofa Íslands, Reykjavík. 467 bls.
77. Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Ragnar H. Þrastarson, Snævarr Guðmundsson, Belart, J.M.-C., Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Skúli Víkingsson, Ingibjörg Kaldal & Tómas Jóhannesson 2020. A national glacier inventory and variations in glacier extent in Iceland from the Little Ice Age maximum to 2019. *Jökull* 70. 1–34. doi: 10.33799/jokull.70.001

78. Jón Eyþórsson 1963. Variations of Icelandic glaciers 1931–1960. *Jökull* 13. 31–33. doi: 10.33799/jokull1963.13.031
79. Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Bergur Einarsson, & Snævarr Guðmundsson 2020. Að fóstora jökul. *Jökull* 70. 87–109. doi: 10.33799/jokull2020.70.087o
80. Bergur Einarsson & Oddur Sigurðsson 2015. Jöklabreytingar 1930–1970, 1970–1995, 1995–2013 og 2013–2014. *Jökull* 65. 91–96. doi: 10.33799/jokull2015.65.091o
81. Hrafnhildur Hannesdóttir 2024. Jökulsporðamælingar 2023–2024. *Jökull* 74. 87–98. doi: 10.33799/jokull2024.74.087o
82. Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Belart, J.M.-C., Tómas Jóhannesson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Andri Gunnarsson, Bergur Einarsson, Berthier, E., Schmidt, L.S., Hannes H. Haraldsson & Helgi Björnsson 2020. Glacier changes in Iceland from ~1890 to 2019. *Frontiers in Earth Science* 8. 520. doi: 10.3389/feart.2020.523646
83. Bahr, D.B., Pfeffer, W.T. & Kaser, G. 2015. A review of volume-area scaling of glaciers. *Reviews of Geophysics* 53. 95–140. doi: 10.1002/2014RG000470
84. Wells, G.H., Þorsteinn Sæmundsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Hermanns, R.L. & Snævarr Guðmundsson 2025. Proglacial lake development and outburst flood hazard at Fjallsjökull glacier, southeast Iceland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 25. 1913–1936. doi: 10.5194/nhess-25-1913-2025
85. Zekollari, H., Schuster, L., Maussion, F., Hock, R., Marzeion, B., Rounce, D.R., Compagno, L., Fujita, K., Huss, M., James, M., Kraaijenbrink, P.D.A., Lipscomb, W.H., Minallah, S., Oberrauch, M., van Tricht, L., Champollion, N., Edwards, T., Farinotti, D., Immerzeel, W., Leguy, G. & Sakai, A. 2025. Glacier preservation doubled by limiting warming to 1.5°C versus 2.7°C. *Science* 388. 979–983. doi: 10.1126/science.adu4675
86. Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier, E., Brinkerhoff, D., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B. & McNabb, R.W. 2023. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science* 379. 78–83. doi:10.1126/science.abo1324
87. Schmidt, L.S., Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Langen, P.L., Sverrir Guðmundsson & Helgi Björnsson 2020. Dynamic simulations of Vatnajökull ice cap from 1980 to 2300. *Journal of Glaciology* 66. 97–112. doi: 10.1017/jog.2019.90
88. Snævarr Guðmundsson, Eyjólfur Magnússon, Belart, J.M.-C., Hrafnhildur Hannesdóttir & Guðfinna Aðalgeirsdóttir 2025. The fate of two Icelandic glaciers in warming climate: Hofsjökull eystri and Okjökull. *Annals of Glaciology*. 1–17. doi:10.1017/aog.2025.10026
89. Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R.H., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radić, V. & Slangen, A.B.A. 2019. GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology* 65. 453–467. doi: 10.1017/jog.2019.22
90. Marzeion, B., Hock, R., Anderson, B., Bliss, A., Champollion, N., Fujita, K., Huss, M., Immerzeel, W.W., Kraaijenbrink, P., Malles, J.-H., Maussion, F., Radić, V., Rounce, D.R., Sakai, A., Shannon, S., van de Wal, R. & Zekollari, H. 2020. Partitioning the uncertainty of ensemble projections of global glacier mass change. *Earth's Future* 8(7). e2019EF001470 (2020). doi: 10.1029/2019EF001470
91. Noël, B., Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Wouters, B., Lhermitte, S., Haacker, J.M. & van den Broeke, M.R. 2022. North Atlantic cooling is slowing down mass loss of Icelandic glaciers. *Geophysical Research Letters* 49. e2021GL095697. doi: 10.1029/2021GL095697
92. Freysteinn Sigmundsson, Parks, M., Halldór Geirsson, Albino, F., Schmidt, P., Li, S., Finnur Pálsson, Benedikt G. Ófeigsson, Drouin, V., Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Hooper, A., Sigrún Hreinsdóttir, MacLennan, J., Sturkell, E. & Trasatti, E. 2024. Influence of climate change on magmatic processes: What does geodesy and modeling of geodetic data tell us? *Bls.* 287–299 (15. kafli) í: *GNSS monitoring of the terrestrial environment: Earthquakes, volcanoes, and climate change* (ritstj. Y. Aoki, C. Kreemer). Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-323-95507-2.00013-X
93. Berthier, E., Lebreton, J., Fontannaz, D., Hosford, S., Belart, J.M.-C., Brun, F., Andreassen, L.M., Menounos, B. & Blondel, C. 2024. The Pléiades Glacier Observatory: High-resolution digital elevation models and ortho-imagery to monitor glacier change. *The Cryosphere* 18. 5551–5571. doi: 10.5194/tc-18-5551-2024
94. Berthier, E., Vincent, C., Eyjólfur Magnússon, Ágúst Þór Gunnlaugsson, Pitter, P., Le Meur, E., Masiokas, M., Ruiz, L., Finnur Pálsson, Belart, J.M.-C. & Wagnon, P. 2014. Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *The Cryosphere* 8. 2275–2291. doi: 10.5194/tc-8-2275-2014

## HÖFUNDAR

Andri Gunnarsson (f. 1983) jöklafræðingur  
Landsvirkjun  
andrigun@lv.is

Hrafnhildur Hannesdóttir (f. 1977) jöklafræðingur  
Veðurstofu Íslands  
hh@vedur.is

Finnur Pálsson (f. 1956) jöklafræðingur  
Jarðvísindastofnun Háskólans  
fp@hi.is

Tómas Jóhannesson (f. 1957) jöklafræðingur  
Veðurstofu Íslands  
tj@vedur.is

Eyjólfur Magnússon (f. 1976) jöklafræðingur  
Jarðvísindastofnun Háskólans  
eyjolfm@hi.is

Þorsteinn Þorsteinsson (f. 1960) jöklafræðingur  
Veðurstofu Íslands  
thor@vedur.is

Bergur Einarsson (f. 1981) jöklafræðingur  
Veðurstofu Íslands  
bergur@vedur.is

Guðfinna Th. Aðalgeirsdóttir (f. 1972) jöklafræðingur  
Jarðvísindastofnun Háskólans  
gua@hi.is

Joaquín M.-C. Belart (f. 1989) jarðeðlisfræðingur  
Náttúrufræðistofnun  
joaquin.m.belart@natt.is

Oddur Sigurðsson (f. 1945) jarðfræðingur  
Veðurstofu Íslands  
oddur@vedur.is

Snævarr Guðmundsson (f. 1963) jöklafræðingur  
Náttúrustofu Suðausturlands  
snaevarr@natt.sa.is

Helgi Björnsson (f. 1942) jöklafræðingur  
Jarðvísindastofnun Háskólans  
hb@hi.is



Andri Gunnarsson  
Hrafnhildur Hannesdóttir

# Sjötíu og fimm ár á jöklum

## Jöklarannsóknafélag Íslands

Í Kverkfjöllum stendur skáli félagsins í magnaðri umgjörð elds og íss. Herðubreið sést í bakgrunni.  
Ljós.: Andri Gunnarsson

Að kvöldi miðvikudagsins 22. nóvember 1950 var í Reykjavík haldinn stofnfundur nýs félags sem hafði það að markmiði að rannsaka jökla landsins og auðvelða ferðir um þá. Var stofnfundurinn haldinn á veitingastaðnum Tjarnarkaffi í Oddfellowhúsinu og komu þar um fimmtíu manns. Í mars 1951 var haldinn framhaldsfundur á sama stað, lög samþykkt og fyrsta stjórn félagsins kosin. Félagið fékk nafnið Jöklarannsóknafélag Íslands.

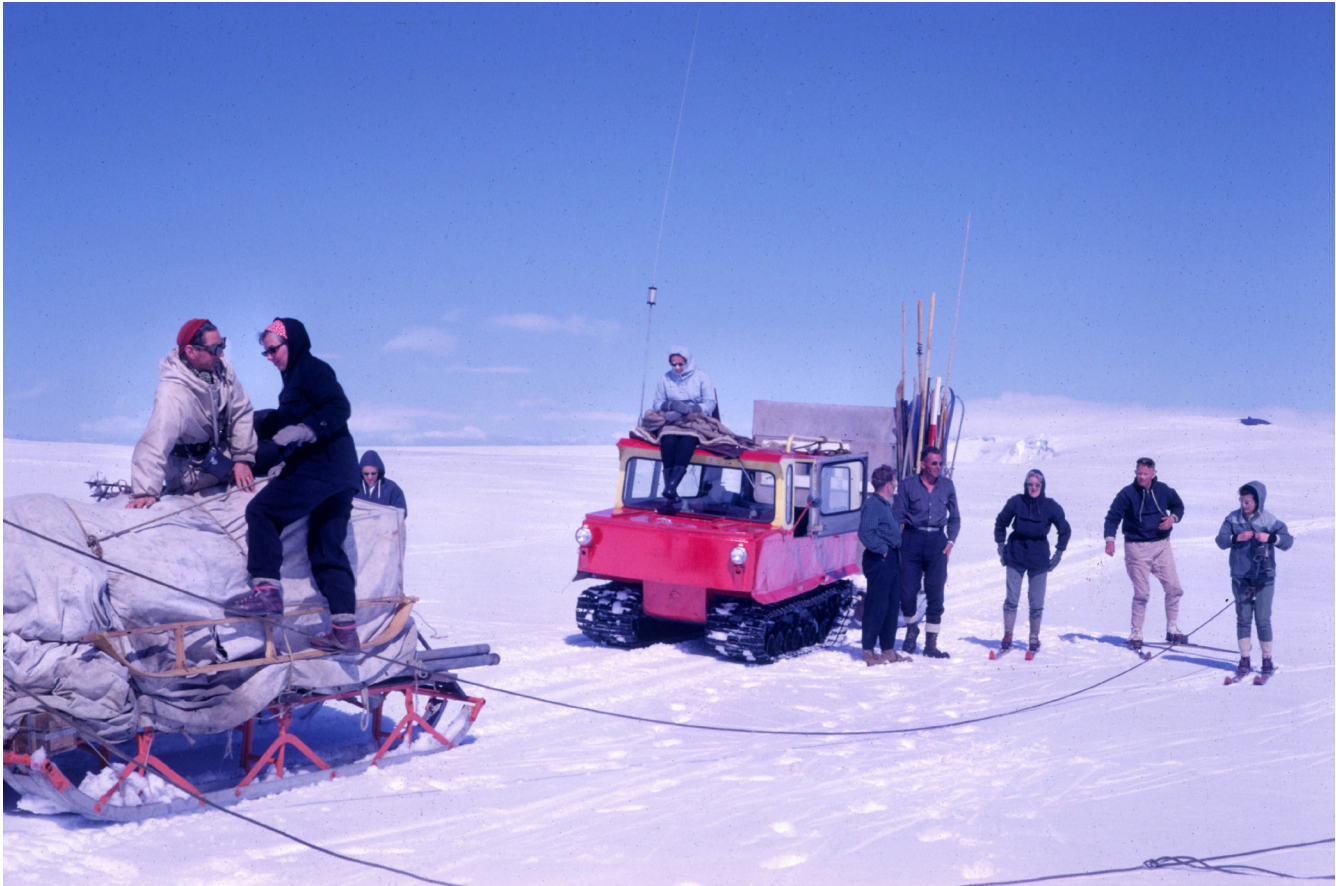
Markmið nýja félagsins var að stuðla að rannsóknnum og ferðalögum á jöklum landsins, gefa út tímaritið Jökul, ásamt fréttabréfi, og skipuleggja fræðslufundi og myndasýningar um jökla. Samstarf vísindamanna og áhugafólks um fjalla- og skíðaferðir hafði hafist nokkrum árum áður.

Síðustu ár hefur félagið einnig sinnt fræðslu um jökla á stafrænum miðlum. Það rekur meðal annars vefsetur, Facebook-síðu, birtir myndasöfn í eigu félagsins á sérstakri ljósmyndasíðu og hægt er að nálgast upptökur af fræðslufundum, gömul myndbönd og fleira á Youtube-rás félagsins.

### FRUMKVÖÐULLINN JÓN EYÞÓRSSON

Fyrsti formaður félagsins og helsti drifkraftur að stofnun þess var veðurfræðingurinn Jón Eyþórsson, sem þá þegar hafði lagt grunn að kerfisbundnum jöklarannsóknum hér á landi. Hann hóf mælingar á jökulsporðum árið 1930 í samstarfi við heimamenn, leiddi sænsk-íslenska leiðangurinn á Vatnajökul 1936 ásamt Hans Ahlmann og vann með Steinþóri Sigurðssyni við ýmsar mælingar á Mýrdalsjökli 1943–44. Á þessum árum voru rannsóknastofnanir á Íslandi óburðugar og höfðu takmarkað fjármagn til að sinna verkefnum og rannsóknum.

Eitt af fyrstu verkefnum félagsins var fransk-íslenski leiðangurinn árið 1951, samstarfsverkefni Rannsóknaráðs ríkisins og Heimskautaleiðangursstofnunarinnar sem franskri mannfræðingurinn og landkönnuðurinn Paul-Émile Victor stóð fyrir. Leiðangurinn fór á Vatnajökul um Breiðamerkurjökul, þar sem meðal annars voru gerðar mælingar til að meta ísþykkt jökulsins í fyrsta skipti.



Hópur vísinda- og ferðafólks í vorferð á Vatnajökli vorið 1962.  
Ljóm.: Árni Kjartansson

## SKÁLAR RÍSA

Samhliða fransk-íslenska leiðangrinum var braggi fluttur upp í Esjufjöll og annar braggi settur niður á Breiðamerkursandi. Hinn síðarnefndi, Breiðá, stendur enn og er elsta rannsóknahús landsins reist sérstaklega til jöklarannsóknna. Skálanum tveim var ætlað að tryggja gott aðgengi fyrir leiðangra á Vatnajökul en snemma varð ljóst að það væri lyklatríði fyrir rannsókniferðir.

Haustið 1950 fundu Guðmundur Jónasson og Egill Kristbjörnsson nýtt vað yfir Tungnaá, við suðvestanverðan Vatnajökul. Það var nefnt Hófsvað og dregur nafn sitt af hnúki einum sem stendur austur undir Vatnaöldum og ber nafnið Hófurinn. Vaðið opnaði leiðina inn í Veiðivötn og Jökulheima og auðveldaði jöklaflóki mjög aðkomu að Vatnajökli.

Félagið reisti fyrstu skálana í Jökulheimum árið 1955 og á Eystri Svíahnjúk á Grímsfjalli árið 1957. Þessi hús hafa í gegnum tíðina verið best nýtt af skálum félagsins, enda við eina af aðalleiðunum upp Tungnaárjökul. Hins vegar hefur í seinni tíð oftar verið farið upp Skálafellsjökul þegar haldið er á Grímsfjall. Á fyrsta áratug Jöklarannsóknafélags Íslands (JÖRFÍ) mótaðist grunnstarfsemi þess; árlegar rannsókniferðir á Vatnajökul, vetrarfundir í Reykjavík og útgáfa tímaritsins Jökuls. Á áttunda áratugnum risu fjórir litlir skálar, í Esjufjöllum,

við Goðahnjúka, í Kverkfjöllum og við Fjallkirkju í Langjökli. Árið 1987 varð bylting í aðstöðu á Grímsfjalli þegar þangað var fluttur nýr 60 fermetra skáli. Þar er nú fullbúin aðstaða fyrir mælingar og vöktun náttúruvár. Árið 2002 var sett upp rafstöð á fjallinu sem breytti öllum aðstæðum til reksturs á mælitækjum og fjarskiptabúnaði. Nú eru á Grímsfjalli virkar vöktunarstöðvar sem hafa bæði vísindalegan og öryggistengdan tilgang. Húsin á Grímsfjalli eru hituð með jarðhita, og þar er sturta og gufubað sem koma í góðar þarfir eftir langa vinnudaga á jökli. Nýtt hús var flutt í Esjufjöll árið 2002 eftir vonskuveður sem eyðilagði fyrri skála árið 1999. Árið 2021 var bætt við kamri í Esjufjöllum til að auðvelda veruna þar og vorið 2025 var fluttur sambærilegur kamar í Kverkfjöll. Alla vinnu við smíði og viðhald skálanna hefur félagsfólk unnið í sjálfböðavinnu.

## VORFERÐIR Á VATNAJÖKUL

Fyrsta vorferð á Vatnajökul var farin árið 1953 undir forystu Árna Kjartanssonar og eru þær árlegu ferðir lyklatríði í starfsemi félagsins. Vorferðirnar eru jafnan farnar um mánaðamótin maí-júní og standa yfir í eina til tvær vikur. Vorferðirnar sköpuðu vettvang fyrir jöklarannsóknir á tímum



Veðurstöð mokuð upp í Grímsvötnum í vorferð.  
Ljós.: Finnur Pálsson

Þegar rannsóknastofnanir voru varla til og styrkir til mælinga fáir. Vorferðirnar hafa í gegnum tíðina leitt til þess að mörg rannsóknaverkefni hafa orðið að veruleika og þær hafa gefið fjölda fólks tækifæri til að komast á jökul. Í ferðunum hefur verið lagður grunnur að margvíslegri þekkingu sem við búum yfir um Vatnajökul og landið undir honum, um jökulhlaup, jarðhita og eldgos á þessu eldvirkasta svæði landsins. Á rúmlega 70 ára tímabili hafa mörg hundruð manns tekið þátt í ferðunum. Samstilltur hópur félagsmanna sér um flutning fólks og tækjabúnaðar og félagið greiðir hluta kostnaðar af útgerðinni á jöklinum.

Jöklarannsóknafélagið hefur átt fjölmörg ökutæki til að auðvelda ferðalög og rannsóknir á jöklum landsins. Hafa þau verið forsenda árangursríkra leiðangra. Félagið eignaðist sinn fyrsta snjóbíl 1952 og fram til 1990 voru slíkir beltabílar ráðandi í jöklaferðum. Í seinni tíð hafa breyttir jeppar og vélsleðar komið til sögunnar sem helstu farartækin. Öflugir snjóbílar gegna þó enn lykilhlutverki við ýmsa þungaflutninga.

## GRÍMSFJALL OG GRÍMSVÖTN

Megináherslur félagsins hafa alla tíð verið stuðningur við rannsóknir og uppbygging aðstöðu. Sérstök

áhersla hefur verið lögð á Grímsvötn og Grímsfjall. Sjálfböðaliðar og vísindamenn hafa sameinað krafta sína í vorferðum þar sem meðal annars hefur verið mæld ísþykkt, afkoma, viðhald og uppsetning á veðurstöðvum, auk fjölda annara rannsóknarverkefna. Þannig var staðfest árið 1960 að Vatnajökull væri þíðjökull og árið 1972 náðist úr suðurhlíðum Bárðarbungu 415 metra ískjarni, sá lengsti sem tekinn hefur verið í þíðjökli. Afkomumælingar í Grímsvötnum eru lengstu samfelldu afkomumælingar á Íslandi og ná að mestu frá 1953. Eftir eldgosíð í Gjalp 1996 ákvað félagið að styðja við rannsóknir á eldgosum og áhrifum þeirra á jökulinn. Þessar rannsóknir hafa síðan verið eitt helsta verkefnið í vorferðum. Auk þess hefur félagið stutt kerfisbundnar afkomumælingar á Vatnajökli með þátttöku félagsfólks. Undanfarin ár hefur í vorferðum gjarnan verið unnið að verkefnum ýmissa stofnana (Jarðvísindastofnunar Háskólans, Landsvirkjunar og Veðurstofu Íslands), svo sem viðhaldi á veðurstöðvum, jarðskjálfta- og GPS-stöðvum, gerðar eru afkomumælingar og gasmælingar í eldstöðvum Grímsvatna, Bárðarbungu og Kverkfjalla. Í ferðunum er viðhaldi á skálum einnig sinnt og framhaldsnemendur fá tækifæri til að sinna rannsóknarverkefnum á jöklinum og öðlast dýrmæta reynslu.



Skálinn í Jökulheimum sumarið 1955. Ljós.: Ópekkur



Sjálfbóðaliði við sporðamælingar á Sólheimajökli 1970.  
Ljós.: Valur Jóhannesson



Tjaldbúðir við einn af fyrstu skálum félagsins. Við Breiðá á  
Breiðamerkursandi sumarið 1975. Ljós.: Valur Jóhannesson



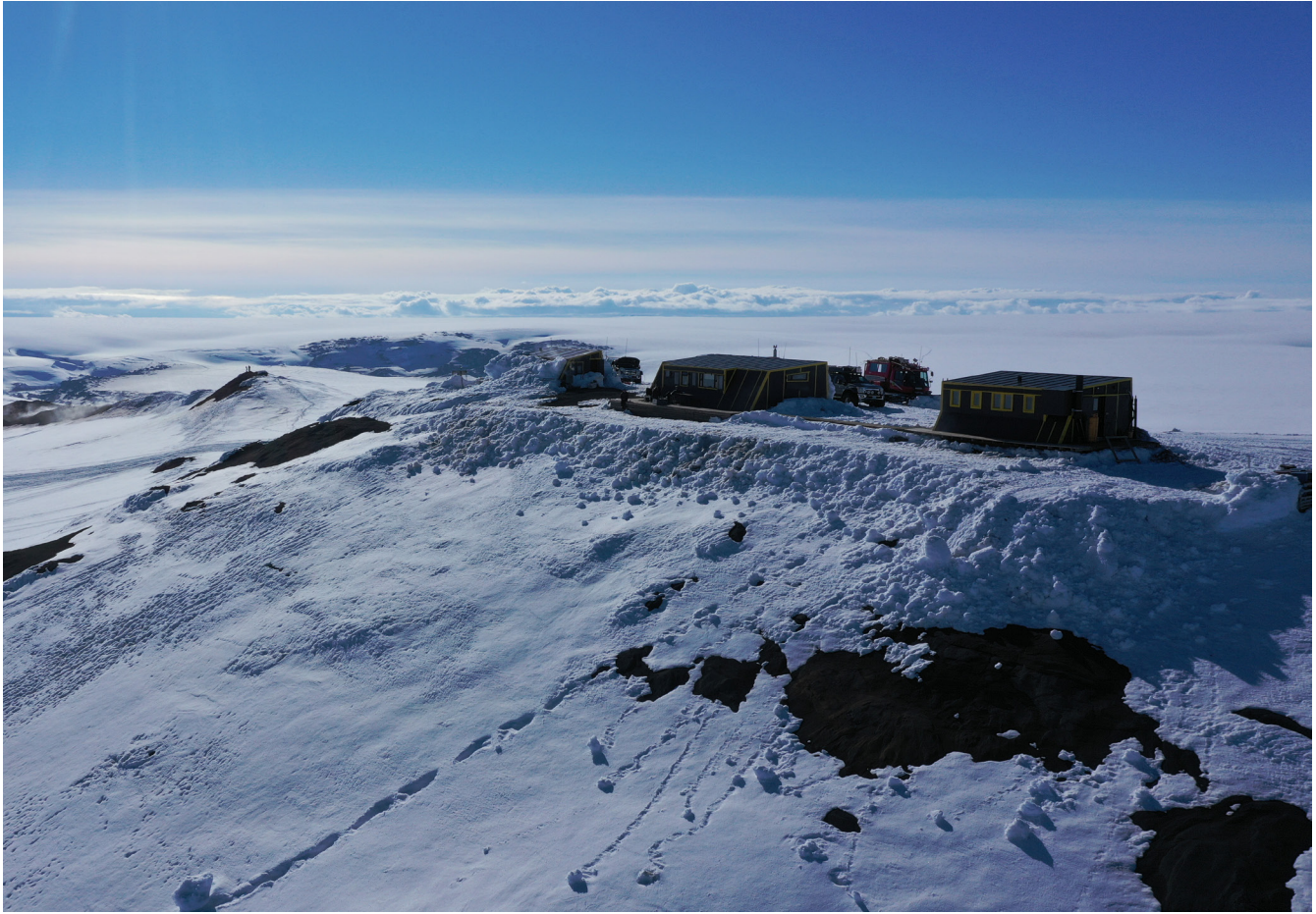
Skálinn í Jökulheimum sumarið 2023. Ljós.: Hrafnhildur Hannesdóttir



Afkomumæling í Grímsvötnum júní 2010. Ljós.: Brynjar Gunnarsson



Jeppar af öllum stærðum og gerðum flytja búnað, tæki og tól niður Tungnaárjökul á leið heim úr vorferð 2007. Ljós.: Finnur Pálsson



Skálar félagsins á Grímsfjalli, horft til suðvesturs. Skálarnir eru bækistöð fyrir flesta rannsóknaleiðangra á jöklinum og gegna lykhlutverki við vöktun náttúruvár á svæðinu. Ljós m.: Andri Gunnarsson

Jöklarannsóknafélagið hefur frá árinu 2001 skipulagt vorleiðangra á Mýrdalsjökul. Afkoma hefur verið mæld í nokkrum punktum og ýmsum öðrum rannsóknarverkefnum sinnt með þátttöku stofnana og sjálfboðaliða.

### SPORÐAMÆLINGAR SJÁLFBODALIÐA

Jökulsporðamælingar hófust 1930, tuttugu árum áður en félagið var stofnað en urðu strax eitt af helstu verkefnum þess. Þær hafa verið í höndum sjálfboðaliða, fyrstu áratugin í höndum heimafólks í nágrenni jökla. Þær ná nú yfir 95 ára samfelld tímabil og eru stundaðar við jökla um allt land. Þessar mælingar varpa ljósi á þróun jökla á Íslandi og samband þeirra við breytingar á loftslagi. Þær eru mikilvæg heimild um jöklabreytingar, lýsa hörfun þeirra og framgangi, og einnig framhlaupunum. Frá því verkefnið hófst hafa mælingar farið fram á um 120 stöðum, mislengi á hverjum þeirra og alls hafa tæplega 200 manns skilað inn gögnum, en aðstoðarmenn eru mun fleiri. Mælingunum eru gerð skil á jöklavefsjá ([www.islenskir-joklar.is](http://www.islenskir-joklar.is)), í tímariti félagsins og í alþjóðlegu gagnasafni um breytingar á stöðu sporða um allan heim.

### TÍMARITIÐ JÖKULL FRÁ 1951

Jöklarannsóknafélagið hóf útgáfu tímarits strax árið 1951 en frá 1977 hefur það verið gefið út í samstarfi við Jarðfræðafélag Íslands. Jökull er fagttímarit um jarðvísindi á Íslandi, og jafnframt málagn félaganna. Í fyrstu árgöngum Jökuls voru flestar greinarnar um mælingar á jöklum og svo leiðangurs- og ferðalýsingar. Forsvarsmenn félagsins, þeir Jón Eyþórsson, Sigurður Þórarinnsson og Sigurjón Rist, skrifuðu flestar þessara greina ásamt vísindamönnum sem stunduðu rannsóknir á Vatnajökli. Fljótlega varð Jökull þó að lykiltímariti um jarðvísindi á Íslandi og er nú langmesta safn fræðigreina sem til er um jarðfræði Íslands. Í Jökli hafa birst yfir 430 vísindagreinar. Frá og með fjórða árgangi Jökuls árið 1954 hafa flestar vísindagreinar verið á ensku með íslensku ágripi og myndatextum, en félagsefni á íslensku. Ritstjórn tímaritsins hefur alla tíð verið í höndum ósérhlífins áhugafólks og vísindamanna úr röðum félagsins. Tímaritið má finna á slóðinni: [www.jokull.jorfi.is](http://www.jokull.jorfi.is).



Sjónskífa sem er hluti af verkefninu Jöklasýn. Skaftafellsjökull sést í bakgrunni.  
Ljósni.: Kieran Baxter

## JÖKLASÝN

Árið 2022 hóf Jöklarannsóknafélagið samstarf um myndræna jöklavöktun við bandaríska ljósmyndarann James Balog, sem rak verkefnið „Extreme Ice Survey“ (EIS) til margra ára út um allan heim. Á síðastliðnum árum hafa verið valdir ákveðnir staðir og sjónarhorn til þess að skrásetja breytingar á jöklum með þátttöku almennings og vísindafólks. Verkefnið kallast Jöklasýn (e. Extreme Ice Survey Iceland) og er markmið þess að safna ljósmyndum í aðgengilegan gagnabanka um breytingar á íslenskum jöklum næstu um það bil 100 árin (<http://www.eisi.jorfi.is/>). Settar hafa verið upp á tveimur stöðum sérsníðaðar sjónskífur með símastatífi með góðu útsýni yfir Skaftafellsjökul og Skálafellsjökul. Sjónskífurnar eru úr bronsi og koma úr smiðju bræðranna í Málmsteyppunni Hellu. Einnig hafa verið settir upp þrífætur fyrir myndavélar á fáfarnari stöðum, t.a.m. á Hamrinum í vestanverðum Vatnajökli, á jökulskerjunum Vetti í Skeiðarárjökli

og Káraskeri í Breiðamerkurjökli. Þátttakendur senda ljósmyndirnar rafrænt í gegnum sérstaka gátt og verða þær hluti af gagnabankanum um jöklabreytingar.

## ÁRANGUR

Grundvöllur félagsins er þátttaka sjálfbóðaliða hvaðanæva úr þjóðfélaginu. Bakgrunnur félagsmanna er mjög fjölbreyttur, sem er lykillinn að öflugri starfsemi félagsins. Hefur starfsemi þess skilað miklum árangri og eftt jöklarannsóknir hér á landi verulega. Félagar Jöklarannsóknafélagsins eru nú um 600. Þeir ferðast um jökla, mæla, skrá, flytja búnað, viðhalda skálum og taka bæði þátt í rannsóknum og uppbyggingu aðstöðu. Félagið hefur frá upphafi byggst á hugmyndaauðgi, krafti og fórnfýsi fjölda einstaklinga. Eins og stundum er sagt: Þeir sem smitast af hinni ólæknandi jöklabakteríu, þeir losna sjaldan við hana.

# Sólmyrkvar á Íslandi

Þórður Arason



Miðvikudaginn 12. ágúst 2026 gengur almyrkvi á sólu yfir vesturhluta Íslands. Þetta er sjaldséður atburður, þrettándi almyrkvinn á Íslandi frá landnámi. Síðustu tvær aldir hafa aðeins þrjú almyrkvar gengið yfir landið, árin 1954, 1851 og 1833. Eftir 2026 þarf að bíða í 170 ár, til ársins 2196, eftir almyrkva á Íslandi.

Almyrkvi á sólu við góðar veðuraðstæður er magnað náttúrufræðingur og ógleymanleg upplifun. Hér eru almyrkvarnir 2026, 1954 og 1851 skoðaðir sérstaklega. Við myrkvann 1954 var fullyrt í dagblöðum að á Íslandi hefði ekki sést almyrkvi síðan 1833 og virðist myrkvinn 1851 þá hafa gleymst. Við skoðun hafa ekki fundist neinar prentaðar íslenskar samtímaheimildir um myrkvann 1851, þrátt fyrir að um miðja 19. öld hafi nokkur tímarit komið út á íslensku. Gefið er yfirlit um alla almyrkva og hringmyrkva sem hafa gengið, og munu ganga, yfir Ísland á árunum 600 til 2200 e.Kr., og hefur verið leitað að öllum rituðum samtímaheimildum um sögulega myrkva. Þá er fjallað um helstu fyrirbæri sem vert er að gefa gaum þegar fylgst er með almyrkva á sólu.

## INNGANGUR

Séð frá jörðu virðast sólin og tunglið vera álíka stór. Samt er sólin 400 sinnum stærri að þvermáli, en er líka um 400 sinnum lengra frá okkur en tunglið. Braut jarðar um sólu er ekki alveg hringlaga, sem veldur fjarlægðarmun og því að þvermál sólar virðist um 3% stærra þegar hún er stærst en þegar hún er minnst. Eins er með tunglið. Þvermál þess virðist vera um 14% stærra þegar það er stærst miðað við þegar það er minnst. Þannig virðist sólin stundum örlítið stærri en tunglið og stundum virðist tunglið stærra en sólin.

Þegar sólin er stærri en tunglið við sólmyrkva kemur fram hringmyrkvi á þröngu belt. Tunglið nær hvergi að skyggja alveg á sólina og hún skín allan hringinn í kringum tunglið. Þegar tunglið er stærra en sólin sést almyrkvi á þröngu svæði. Þegar sól og tungl eru jafnstór getur komið fram blandaður myrkvi. Þá sést hringmyrkvi við sólarupprás og sólarlag, en almyrkvi um miðjan dag þar sem þá er styttra til tunglsins vegna sveigju jarðaryfirborðs. Slíkir blandaðir myrkvar eru mjög sjaldgæfir og vara einungis augnablik.

Flóðkraftar tunglsins á jörðina verka einnig á hinn veginn og valda því að tunglið hægir á hringferð sinni og fjarlægist jörðu á jarðfræðilegum tímaskala. Á okkar dögum fjarlægist það að jafnaði um 38 mm á ári. Ein afleiðing af þessu er sú að í fyrndinni virtist tunglið alltaf stærra en sólin og hringmyrkvar gátu ekki átt sér stað. Það hefur verið áætlað að fyrsti hringmyrkvinn á jörðinni hafi orðið fyrir um 1.600

milljónum ára. Í framtíðinni fjarlægist tunglið jörðu enn frekar og almyrkvar verða ómögulegir. Síðasti almyrkvi á sólu verður eftir um 650 milljónir ára.<sup>1</sup>

Á 1. mynd eru ljósmyndir teknar við deildarmyrkva, hringmyrkva og almyrkva. Deildarmyrkvar eru algengir og sjást um stór svæði langt út fyrir þröngt belt hringmyrkva og almyrkva. Hring- og almyrkvar hefjast sem deildarmyrkvar og lýkur ætíð þannig. Deildarmyrkvi sést á Íslandi að jafnaði annað hvert ár, og almyrkvar og hringmyrkvar að jafnaði um einu sinni á öld hvor tegund. Að jafnaði sést almyrkvi á tilteknum stað á jörðinni á um 400 ára fresti.

Að verða vitni að almyrkva við góðar aðstæður er mögnuð upplifun og það má mæla með því að leggja á sig ferðalag til að njóta almyrkva á sólu, að minnsta kosti einu sinni á ævinni.<sup>2-3</sup> Nokkuð hefur verið ritað um sólmyrkva á Íslandi, aðallega fróðleikspistlar í Almanak Háskólans og á vefsetur Almanaksins.<sup>4-6</sup>

Svo sjaldgæfum og fögrum atburði er full ástæða að fagna með vinum. Á 2. mynd má sjá dæmi um sólmyrkvaveislu í vínahópi sem höfundur tók þátt í við bestu aðstæður í Corvallis í Oregon í Bandaríkjunum, Þá gekk almyrkvi þar yfir morguninn 21. ágúst 2017. Þegar sólin skín finnur fólk greinilega kólnun við almyrkva. Þessi áhrif hafa verið mæld, til dæmis í almyrkva sem gekk yfir Mið-Evrópu árið 1999, í deildarmyrkvanum á Íslandi árið 2015, og í deildarmyrkva á norðanverðu Atlantshafi árið 2021.<sup>7-9</sup>

Við ritun þessarar greinar voru notaðir útreikningar Freds Espenaks, sólmyrkvareiknimeistara NASA. Skoða má niðurstöður útreikninga og kort á vef NASA og Espenaks.<sup>1,10,11</sup> Út frá þessum upplýsingum hefur verið útbúinn vefur hjá Veðurstofunni með upplýsingum um alla deildarmyrkva, hringmyrkva og almyrkva sem sést hafa og sjást munu frá Íslandi á árunum frá 1 til 3000 e.Kr.<sup>12</sup> Fyrir þennan sólmyrkvavef voru forrit höfundar notuð til að safna gögnum af vefjum NASA og Espenaks og reikna stöðu á ellefu lykil-annesjum hringinn í kringum Ísland.<sup>13-19</sup> Alls má

1. mynd. Þrjú grunngerðir sólmyrkva: Deildarmyrkvi, hringmyrkvi og almyrkvi. Í deildarmyrkva skyggir tunglið einungis á hluta sólarinnar. Við hringmyrkva er tunglið það langt frá jörðu að það nær ekki að skyggja alveg á sólina. Við almyrkva er tunglið nógu nálægt jörðu til að skyggja alveg á sólina á litlu svæði. Efst: Deildarmyrkvi í Kópavogi 10. júní 2021. Í miðju: Hringmyrkvi 14. október 2023 í Utah, Bandaríkjunum. Neðst: Sólkóróna í almyrkva 21. ágúst 2017 í Oregon, Bandaríkjunum. – Three primary types of solar eclipses: Partial, annular and total eclipses. In a partial eclipse, the Moon obscures only part of the Sun. During an annular eclipse, the Moon is too far from Earth to completely cover the Sun. In a total eclipse, the Moon is close enough to Earth to fully obscure the Sun over a narrow region.

Ljósmyndir/Photos: Top: Þórður Arason. Center: Wikimedia Commons (2023 Annual Eclipse.jpg). Bottom: Wikimedia Commons (Aubrey Gemignani NASA, 3590992653).



2. mynd. Full ástæða er til að hitta vini og njóta þess saman að horfa á sólmyrkva. Hér má sjá sólmyrkvaveislu í Corvallis í Oregon 21. ágúst 2017. Þar varð almyrkvi við bestu aðstæður um kl. 17.17 UTC (10.17 PDT). – From an eclipse party 21 August 2017 in Corvallis, Oregon, USA. Ljósmynd. / Photo: Þórður Arason.

finna þar upplýsingar um 1.515 íslenska sólmyrkva á þessum 3.000 árum, en langflestir þeirra eru frekar litlir deildarmyrkvar. Myrkvun helmings þessara sólmyrkva á Íslandi hefur verið minni en 38% við hámark. Af fyrrnefndum 1.515 sólmyrkvum hafa 119 leitt til meiri en 90% myrkvunar á Íslandi; slíkir myrkvar koma því að jafnaði á 25 ára fresti. Af þessum íslensku sólmyrkvum eru 40 hringmyrkvar og 27 almyrkvar.

Lengsti almyrkvi á Íslandi á sögulegum tíma var 3 mín. 41 sek. árið 1131, en fræðilega getur almyrkvi varað í allt að 7 mín. 32 sek. Lengsti hringmyrkvi á Íslandi á sögulegum tíma varði í 8 mín. 24 sek. árið 1656, en fræðilega getur hringmyrkvi varað í allt að 12 mín. 29 sek.<sup>1</sup>

Grundvallarmunur er á stórum deildarmyrkva og almyrkva. Sólin er um 100.000 sinnum hjartari en fullt tungl, þannig að við deildarmyrkva sem veldur 99% myrkvun er sólin ennþá þúsund sinnum hjartari en fullt tungl, og enn full þörf á að verja augun með sólmyrkvagleraugum.

Dagsetningar sólmyrkva fyrir nóvember árið 1700 eru hér ritaðar samkvæmt júlíanska tímatalinu, sem þá gildi á Íslandi, en eftir það samkvæmt gregoríska tímatalinu. Tímasetningar innan dagsins eru miðaðar við klukku eins og hún er nú stillt á Íslandi, svokallaðan heimstíma UTC.

## ALMYRKVAR OG HRINGMYRKVAR

Í 1. töflu er listi yfir alla almyrkva og hringmyrkva sem hafa gengið eða eiga eftir að ganga yfir Ísland á árunum 600 til 2200 e.Kr. Samtals eru þar taldir 35 sólmyrkvar; 15 eru almyrkvar og 20 hringmyrkvar. Á 3. mynd má sjá brautir almyrkvanna yfir Ísland. Kort með brautum sólmyrkva á myndum 3–5 og 7–10 voru teiknuð með forritum höfundar með tengingu við opna GMT-hugbúnaðinn (generic-mapping-tools.org). Gögn um brautir sólmyrkvanna voru fengnar af vef Espenaks. Af fyrrnefndum 35 sólmyrkvum hafa 28 gengið yfir landið frá landnámi, 12 almyrkvar og 16 hringmyrkvar. Ritaðar heimildir eru til um meirihluta þeirra. Höfundur hefur gert ýtarlega úttekt á heimildum um almyrkva og hringmyrkva á Íslandi á sögulegum tíma úr annálum, dagbókum, veðurbókum og öðrum rituðum heimildum.<sup>13–19</sup>

Stærsti deildarmyrkvi á Íslandi á tímabilinu frá 600 til 2200 e.Kr., sem hvorki er almyrkvi né hringmyrkvi, var deildarmyrkvinn hinn 20. mars 2015.

## ALMYRKVINN 12. ÁGÚST 2026

Almyrkvinn miðvikudaginn 12. ágúst 2026 hefst í Síberíu um kl. 17.00, nærri miðnætti að staðartíma. Á 4. mynd má sjá braut hans frá Síberíu yfir Íshafið og næstum yfir Norðurpólinn, yfir austurströnd Grænlands, Ísland og norðurhluta Spánar. Honum lýkur síðan við sólsetur í Miðjarðarhafinu um kl. 18.30.



3. mynd. Brautir allra almyrkva á sólu sem fóru/fara yfir Ísland frá 600 til 2200 e.Kr. Hver almyrkvi afmarkast af bláu línunum og miðja myrkvans er á rauðu línunni. – Path of all total eclipses of the sun over Iceland from AD 600 to 2200. Kort/Maps: Þóroddur Arason.

1. tafla. Almyrkvar og hringmyrkvar á sólu á Íslandi á árunum frá 600 til 2200 e.Kr. –  
List of total and annular eclipses of the sun in Iceland for the years AD 600 to 2200.

Dagsetning* ár-mán.-dagur Date* Year-Month-Day	Almyrkvi eða Hringmyrkvi Total (Al) or Annular (Hr)	Ritaðar heimildir og athugasemdir Contemporary sources and comments
0807-02-11	Hr	-
0818-07-07	Hr	-
0849-05-25	Al	-
0878-10-29	Al	Getið í annálum, skeikar tveimur árum
0979-05-28	Hr	-
1077-02-25	Al	-
1093-09-23	Hr	-
1131-03-30	Al	Getið í annálum, rétt dagsetning
1147-10-26	Hr	-
1234-03-01	Hr	-
1245-07-25	Hr	-
1312-07-05	Al	Getið í Skálholtsannál, rétt dagsetning
1330-07-16	Al	Getið í annálum, rétt dagsetning
1339-07-07	Hr	Getið í annálum, rétt dagsetning, hér talinn hringmyrkvi
1355-03-14	Hr	-
1364-03-04	Hr	-
1411-08-19	Hr	-
1424-06-26	Al	Getið í Lögmansannál, dagsetning nærri lagi
1433-06-17	Al	-
1453-11-30	Hr	-
1469-07-09	Al	-
1547-11-12	Hr	E.t.v. getið í Skarðsárannál
1656-01-16 *	Hr	Getið í annálum, rétt dagsetning
1710-02-28	Hr	Getið í annálum, rétt dagsetning
1733-05-13	Al	Getið í annálum, rétt dagsetning
1791-04-03	Hr	Rasmus Lievog o.fl. fylgdust með myrkvanum
1793-09-05	Hr	Rasmus Lievog o.fl. fylgdust með myrkvanum
1833-07-17	Al	Sveinn Pálsson o.fl. fylgdust með myrkvanum
1851-07-28	Al	Almyrkvinn sem gleymdist, engar prentaðar samtímaheimildir
1954-06-30	Al	Sást vel í björtu veðri allra syðst á landinu
2003-05-31	Hr	Skýjað, en sást á Norðvesturlandi við sólarupprás
2026-08-12	Al	Kemur úr norðri yfir vestanvert landið
2048-06-11	Hr	Kemur úr vestri yfir Suðurland
2104-12-17	Hr	Sést einungis á Bjargtöngum
2196-06-26	Al	Kemur úr suðvestri yfir Vestfirði

\*Forrit höfundar og sólmyrkvavefir NASA og Freds Espenaks voru notuð til að finna og skoða nánar alla mögulega hring- og almyrkva á Íslandi.<sup>1,10</sup> Dagsetningar í töflunni eftir árið 1700 eru miðaðar við gregoríska tímatalið sem þá tók gildi á Íslandi, en eldri við júlíanska tímatalið. Í töflum Espenaks reiknimeistara NASA er þessi tímatalsbreyting miðuð við árið 1582 (útgáfuár yfirlýsingar páfa). Í töflunni er myrkvi árið 1656 miðaður við júlíanska tímatalið, sem þá gildi á Íslandi. – Dates of total and annular eclipses in Iceland. Prior to the year 1700 the Julian calendar is used and after 1700 the Gregorian calendar, but during this year the calendar was changed in Iceland.

## FYRIRBÆRI SEM SJÁST VIÐ ALMYRKVA Á SÓLU

- Litbrigði**

Pótt það dimmi líkt og við sólarlag í aðdraganda almyrkva eru litir umhverfisins öðruvísi. Umhverfið er bláleitara, sýnist mun kaldara en við sólarlag.
- Dýrahegðun**

Dýrum líður líklega eins og það sé að koma nótt og fara að undirbúa svefn. Öll náttúran verður hljóð og kyrr.
- Ormaskuggar**

Flestir horfa til sólar þegar almyrkvinn er að skella á, en þá er einnig vert að líta niður á ormaskugga (e. shadow bands/shadow snakes). Í um 20 sek. fyrir almyrkvann tindrar (blikkar) sólarröndin mjög áberandi. Þetta er vegna kviku í lofthjúpi jarðar, svipað og þegar stjörnur tindra. Jörðin undir fótum manns virðist þá iða af ljósum og dekkri dansandi bogalínunum, líkt og ormagryfja.
- Blossaperlur**

Síðustu sólargeislarin brotna upp í aðskilda ljósdepla, blossaperlur (e. Baily's beads), vegna landslags á rönd tunglsins.
- Demantshringur**

Síðustu geislar sólar (demanturinn) ásamt ljóshring umhverfis tunglið.
- Myrkvun**

Sjálf myrkvunin kemur mjög skyndilega (á innan við 3 sek.). Það verður ekki niðadimmt heldur ratbjart eins og af dauðu tunglsljósi, en sér ekki til verka. Bjart er úti við sjóndeildarhringinn. Tilfinning um kólnun. Nú er unnt að taka niður sólmyrkvagleraugun.
- Sólkóróna**

Sólkórónan er úr rafgasi (e. plasma) umhverfis sólina, sem kalla má lofthjúp sólar, og verður skyndilega sýnileg með berum augum. Sólkórónan er björt og stór og virðist gerð úr örfínunum hvítum, sumir segja silfrudum, þráðum. Aferð hennar minnir á björt norðurljós, en engin hreyfing sést á þeim stutta tíma sem almyrkvi varir. Því hefur verið haldið fram að geislabaugar helgra manna á málverkum eigi uppruna í útliti sólkórónunnar.
- Stjörnur**

Skyndilega verður stjörnubjart og þá er gagnlegt að vera fyrirfram búinn að skoða stjörnukort til að getað áttað sig á helstu stjörnum umhverfis sólina.
- Sólkerfið**

Eftir staðsetningu reikistjarna má skynja að maður horfi á sólkerfið okkar úr fjarska. Með heppilegri uppröðun sýnist augljóst að reikistjörnurnar séu fylgihnettir sólarinnar. Til þess að skynja þetta þarf að kynna sér vel stjörnukort og staðsetningu reikistjarna fyrir myrkvann.
- Blika**

Pótt ský séu yfirleitt til ama við sólmyrkvaskoðun, þá geta blika, gráblika eða mistur stundum deyft sólarljósið þannig að unnt er að horfa á sólina með berum augum. Ef sól er lágt á lofti við þær aðstæður verður jafnvel lítill deildarmyrkvi áberandi.
- Alskýjað**

Í alskýjuðu veðri verður upplifun af sólmyrkva allt önnur en í heiðskíru. Ómögulegt getur verið að taka eftir litlum deildarmyrkva og flest fyrirbæri við almyrkva sjást alls ekki. Hins vegar getur almyrkvun verið drungalegri þegar ekki sést hvað veldur. Á skýjum í fjarska má sjá skugga almyrkvans koma til áhorfandans og frá á miklum hraða, um 1 km/sek.
- Regnbogi**

Ef skúrir eru andstætt sólarátt getur sést regnbogi. Regnbogi sést einungis ef sólarhæð er undir 42°. Þegar sólin er orðin mjög dauf í deildarmyrkva dofna birta regnbogans og virðist hann þá undarlega bleikur á litinn. Þetta er líklega sjónvilla, háð mismunandi litnæmni augans. Vert er að fylgjast með þessu fyrirbæri ef sólmyrkvi verður í skúraveðri.
- Norðurljós**

Á Íslandi er örlítill möguleiki á að sjá norðurljós í almyrkva, sérstaklega að kvöldlagi.
- Persítar**

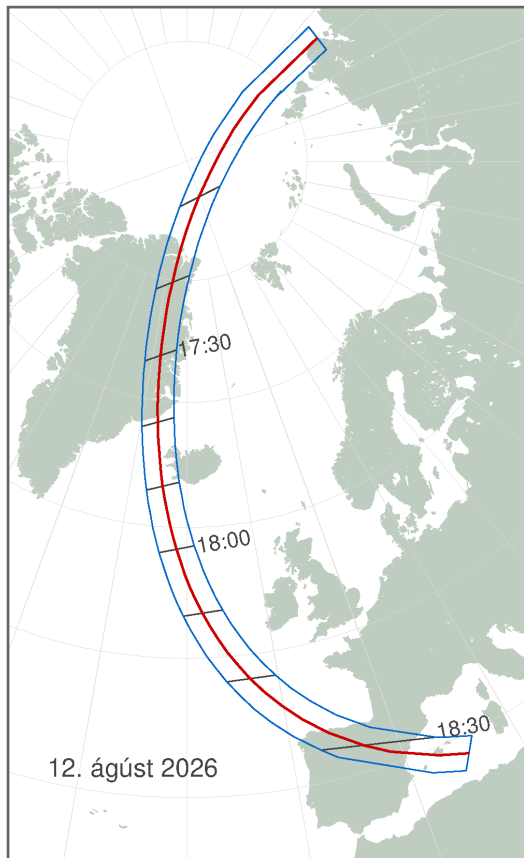
Lofsteinadrífa sem virðist koma frá stjörnumerkinu Perseus er með hámark um 12.–13. ágúst. Mögulega mætti því sjá stjörnuhrap við almyrkva.
- Að njóta**

Hratt flýgur stund og mörg fyrirbæri er vert að skoða við almyrkva. Eitthvað ferst fyrir eða gleymist. Það skiptir ekki höfuðmáli – aðalatriðið er að muna að njóta þessarar einstöku upplifunar.

2. tafla. Tímasetningar, sólarhæð, sólarátt o.fl. fyrir valda staði á vestanverðu Íslandi í sólmyrkvanum 12. ágúst 2026.  
 - Time table for selected places in W-Iceland for the solar eclipse of 12 August 2026.

Staður * Place *	Staðsetning Location	Upphaf myrkva C1 Partial onset	Sh Sh	Upphaf almyrkva C2 Totality onset	Hámark almyrkva Maximum	Sh Sh	Átt Azimuth	Lok almyrkva C3 Totality end	Lok myrkva C4 Partial end	Sh Sh	Lengd almyrkva Duration of total
Straumnes	(66°25.9'N, 023°08.1'V)	16:42:39	30	17:43:28	17:44:11	25	250	17:44:54	18:43:16	19	1m26s
Kögur	(66°28.2'N, 022°56.1'V)	16:42:37	30	17:43:29	17:44:07	25	250	17:44:44	18:43:09	19	1m14s
Súðavík	(66°01.5'N, 022°59.5'V)	16:43:22	30	17:44:13	17:44:56	25	250	17:45:38	18:43:59	19	1m25s
Ísafjörður	(66°04.5'N, 023°07.5'V)	16:43:13	30	17:44:02	17:44:48	25	250	17:45:34	18:43:53	19	1m31s
Bolungarvík	(66°09.2'N, 023°15.6'V)	16:43:01	30	17:43:49	17:44:37	25	250	17:45:25	18:43:43	19	1m36s
Suðureyri	(66°07.7'N, 023°31.3'V)	16:42:57	30	17:43:43	17:44:36	25	249	17:45:29	18:43:45	19	1m46s
Flateyri	(66°03.0'N, 023°30.8'V)	16:43:05	30	17:43:51	17:44:45	25	249	17:45:38	18:43:54	19	1m46s
Þingeyri	(65°52.8'N, 023°29.6'V)	16:43:24	30	17:44:10	17:45:04	25	250	17:45:58	18:44:13	19	1m48s
Bíldudalur	(65°41.1'N, 023°35.9'V)	16:43:41	31	17:44:28	17:45:24	25	250	17:46:21	18:44:35	19	1m53s
Tálnnafjörður	(65°37.6'N, 023°50.0'V)	16:43:41	31	17:44:27	17:45:27	25	249	17:46:27	18:44:40	19	2m00s
Patreksfjörður	(65°35.8'N, 023°59.3'V)	16:43:40	31	17:44:26	17:45:28	25	249	17:46:30	18:44:43	19	2m03s
Bjargtangar	(65°30.2'N, 024°32.1'V)	16:43:35	31	17:44:23	17:45:30	25	249	17:46:37	18:44:51	19	2m13s
Flatey	(65°22.4'N, 022°55.0'V)	16:44:32	30	17:45:23	17:46:10	25	251	17:46:56	18:45:13	19	1m32s
Reykholar	(65°26.9'N, 022°12.3'V)	16:44:42	30	17:45:52	17:46:12	24	251	17:46:31	18:45:07	18	0m39s
Stykkishólmur	(65°04.6'N, 022°43.5'V)	16:45:08	31	17:46:01	17:46:46	25	251	17:47:30	18:45:47	19	1m28s
Grundarfjörður	(64°55.4'N, 023°15.8'V)	16:45:10	31	17:45:59	17:46:55	25	251	17:47:51	18:46:02	19	1m52s
Ólafsvík	(64°53.7'N, 023°42.8'V)	16:45:01	31	17:45:49	17:46:51	25	250	17:47:53	18:46:03	19	2m03s
Öndverðanes	(64°53.1'N, 024°02.7'V)	16:44:53	31	17:45:42	17:46:47	25	250	17:47:52	18:46:03	19	2m09s
Arnarstapi	(64°46.2'N, 023°37.3'V)	16:45:17	31	17:46:05	17:47:07	25	250	17:48:08	18:46:18	19	2m02s
Borgarnes	(64°32.3'N, 021°55.3'V)	16:46:26	30	17:47:36	17:47:58	24	252	17:48:20	18:46:50	18	0m44s
Hvanneyri	(64°33.9'N, 021°46.0'V)	16:46:28	30	17:47:51	17:47:57	24	253	17:48:03	18:46:47	18	0m11s
Akranes	(64°19.0'N, 022°05.2'V)	16:46:46	31	17:47:47	17:48:21	25	252	17:48:54	18:47:14	18	1m07s
Mosfellsbær	(64°09.7'N, 021°42.7'V)	16:47:12	30	17:48:26	17:48:43	24	253	17:49:01	18:47:32	18	0m34s
Reykjavík	(64°08.5'N, 021°55.6'V)	16:47:09	31	17:48:12	17:48:43	25	253	17:49:13	18:47:34	18	1m00s
Kópavogur	(64°06.7'N, 021°54.8'V)	16:47:12	31	17:48:16	17:48:46	24	253	17:49:16	18:47:38	18	0m59s
Garðabær	(64°05.3'N, 021°55.0'V)	16:47:15	31	17:48:18	17:48:49	25	253	17:49:19	18:47:40	18	1m01s
Hafnarfjörður	(64°04.0'N, 021°57.3'V)	16:47:16	31	17:48:18	17:48:51	25	253	17:49:23	18:47:42	18	1m04s
Keflavík	(64°00.3'N, 022°33.7'V)	16:47:06	31	17:47:59	17:48:49	25	252	17:49:39	18:47:48	18	1m40s
Garðskagi	(64°05.0'N, 022°41.6'V)	16:46:54	31	17:47:46	17:48:38	25	252	17:49:30	18:47:38	19	1m44s
Sandgerði	(64°02.3'N, 022°42.4'V)	16:46:59	31	17:47:50	17:48:43	25	252	17:49:35	18:47:43	19	1m45s
Reykjanestá	(63°48.0'N, 022°42.3'V)	16:47:24	31	17:48:16	17:49:10	25	252	17:50:04	18:48:10	18	1m48s
Grindavík	(63°50.6'N, 022°26.0'V)	16:47:27	31	17:48:20	17:49:09	25	252	17:49:58	18:48:06	18	1m37s
Strandarkirkja	(63°50.1'N, 021°42.3'V)	16:47:47	31	17:48:55	17:49:20	24	253	17:49:45	18:48:09	18	0m50s

\* Forrit höfundar og sólmyrkvavefir NASA og Freds Espenaks voru notuð til að finna tímasetningar fyrir valda staði á Íslandi.<sup>1,10</sup> Fyrir hvern stað er gefin staðsetning sem reikningarnir miðast við; tímasetning upphafs sólmyrkva (C1) og sólarhæð (sh) (í gráðum yfir sjónbaug); tímasetning upphafs almyrkva (C2); tímasetning hámarks almyrkva, sólarhæð (sh) og sólarátt (átt) (í gráðum réttssælis frá norðri); tímasetning þegar almyrkva lýkur (C3); tímasetning þegar sólmyrkva lýkur (C4) og sólarhæð (sh); að lokum er gefin lengd almyrkvans í mínútum og sekúndum. – For each place the location for the calculations is given; time of onset of partial eclipse (C1) and sun height (degrees over horizon); time of onset of eclipse totality (C2); time of eclipse maximum, sun height and azimuth (degrees from north); time of end of eclipse totality (C3); time of end of the partial eclipse (C4) and sun height; finally the length of eclipse totality in minutes and seconds.

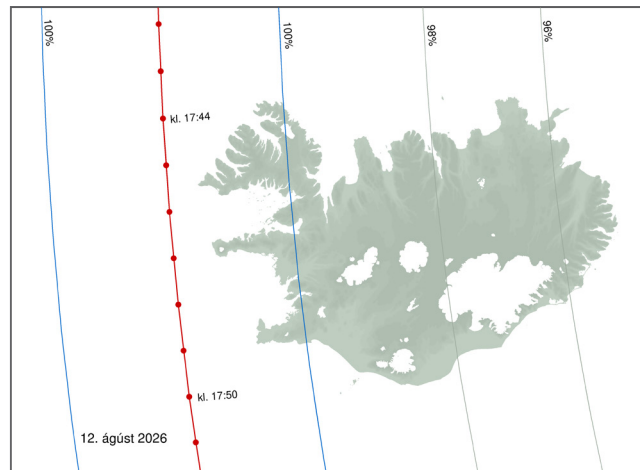


4. mynd. Braut almyrkva á sólu 12. ágúst 2026. Almyrkvinn afmarkast af bláu línunum og tímasetning er sýnd miðað við íslenska klukku. Almyrkvinn sést fyrst við sólarupprás í Síberíu, fer yfir Grænland, yfir vestanvert Ísland um kl. 17.45, og sést síðast við sólsetur á Mallorca. – Path of the total eclipse on 12 August 2026. Totality is bounded by the blue lines and UTC-times are shown. The eclipse will start at sunrise in Siberia, pass over Greenland, W-Iceland at about 17:45, and end at sunset in the Mediterranean. Kort/Map: Þórður Arason.

Almyrkvinn gengur yfir vesturhluta Íslands um kl. 17.45. Á Íslandi hefst ferlið sem deildarmyrkvi nyrst á Vestfjörðum kl. 16.42 og lýkur kl. 18.48 syðst á Reykjaneskaga. Á 5. mynd má sjá braut almyrkvans yfir vestanvert landið; hann byrjar á Vestfjörðum kl. 17.44 og lýkur á Reykjaneskaga kl. 17.49. Hraði myrkvans á leið yfir Ísland verður 945 m/sek. (3.400 km/klst.). Við hámark almyrkva verður sólin í vestsuðvestur og sólarhæð um 25° yfir sjónbaug.

Í 2. töflu er tímatafla fyrir valda staði á vestanverðu landinu og lengd almyrkva á hverjum stað. Lengstur verður almyrkvinn á Bjargtöngum, 2 mín. 13 sek., og víða á Vestfjörðum, Snæfellsnesi og Reykjaneskaga yfir 1 mín. 30 sek.

Við almyrkva verður stjörnuþjart og ekki lengur verkljóst. Þá má taka niður sólmyrkvagleraugun, en þó aðeins um skamma stund á meðan almyrkvinn varir. Tilkomumest þykir sólkórónan stór og björt sem sést greinilega með berum augum. Talið er að útlit geislabauga helgra manna á miðaldamálverkum megi rekja til sólkórónunnar. Í innskotsgrein er listi af nokkrum fyrirbærum rétt fyrir og meðan á almyrkva stendur sem vert er að skoða. En hratt flýgur stund. Þótt almyrkvi standi í 1–3 mínútur líður tíminn ótrúlega hratt og næsta vísit að almyrkvinn verður



5. mynd. Braut almyrkvans 12. ágúst 2026 kl. 17.44 til 17.49. Almyrkvinn afmarkast af bláu línunum og miðja myrkvans verður á rauðu línunni vestan við landið. Punktur á rauðu línunni sýna miðju almyrkvans á mínútu fresti. Myrkvinn á landinu við hámark verður frá 95% á Austfjörðum til almyrkvunar á vestanverðu landinu. – Path of the total eclipse on 12 August 2026 at 17:44 to 17:49 UTC. The totality will be bounded by the blue lines and dots on the red line show the eclipse center every minute. At maximum the Sun's obscuration will be from 95% in E-Iceland to totality in W-Iceland. Kort/Map: Þórður Arason.

liðinn áður en öll þessi fyrirbæri hafa verið skoðuð gaumgæfilega.

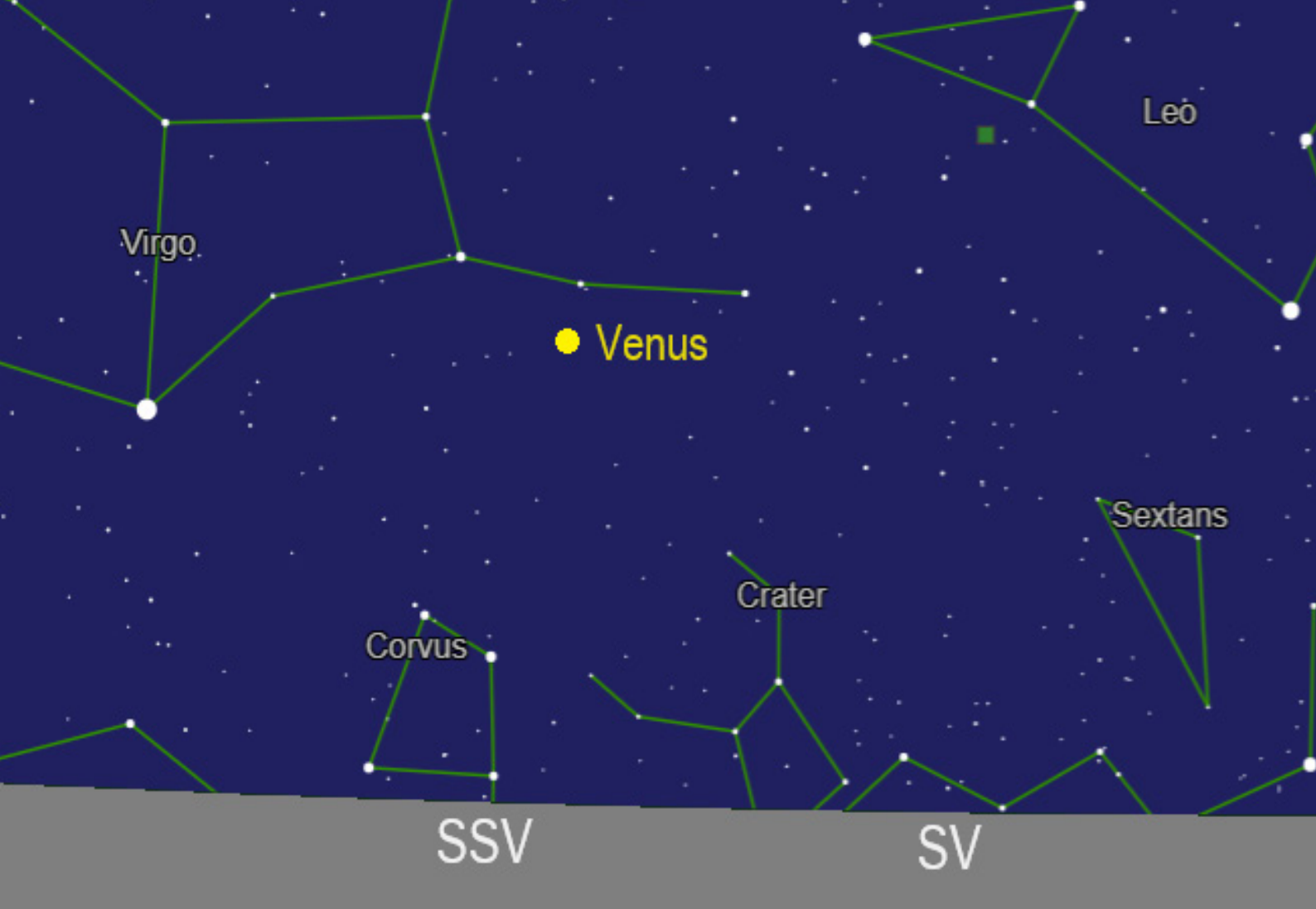
Gott er að kynna sér stjörnukort fyrir myrkvann þannig að fljótlegt sé að þekkja helstu stjörnur sem birtast umhverfis sólina og staðsetningu reikistjarnanna. Á 6. mynd má sjá stjörnukort fyrir Reykjavík. Stjörnuortið var unnið með vef Dominic Ford (in-the-sky.org), en höfundur íslenskaði texta. Þegar reikistjörnurnar raða sér svona í línu báðum megin við sólina, þá getur áhorfandi fengið sterklega á tilfinninguna að hann sé að horfa á sólkerfið okkar úr fjarska.

Eftir myrkvann árið 2026 verður 170 ára bið eftir næsta almyrkva á Íslandi, en 26. júní 2196 um kl. 6.40 að morgni gengur almyrkvi úr suðvestri yfir Vestfirði. Engar líkur eru á að við sem fylgjumst með almyrkvanum 2026 náum þeim næsta. Við getum samt séð fyrir okkur kynslóðirnar haldast í hendur líkt og rithöfundurinn Andri Snær Magnason hefur lýst: „Öldungur sem horfir á almyrkvann árið 2196 rifjar upp úr bernsku sinni þegar langamma hans lýsti fyrir honum myrkvanum árið 2026, sem hún hafði séð sem barn.“<sup>20</sup>

## SKÝJAHULA Á VESTURLANDI Í ÁGÚST

Ský eru til ama við sólmyrkvaskoðun. Í alskýjuðu veðri verður upplifun af sólmyrkva allt önnur en í heiðskíru. Erfitt er að taka eftir litlum deildarmyrkva og ýmis fyrirbæri við almyrkva sjást alls ekki. Hins vegar getur almyrkvun verið drungalegri þegar ekki sést hvað veldur, og lýsingar á sólmyrkvum í annálum benda til þess að stundum hafi verið skýjað. Á skýjum í fjarska í alskýjuðu veðri má sjá skugga almyrkvans koma til áhorfanda á miklum hraða, um 1 km/sek.

Nota má athuganir á skýjahulu frá veðurstöðvum til að meta líkur á að það sjáist til sólar. Lítil munur er á tíðni skýjahulu á veðurstöðvum við Faxaflóa, við



6. mynd. Stjörnukort fyrir Reykjavík í almyrkvanum 12. ágúst 2026, með staðsetningu fjögurra reikistjarna. – Star chart for Reykjavík during the total eclipse on 12 August 2026, with the location of four planets. Mynd/Image: Þórður Arason.

Breiðafjörð eða á Vestfjörðum. Skoðaðar voru skýjahuluathuganir frá mönnum veðurstöðvum á Vesturlandi kl. 18 alla daga í ágúst á árunum 1949–2024.

Í heild er hlutfall veðurathugana á Vesturlandi með hálfskýjuðu eða betra 23%. Ef gert er ráð fyrir að staðsetning rofs í skýjahulu sé óháð stefnu í sólina, þá eru 24% líkur á að það sjáist til sólar á tilteknum stað á Vesturlandi í ágúst kl. 18. Líkur á að það hafi sést til sólar á einhverri mannaðri veðurstöð á umræddu tímabili á Vesturlandi kl. 18 í ágúst eru um 50%. Því má sjá að unnt er að auka vinningslíkurnar verulega með því að elta uppi glufur í skýjahulunni.

Þegar ský dregur fyrir sólu skynjum við birtuminnkun. Út frá mælingum á sólgeislun á sjálfvirkum veðurstöðvum má meta hve algengar og miklar slíkar skýjamyrkvanir eru og bera saman við myrkvun frá sólmyrkvum. Búast má við að einu sinni í mánuði verði birtuminnkun upp á allt að 86% á einni klukkustund vegna þess að ský dregur fyrir sólu. Ef menn vita ekki af komandi sólmyrkva með 80–90% myrkvun, þá er hugsanlegt að þeir taki ekki eftir honum í skúraveðri þegar búast má við miklum birtubreytingum.

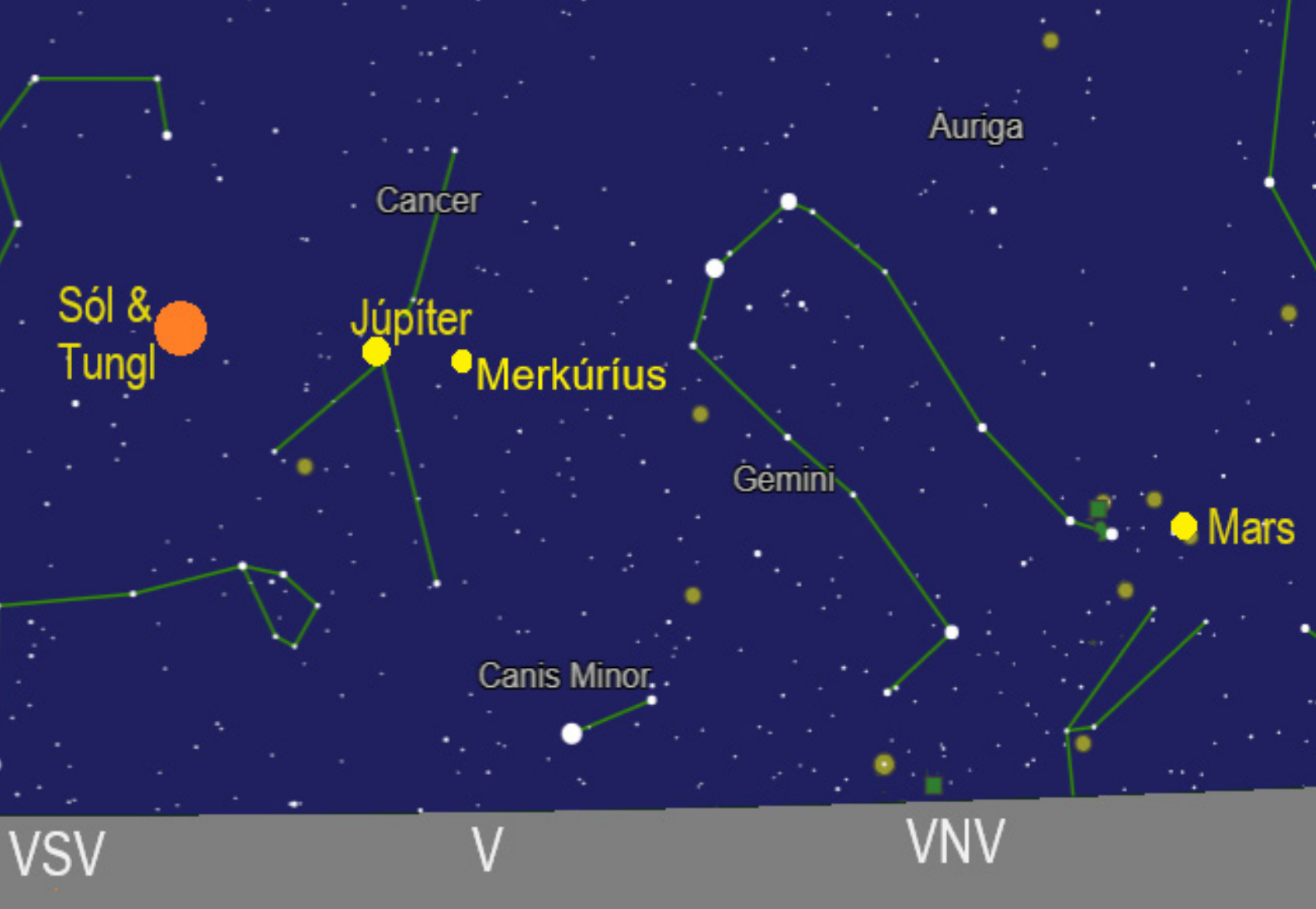
## ALMYRKVINN 30. JÚNÍ 1954

Síðasti almyrkvi á Íslandi gekk yfir syðsta hluta landsins miðvikudaginn 30. júní 1954 um kl. 12.05. Almyrkvinn varði lengst í 1 mín. 46 sek. í Vestmannaeyjum og sást syðst á landinu í björtu veðri. Braut myrkvans frá sólarupprás til sólarlags má sjá á 7. mynd og á 8. mynd sést braut almyrkvans yfir Ísland.

Almyrkvinn hófst við sólarupprás í Nebraska um kl. 11.05, gekk síðan yfir austurhluta Kanada og syðsta hluta Grænlands áður en hann sást á Íslandi. Almyrkvi varð í Færeyjum og í Hjaltlandseyjum, síðan í suðurhluta Noregs og Svíþjóðar, í Póllandi, í Sovétríkjunum frá Litháen til Aserbaídsjans, í Íran, Afganistan og Pakistan, og endaði við sólsetur á Indlandi um kl. 13.55.

Í Almanaki Þjóðvinafélagsins 1956 er sagt frá myrkvanum: „Sólmyrkvi var um Ísland 30. júní, og var almyrkvi í syðstu hlutum landsins. Fór fjöldi manns úr Rvík og víðar að til Landeyja, Eyjafjallasveitar, Mýrdals og Vestmannaeyja til að sjá almyrkvann. Íslenzkir og erlendir vísindamenn störfuðu að mælingum í sambandi við myrkvann.“<sup>21</sup>

Í Almanaki Þjóðvinafélagsins fyrir 1954 koma fram upplýsingar um almyrkva eftir 1800. Þar segir meðal



#### ALMYRKVINN 28. JÚLÍ 1851 – SÁ SEM GLEYMDIST

annars: „Í almanaki 1953 er skrá um meiri háttar sólmyrkva á Íslandi á tímabilinu 700–1800. Almyrkvar eru þar alls taldir 11, eða einn á öld að meðaltali. Hér á landi hefur sól almyrkvazt einu sinni eftir 1800; það var 17. júlí 1833.“<sup>22</sup>

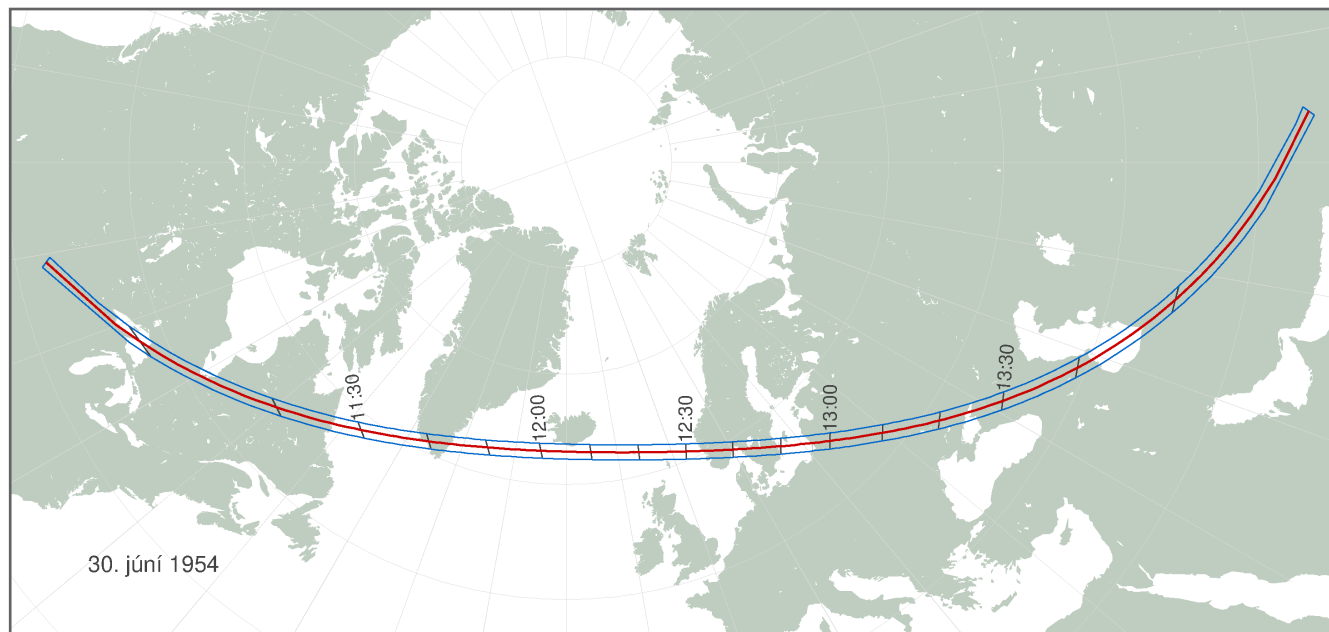
Þessi ranga fullyrðing í Almanakinu um einungis einn almyrkva á 19. öld var endurtekin í dagblöðum fyrir og eftir almyrkvann 1954 og hvergi er þar minnst á almyrkvann 1851.<sup>23–36</sup> Rýrar heimildir eru til um myrkvann 1851 og hann var fallinn í gleysku árið 1954; allir sem mundu hann voru látnir.

Í lista Almanaksins 1953 er listi yfir sólmyrkva þar sem meira en 3/4 af þvermáli sólar hefur myrkvast.<sup>22</sup> Fram kemur að listinn hafi verið unninn út frá útreikningum norska stjörnufræðingsins Jens Frederiks Schroeters, sem í bók árið 1923 birti kort af öllum hring- og almyrkvum sem gengu yfir Evrópu árin 600 til 1800 e.Kr.<sup>37</sup> Á kortunum má einnig sjá Ísland. Af ellefu almyrkvum í listanum er einn fyrir landnám (849) og annar (1339) var blandaður myrkvi sem telst ekki almyrkvi á Íslandi samkvæmt útreikningum NASA.

Almyrkvi gekk yfir Norðausturland mánudaginn 28. júlí 1851 um kl. 14.40. Leið almyrkvans má sjá á 9. mynd. Fram kemur í almanaki fyrir Ísland 1851 að tunglið myndi hylja 11/12 af þvermáli sólar í Reykjavík, en ekki er minnst á almyrkva á Norðausturlandi.<sup>38</sup> Almyrkvinn hófst við sólarupprás á Kyrrahafi úti fyrir ströndum Alaska, gekk svo um strjálbýl héruð Norður-Kanada og Grænland áður en hann gekk yfir norðausturluta Íslands. Almyrkvinn gekk síðan yfir sunnanverðan Noreg, Norður-Jótland og Skán.

Í Danmörku snerti almyrkvinn Helsingjaeyri.<sup>39</sup> Almyrkvinn gekk yfir Königsberg (nú Kalíníngrad), Varsjá, Kænugarð, Tíblisi, Bakú og endaði við sólarlag á Kaspíahafi. Fyrsta ljósmynd af sólkórónu var tekin í almyrkvanum 1851. Það gerði Johann Berkowski frá stjörnuskoðunarstöðinni í Königsberg í Prússlandi. Þar stóð almyrkvinn í tæpar 3 mín.

Leið myrkvans yfir Ísland má sjá á 10. mynd. Almyrkvinn gekk yfir Grímsey kl. 14.36, síðan Tjörnes, Kelduhverfi, Öxarfjörð, Melrakkaslétu, Þistilfjörð, Langanes, Bakkaflóa, Vopnafjörð, Héraðsflóa, Borgarfjörð eystra og síðast Loðmundarfjörð kl. 14.40. Lengstur varð almyrkvinn á Fonti á Langanesi, 3 mín.



7. mynd. Braut almyrkva á sólu 30. júní 1954. Almyrkvinn afmarkaðist af bláu línunum og miðja myrkvans var á rauðu línunni. Tímasetning almyrkvans er sýnd miðað við íslenska klukku. Almyrkvinn sást við sólarupprás í Nebraska í Bandaríkjunum, fór yfir syðsta hluta Íslands um kl. 12.05, og hvarf við sólsetur á Indlandi. – Path of the total eclipse of the Sun on 30 June 1954. Totality was seen between the blue lines, UTC-times shown. The eclipse started at sunrise in Nebraska, went over S-Iceland at about 12:05 and was last seen at sunset in India. Kort / Map: Þórður Arason.

21 sek. Á öðrum stöðum á landinu hefur sólmyrkvinn komið fram sem stór deildarmyrkvi, sem allir hafa orðið varir við. Myrkvun varð minnst á landinu 92,5% á Reykjanestá.

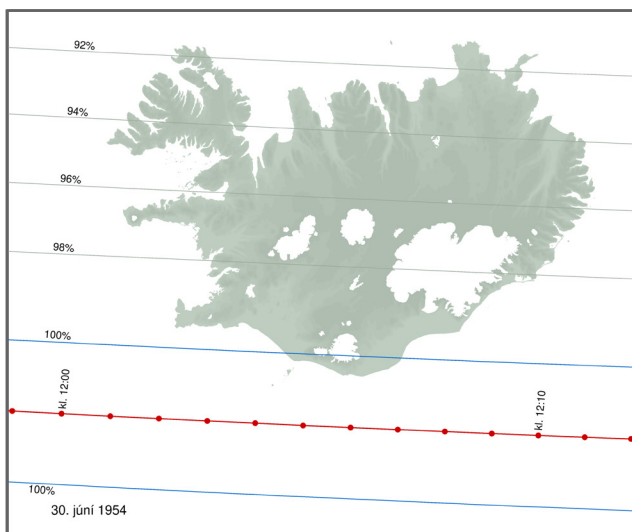
Heimildir um þennan almyrkva á Íslandi 1851 eru hins vegar afar rýrar þannig að hann gleymdist, líklega vegna þess að prentfrelsi var skert á Íslandi um sumarið. Árið 1851 er þekktast í Íslandssögunni fyrir þjóðfundinn, sem fram fór um sumarið í Reykjavík með sextán fundum frá 5. júlí til 9. ágúst.<sup>40</sup> Þjóðfundurinn var sérkjörið stjórnlagabing og var því ætlað að samþykka nýja stjórnskipan fyrir Ísland. Mikill pólitískur hiti var í Íslendingum eftir að þjóðfundurinn fór út um þúfur og varð það til þess að stjórnvöld í Kaupmannahöfn hindruðu blaðaútgáfu á Íslandi, enda réðu yfirvöld einu prentsmiðjunni á landinu.<sup>41,42</sup>

Helsta fréttablaðið á þessum árum var Þjóðólfrur – Hálfsmánaðar-rit handa Íslendingum, sem fylgdi Jóni Sigurðssyni að málum, og eina fréttablaðið frá því útgáfu Lanztíðinda var hætt vorið 1851. Síðasta tölublað Þjóðólfs fyrir ritbann kom út 30. júní 1851, en næsta tölublað hálfu ári eftir myrkvann, 20. janúar 1852. Um miðja 19. öld voru gefin út nokkur tímarit á íslensku. Ekkert hefur fundist í þessum tímaritum um sólmyrkvann.

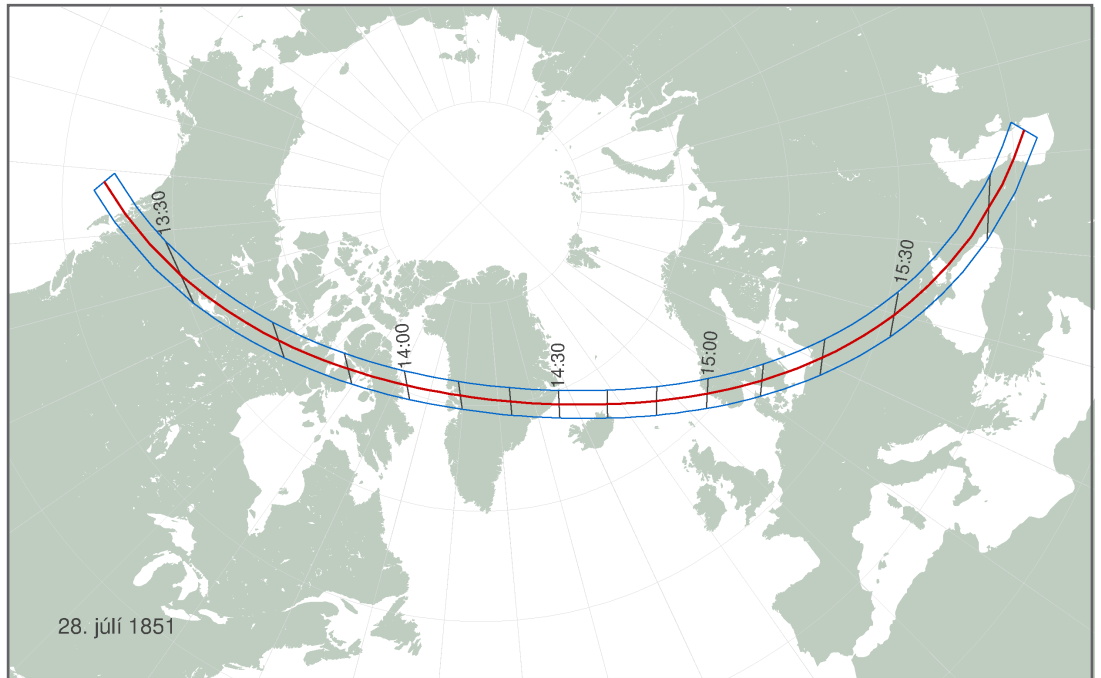
Á vegum Hins íslenska bókmenntafélags voru settar upp all margar veðurstöðvar á Íslandi upp úr 1840 til að rannsaka veðurfar á Íslandi og breytileika í því milli landshluta. Aðalhvatamaður að þessu verki var Jónas Hallgrímsson náttúrufræðingur og skáld.<sup>43</sup> Jónas var mikilhæfur nýyrðasmiður og eru orðin sólmyrkvi, almyrkvi, hringmyrkvi og tunglmyrkvi meðal annars úr hans smiðju. Þau sjást fyrst í Stjörnufræði Ursins í þýðingu Jónasar.<sup>44,45</sup> Þá þýddi Jónas grein eftir

Schumacher stjörnuspeking um almyrkvann í Vínarborg 1842 og birti í Fjölni.<sup>46,47</sup>

Reglulegar veðurathuganir fóru fram á tíu stöðum á landinu sumarið 1851. Ætlast var til að veðurathugunarmenn rituðu athugasemdir í veðurbækur um náttúrufræðingurinn sem þeim þættu óvenjuleg eða áhugaverð. Á fimm veðurstöðvum, Melum í Melasveit, Stykkishólmi, Hvammi í Dölum, Steinnesi í Húnaþingi og Odda á Rangárvöllum, koma fram athugasemdir í veðurbókum um sólmyrkvann.<sup>48,49</sup>



8. mynd. Braut almyrkvans 30. júní 1954. Almyrkvinn afmarkaðist af bláu línunum og miðja myrkvans var á rauðu línunni, en punktar á rauðu línunni sýna miðju almyrkvans á mínútu fresti. Myrkvun á landinu við hámark, þ.e. hlutfall af flatarmáli sólar sem var hulið, varð frá 91% til almyrkvunar syðst á landinu. – Path of the total eclipse of 30 June 1954 over S-Iceland. Totality occurred between the blue lines. Location of the center of the Sun's eclipse is shown every minute on the red central line. At maximum the Sun's obscuration was from 91% in NE-Iceland to totality. Kort/Map: Þórður Arason.



9. mynd. Braut almyrkva á sólu 28. júlí 1851. Almyrkvinn afmarkaðist af bláu línunum og tímasetning er sýnd miðað við íslenska klukku. Almyrkvinn sást við sólarupprás á Kyrrahafi út af Alaska, fór yfir norðausturluta Íslands um kl. 14.40 og sást síðast við sólsetur á Kaspíahafi. – Path of the total eclipse of the Sun on 28 July 1851. Totality was seen between the blue lines, UTC-times shown. The eclipse started at sunrise over the Pacific off Alaska, went over NE-Iceland at about 14:40 and was last seen at sunset in the Caspian Sea. Kort/Map: Þórður Arason.

## AÐ NJÓTA ALMYRKVA

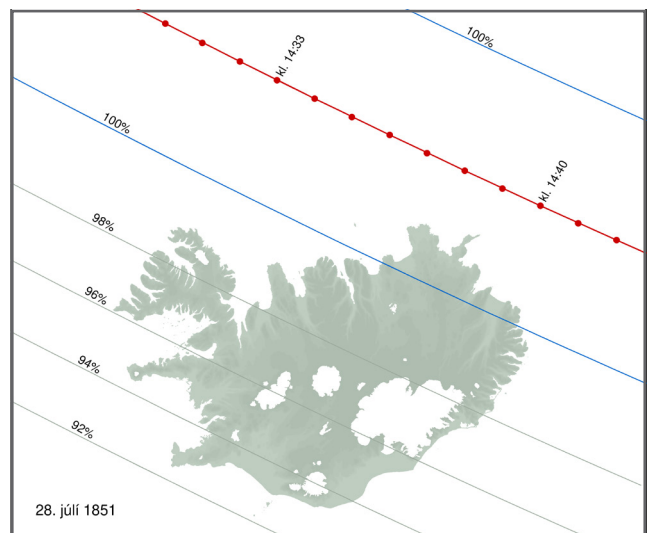
Auk veðurbóka er nokkuð varðveitt af dagbókum einstaklinga á Handritadeild Landsbókasafns frá miðri 19. öld,<sup>50–57</sup> og á Veðurstofunni.<sup>58</sup> Fundist hafa tvær dagbækur sem voru haldnar innan almyrkvasvæðisins, frá Grímsey og Kílakoti í Kelduhverfi.<sup>59,60</sup> Þar koma ekki fram lýsingar á almyrkvanum. Þá hafa fundist dagbækur og athuganir frá öðrum landshlutum með lýsingu á sólmyrkvanum, en þar sást einungis stór deildarmyrkvi.<sup>61,62</sup>

Löngu síðar birtust ritaðar lýsingar á sólmyrkvanum í endurminningum sjónarvotta. Guðrún Björnsdóttir (1832–1920) var 19 ára vinnukona í Haga í Aðaldal þegar hún sá sólmyrkvann, og rifjar hann upp 84 ára í Vesturheimi.<sup>63</sup> Matthías Jochumsson (1835–1920), prestur og þjóðskáld, var 15 ára sumarið 1851 á Kvennabrekku í Dölum og rifjar upp sólmyrkvann í endurminningum sínum sem komu út eftir hans dag, 1922.<sup>64</sup>

Þrátt fyrir fjölbreytta tímaritaútgáfu á Íslandi um miðja nítjándu öld liggja ekki fyrir neinar prentaðar samtímaheimildir um almyrkvann 1851. Líklega stafar það af prentbanninu eftir þjóðfundinn. Þó má finna ummerki um sólmyrkvann í veðurbókum, dagbókum og endurminningum sjónarvotta. Ekki hafa fundist heimildir frá almyrkvasvæðinu á Norðausturlandi. Heimildamenn gera ekki greinarmun á almyrkva eða stórum deildarmyrkva, enda óvíst að þeir hafi gert sér fulla grein fyrir muninum. Er tímar liðu fram féll almyrkvinn á Norðausturlandi árið 1851 í gleymsku.

Að mörgu er að hyggja þegar valinn er staður til að njóta þess að horfa á almyrkva. Engar hindranir mega vera í sólarátt, eða sterk ljós. Í deildarmyrkvanum mikla 2015 var áberandi að það kviknaði sjálfvirkt á mörgum útiljósum við hús þegar dimmdi.

Gott er að undirbúa sólmyrkvaskoðun með því að



10. mynd. Braut almyrkvans 28. júlí 1851. Almyrkvinn afmarkaðist af bláu línunum og miðja hans var á rauðu línunni. Punktur á rauðu línunni sýna miðju almyrkvans á mínútu fresti. Við hámark varð myrkvun á landinu frá 92% til almyrkvunar á norðausturluta landsins. – Path of the total eclipse of the Sun on 28 July 1851 over NE-Iceland. The totality occurred between the blue lines. Location of the center of the eclipse is shown at 1 min intervals on the red central line. At maximum the Sun's obscuration was from 92% in SW-Iceland to totality. Kort/Map: Þórður Arason.

hafa nákvæma tímatöflu fyrir athugunarstaðinn: C1 upphaf deildarmyrkva; C2 upphaf almyrkva; C3 lok almyrkva; C4 lok deildarmyrkva. Þá er nauðsynlegt að hafa rétta klukku. Farsímar og tölvur stilla innri klukku yfir netið.

Lengstur verður myrkvinn á Bjargtöngum, 2 mín. 13 sek., en það er að öðru leyti afleitur staður því þar vantar alla aðstöðu og innviði. Margir aðrir staðir koma til greina, þótt almyrkvinn verði þar nokkrum sekúndum styttri. Í heild varir sólmyrkvinn í rúmar tvær klukkustundir og nauðsynlegt er að vera kominn á staðinn tímanlega.

Dagana fyrir almyrkvann gæti verið útlit fyrir mismikla skýjahulu á vestanverðu landinu og því álitlegt að aka á vænlegan stað. Slíkt getur þó verið hættuspil, því ef margir leggja af stað á svipuðum tíma og stefna á svipaðar slóðir, þá er hætta á umferðaröngþveiti og ekki vilja menn sitja fastir í bíl á þjóðvegahátíð þegar myrkvinn gengur yfir.

Því er eindregið mælt með því að velja tímanlega góðan stað með öruggu húsaskjólí, salernis-, eldunar- og gistiðstöðu. Eftir myrkvann, sem lýkur á kvöldmatartíma, er upplagt að fagna atburðinum í góðra vina hópi, þrátt fyrir að það sé miðvikudagur.

## LOKAORÐ

Almyrkvi á sólu er fagurt náttúrufræðingur sem fáum hlotnast að njóta við góðar veðuráðstæður. Sumarið 2026 eiga margir Íslendingar möguleika á að líta þetta einstaka fyrirbæri í fyrsta sinn eigin augum.

Hér hefur verið gerð grein fyrir þeim almyrkvum og hringmyrkvum á sólu sem hafa gengið eða munu ganga yfir Ísland frá árinu 600 til 2200 e.Kr. Við samantektina hafa annálar, dagbækur, veðurbækur og fleiri gögn frá sögulegum tíma verið kannaðar ítarlega og verður sú úttekt birt á öðrum vettvangi.<sup>13</sup> Sambærileg úttekt á rituðum heimildum um sólmyrkva á Íslandi hefur ekki komið út áður á íslensku, en til er rit á þýsku frá 1933 eftir Þorkel Þorkelsson veðurstofustjóra með hliðstæðri samantekt til ársins 1734.<sup>19</sup>

## ABSTRACT

A total eclipse of the sun will be observed in Iceland on 12 August 2026, the thirteenth such since the settlement of Iceland in the 870s. During the last two centuries three total eclipses have been observed in Iceland, 1954, 1851 and 1833. After 2026 there will be a 170 year gap until the year 2196. The total eclipse of 1851 was mostly forgotten in Iceland due to a printing ban during that year, a time of political unrest in the country. This article lists all total and annular eclipses of the sun seen or foreseen in Iceland during the period AD 600 to 2200. Furthermore, a list of interesting phenomena that can be observed during a fair weather total eclipse of the sun is provided.

## ÞAKKIR

Höfundur þakkar Trausta Jónssyni veðurfræðingi sem veitti ómetanlega aðstoð og benti á ýmsar heimildir og fróðleik um forn fræði og 19. aldar-veðurathuganir. Martinu Stefani jarðfræðingi á Veðurstofunni er einnig þakkað fyrir aðstoð við að lesa úr latínutextum annála.

Þórður Arason (f. 1958) lauk BS-prófi í eðlisfræði við Háskóla Íslands árið 1982, uppeldis- og kennslufræði frá sama skóla 1984 og doktorsprófi í jarðeðlisfræði við Oregon State University árið 1991. Þórður starfaði á jarðhitadeild Orkustofnunar á árunum 1991 til 1996. Frá 1996 hefur hann unnið sem jarðeðlisfræðingur á Veðurstofu Íslands.

arason@vedur.is



## HEIMILDIR

1. Almennur fróðleikur um sólmyrkva: Eclipses. Myrkvavefur NASA. Slóð (skoðað 28.11. 2025): <https://science.nasa.gov/eclipses/>
2. Steel, D. 1999. Eclipse: The celestial phenomenon which has changed the course of history. Headline Book Publishing, Washington. 368 bls.
3. Harrington, P.S. 1997. Eclipse! The what, where, when, why & how. Guide to watching solar & lunar eclipses. John Wiley & Sons, Hoboken. 280 bls.
4. Þorsteinn Sæmundsson 1982. Sólmyrkvar á Íslandi fram til 2200. Almanak Háskólans um árið 1983. 87–88. (Endurbirt með lítilsháttar breytingum í Almanakinu 2015). Einnig á vef Almanaks Háskólans, slóð (skoðað 30.11. 2025): <http://www.almanak.hi.is/myrk2200.html>
5. Þorsteinn Sæmundsson 1994. Tíðni sólmyrkva og tunglmyrkva. Almanak Háskólans um árið 1995. 94–95. (Endurbirt með viðbótum í Almanakinu 2011). Einnig á vef Almanaks Háskólans, slóð (skoðað 30.11. 2025): <http://www.almanak.hi.is/myrkvar.html>
6. Þorsteinn Sæmundsson 2012. Sólmyrkvar á Íslandi 700–2100 e. Kr. Á vef Almanaks Háskólans. Slóð (skoðað 27.11 2025): <http://www.almanak.hi.is/frodleik.html>
7. Aplin, K.L. & Harrison, R.G. 2003. Meteorological effects of the eclipse of 11 August 1999 in cloudy and clear conditions. Proceedings of The Royal Society A 459. 353–371. doi: 10.1098/rspa.2002.1042
8. Hanna, E., Penman, J., Trausti Jónsson, Bigg, G.R., Halldór Björnsson, Sölvi Sjúrdarson, Hansen, M.A., Cappelen, J. & Bryant, R.G. 2016. Meteorological effects of the solar eclipse of 20 March 2015: Analysis of UK Met Office automatic weather station data and comparison with automatic weather station data from the Faroes and Iceland. Philosophical Transactions of the Royal Society A 374. doi: 10.1098/rsta.2015.0212
9. Hanna, E., Aplin, K., Halldór Björnsson, Bryant, R.G., Cappelen, J., Fausto, R.S., Fettweis, X., Graham, E., Harrison, R.G., Trausti Jónsson, Penman, J., de Alwis Pitts, D. & Bilton A.J. 2023. Meteorological effects and impacts of the 10 June 2021 solar eclipse over the British Isles, Iceland and Greenland. Weather 78(5). 122–156. doi: 10.1002/wea.4175
10. Predictions for solar and lunar eclipses. Fred Espenak – sólmyrkvavefur. Slóð (skoðað 28.11. 2025): <https://eclipsewise.com/solar/>
11. Espenak, F. & Meeus, J. 2006. Five millenium canon of solar eclipses: -1999 to +3000. NASA (NASA/TP-2006-214141), Washington. 52 bls.

12. Sólmyrkvavefur Veðurstofunnar, slóð: <http://brunnur.vedur.is/athuganir/sol/solmyrkvi/> – eða: <https://hergilsy.is/arason/solmyrkvi/>
13. Þórður Arason 2025. Sólmyrkvar á Íslandi – yfirlit um ritaðar heimildir. Handrit í vörslu höf.
14. Storm, G. (útg.) 1888. Islandske annaler indtil 1578. Norsk historisk kildeskriftfond, Christiania. 667 bls. (Resensannáll (880 bls. 14; 1131 bls. 20); Forni annáll (880 bls. 46); Høyersannáll (1131 bls. 59); Konungsannáll (880 bls. 100; 1147 bls. 116); Skálholtsannáll (880 bls. 174; 1193 bls. 180; 1312 bls. 203; 1330 bls. 206; 1339 bls. 208); Lögmannsannáll (1330 bls. 268; 1339 bls. 272; 1424 bls. 294); Gottskálksannáll (880 bls. 313; 1131 bls. 320; 1330 bls. 347–348; 1339 bls. 351); Flateyjarannáll (1339 bls. 400); Oddaverjaannáll (880 bls. 460)).
15. Hannes Þorsteinsson, Jón Jóhannesson, Þórhallur Vilmundarson, Guðrún Ása Grímsdóttir, Ásgeir S. Björnsson, Einar S. Arnalds & Eiríkur Jónsson (útg.) 1922–2002. Annálar 1400–1800. Annales islandici posteriorum saeculorum. I–VIII. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík. (Skarðsárannáll (1574 I, 154); Seiluanannáll (1656 I, 309); Vallholtsannáll (1656 I, 344); Fitjaannáll (1710 II, 378); Grímsstaðaannáll (1710 III, 545; 1733 III, 565); Setbergsannáll (1710 IV, 208); Hítardalsannáll (1733 II, 655); Espihólsannáll (1793 V, 204)).
16. ÍB 234b 4to. Dagbók Rasmusar Lievogs í Lambhúsum á Álftanesi. Nákvæmar athuganir á hringmyrkvum með teikningum 1791 og 1793. Handritadeild Landsbókasafns.
17. ÍB 23 4to. Dagbók Sveins Pálssonar. Almyrkvi 1833. Handritadeild Landsbókasafns.
18. ÍBR 83–86 8vo. Dagbækur Jóns Jónssonar yngri á Möðrufelli í Eyjafirði. Lýsingar á myrkvum 1791, 1793 og 1833. Handritadeild Landsbókasafns.
19. Þorkell Þorkelsson 1933. Sonnen- und Mondfinsternisse, nach gedruckten isländischen Quellen bis zum Jahre 1734. Vísindafélag Íslendinga, Reykjavík. 40 bls.
20. Andri Snær Magnason 2019. Um tímang og vatnið. Forlagið, Reykjavík. 320 bls. (Samtal um framtíðina, bls. 308–309).
21. Ólafur Hansson 1955. Árbók Íslands 1954. Bls. 30–85 í: Almanak Hins íslenska Þjóðvinafélags um árið 1956 (útg. Bjarni Jónsson, Trausti Einarsson). Reykjavík, Ríkisprentsmiðjan Gutenberg. (Tilv. bls. 65).
22. Leifur Ásgeirsson & Trausti Einarsson (útg.) 1953. Almanak Hins íslenska Þjóðvinafélags um árið 1954. Reykjavík. 128 bls. („Sólmyrkvar á Íslandi frá 700–1800 e. Kr.“ bls. 22).
23. Amerískir vísindamenn komnir hingað til að undirbúa rannsóknir á sólmyrkva að sumri. 1953. Alþýðublaðið, 20. október. 8.
24. Almyrkvi á sólu verður hér á landi að sumri. 1953. Tíminn 1. desember. 8 og 7.
25. Allar félagsbækur Menningarsjóðs og Þjóðvinafélagsins komnar út. 1953. M.a. um myrkvagrein í Alm. Þjvfél. Morgunblaðið 2. desember. 11.
26. Fimm félagsbækur frá Bókautgáfu Menningarsjóðs og Þjóðvinafélagsins. 1953. M.a. um myrkvagrein í Alm. Þjvfél. Þjóðviljinn 2. desember. 7.
27. Færist Ísland til á landakortinu við sólmyrkvann 30. júní. 1954. Tíminn 13. febrúar. 1 og 2.
28. Í almyrkvanum mikla í júnímánuði verður dimmt sem að nóttu í Vestmannaeyjum. 1954. Morgunblaðið 24. mars. 9.
29. Ferðafélag Íslands. Ferð á sólmyrkvasvæðið 30. þ. m. 1954. Tilkynning. Alþýðublaðið 23. júní. 7.
30. Ferðafélag Íslands. 1954. Tíminn 23. júní. 7.
31. Með Ferðafélaginu í sólmyrkvann. 1954. Þjóðviljinn 24. júní, 12.
32. Sól tér sortna. 1954. Þjóðviljinn 27. júní. 7.
33. Sólmyrkvinn er mikilfengleg sjón – Hættulegt að horfa með berum augum. 1954. Morgunblaðið 29. júní. 7.
34. Sólmyrkvinn um hádegis dag – Margar flugvélar fara með fólk inn á almyrkvasvæðið og fjöldi bifreiða. 1954. Alþýðublaðið 30. júní. 1.
35. Almyrkvi á sólu. 1954. Morgunblaðið 30. júní. 8.
36. Athuganir og mælingar tókust vel. 1954. Þjóðviljinn 1. júlí. 1.
37. Schroeter, J.Fr. 1923. Sonnenfinsternisse von 600 bis 1800 n. Chr. (Spezieller Kanon der zentralen Sonnen- und Mondfinsternisse, welche innerhalb des Zeitraums von 600 bis 1800 n. Chr. in Europa sichtbar waren). Videnskabselskabet i Kristiania, Kristiania. 329 bls.
38. Olufsen, C.F.R. 1850. Almanak um ár eftir Krists fæðing 1851 ... reiknað eftir afstöðu Reykjavíkur ... íslenskað og lagað eftir íslensku tímatali af Jóni Sigurðssyni. Kaupmannahöfn. (Um myrkvann á síðustu bls.).
39. Andersen, M.C. 2015. Total solformørkelse over Danmark i 1851 – anden del. Kvant 26(2). 16–18.
40. Pétur Pétursson, Jens Sigurðsson & Gísli Magnússon (ritstj.) 1851. Tíðindi frá Þjóðfundi Íslendinga árið 1851. Reykjavík. 547 bls.
41. Yfirlit ársins. 1852, 10. febrúar. Þjóðólfur 4. 298–299. (Um blaðaútgáfu bls. 299, í hægri dálki).
42. Páll Eggert Ólason 1931. Jón Sigurðsson III. Andpóf (1851–1859). Hið íslenska þjóðvinafélag, Reykjavík. (Um blaðaútgáfu 1851 bls. 31).
43. Trausti Jónsson & Hilmar G. Garðarsson 2009. Jónas Hallgrímsson og veðurathuganir á Íslandi um og upp úr 1840. Veðurstofa Íslands (VÍ 2009-019), Reykjavík. 24 bls.
44. Ursin, G.F. 1842. Stjörnufræði, ljett og handa alþíðu. Þýð. Jónas Hallgrímsson. Egill Jónsson, Egill Pálsson, Helgi Helgason og Einar Þórðarson, Viðeyjarklaustri. 244 bls.
45. Anna Sigríður Þráinsdóttir & Elín Elísabet Einarsdóttir 2022. Á sporbaug: Nýyrði Jónasar Hallgrímssonar. Forlagið, Reykjavík. 207 bls.
46. Schumacher, H.C. 1843. Almyrkvi á sólu í Vínarborg 8da dag júlímánaðar 1842. Þýð. Jónas Hallgrímsson. Fjölirnir 6. 55–58.
47. Schumacher, H.C. 1843. Beobachtung der totalen Sonnenfinsterniss am 8. Juli 1842 in Wien. Bls. 231–235 í: Jahrbuch für 1843 (útg. H.C.S.). J. G. Cotta'schen Buchhandlung, Stuttgart og Tübingen.
48. Svavar Hávarðsson & Trausti Jónsson 1997. Veðurhandrit: Könnun og skráning veðurfræðilegra gagna á Handritadeild Landsbókasafns og Þjóðskjalasafni Íslands. Veðurstofa Íslands (VÍ-G97039-ÚR30), Reykjavík. 28 bls.
49. ÍB 57 fol. Veðurbækur 1841–1867. Handritadeild Landsbókasafnsins. (Ofanleiti í Vestmannaeyjum, Gaulverjabær, Steinnes í Húnaþingi).
50. Davíð Ólafsson 2021. Frá degi til dags: Dagbækur, almanök og veðurbækur 1720–1920. Háskólaútgáfan, Reykjavík, 325 bls.
51. Óflokkuð veðurgögn. Oddi 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
52. Óflokkuð veðurgögn. Reykjavík. Kassi I, 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
53. Óflokkuð veðurgögn. Melar í Melasveit. Kassi II, 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
54. Óflokkuð veðurgögn. Hvammur í Döllum. Kassi III, 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
55. Óflokkuð veðurgögn. Akureyri. Kassi V, 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
56. Óflokkuð veðurgögn. Reykjavík. Kassi VI, 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
57. Óflokkuð veðurgögn. Hvanneyri við Siglufjörð. Umslög, merkt 401. 1851. Handritadeild Landsbókasafnsins.
58. Veðurbók á skjalasafni Veðurstofu Íslands. Stykkishólmur, 1851.
59. ÍB 826 8vo. Dagbók Sigurðar Tómassonar í Grimsey. Handritadeild Landsbókasafnsins.
60. ÍB 680 8vo. Dagbók Sveins Þórarinssonar í Kílakoti í Kelduhverfi. Handritadeild Landsbókasafnsins.
61. Lbs 347 8vo. Safn útgefna almanaka með athugasemdum sr. Þorleifs Jónssonar í Hvammi í Döllum. Handritadeild Landsbókasafnsins.
62. Lbs 2736 8vo. Dagbók Jóns Árnasonar í Haga í Aðaldal.
63. Sigfús Magnússon 1916. Lífsferill 84 ára konu, Guðrúnar Björnsdóttur. Syrpa 4(3). 166–174. (Um myrkvann bls. 172).
64. Matthías Jochumsson 1922. Sögukaflar af sjálfum mér. Prentsmiðja Björns Jónssonar, Akureyri. 500 bls. (Um myrkvann bls. 71).

# Ný tegund sæsnigils í Atlantshafi

– svartserkur *Melanochlamys diomedea*  
(Bergh, 1894)



Svanhildur Egilsdóttir  
Áki Jarl Láruson  
Laure de Montety  
Joana Micael  
Sindri Gíslason

Sumarið 2020 varð vart við óþekktu eggjasekki í fjöru í Fossvogi. Árið 2021 sáust sams konar eggjasekkir í fjöru í Sandgerði og árið 2022 í Breiðafirði. Í ágúst 2023 var leitað í fjöru í Breiðafirði, þar sem mikið var af eggjasekkjum, og fundust þá fullorðnir sniglar sem voru að mynda egg og eggjasekki sem þeir festu við undirlagið. Síðari athuganir mynda frá fyrsta fundi í Fossvogi árið 2020 leiddu í ljós að á þeim voru dýr að mynda eggjasekk. Formfræðileg greining, bæði á fullorðnum einstaklingum og eggjasekkjum, benti til að um væri að ræða sæsniglategundina *Melanochlamys diomedea*, sem hefur fengið nafnið svartserkur á íslensku. Þessi greining var svo endanlega staðfest erfðafræðilega með COI-, H3- og 16S rRNA- vísunum, og jafnframt tilvist nýrrar tegundar í Norður-Atlantshafi. Þekkt náttúruleg útbreiðsla sjávarsnigilsins svartserks nær frá Alaska til Kaliforníu Kyrrahafsmegin í Norður-Ameríku og lifir hann að jafnaði í fínkornóttum setbotni í fjöru og neðan hennar. Ekki er vitað hvenær eða hvernig tegundin barst til Íslands. Líklegast þykir að hann hafi komið hingað nýlega og að tegundin hafi borist hingað með sjóflutningum, annaðhvort með kjölvatni eða sem áseta (e. biofouling) á skipum. Um það er ekki hægt að segja með neinni vissu. Sniglar *Melanochlamys*-ættkvíslarinnar hafa til þessa aðallega fundist á Indó-Kyrrahafssvæðinu og í Kyrrahafinu. Aðeins ein tegund er þekkt utan þess svæðis, og lifir við Madeiraeýjar, Kanaríeýjar og Grænhöfðaeýjar í Atlantshafi.

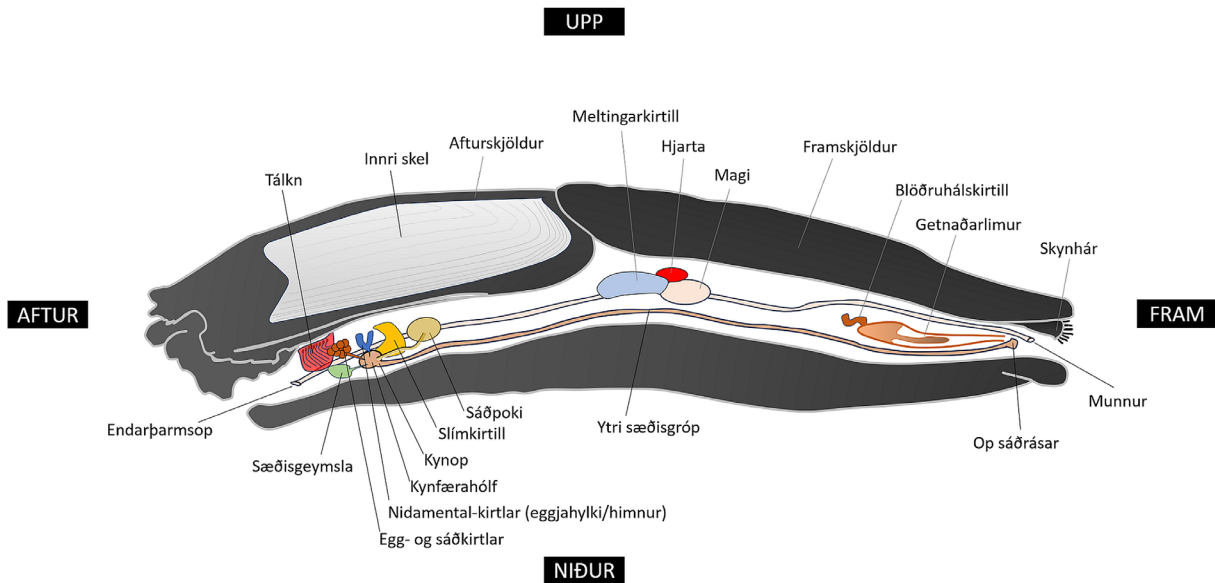
## INNGANGUR

Á norðurslóðum sjást nú þegar miklar breytingar í vistkerfum sjávar vegna hlýnunar loftslags, svo sem almenn minnkun hafíss og þar af leiðandi bæði stærri íslaus svæði og svæði sem eru íslaus í lengri tíma.<sup>1</sup> Eitt af því sem breyttar umhverfisaðstæður í sjó leiða af sér, hvort heldur orsökina eru loftslagsbreytingar eða annars konar röskun, er breytt tegundasamsetning.<sup>2</sup> Á síðustu áratugum hefur flutningur framandi tegunda um heiminn stóraukist. Í skýrslu IPBES frá 2023 eru framandi tegundir nú taldar vera ein helsta ógnin við líffræðilegan fjölbreytileika í heiminum.<sup>2</sup> Mikilvægt er að rannsaka og fylgjast með framvindu og afdrifum nýrra framandi tegunda, ekki síst til að vita hvort þær geti orðið ágengar. Fjöldi framandi tegunda í sjó hér við land hefur aukist jafnt og þétt á síðustu þremur áratugum og er heildarfjöldi þeirra nú 36.<sup>3</sup> Sem dæmi má nefna að grjótkrabbi (*Cancer irroratus*) fannst árið 2006 og sindraskel (*Ensis terranovensís*) árið 2020. Báðar þessar tegundir fundust fyrst í Hvalfirði og er talið að þær hafi borist til landsins með kjölvatni.<sup>4-6</sup> Þessar breytingar endurspeglar alþjóðlega þróun og aðgerðaleyfi stjórnvalda við stefnumótun, eftirlit og aðgerðir. Í skýrslu Sameinuðu þjóðanna um sjóflutninga frá 2024 kemur fram að sjóflutningar hafa aukist frá samdrætti í faraldrinum árin áður og er því spáð að þeir aukist enn frekar á komandi árum.<sup>7</sup> Það hefur því sjaldan verið mikilvægara en nú að vakta komu nýrra tegunda við Íslandsstrendur, þar sem búast má við áframhaldandi breytingum næstu áratugi.



1. mynd. Myndin er tekin 25. júní 2020 í Fossvogi og sýnir, í fyrsta skipti hér á landi, sæsnigilinn svartserk mynda eggjasekki og festa við undirlagið í fjörunni. – Image taken June 25th 2020 in Fossvogur, SW-Iceland, showing *Melanochlamys diomedea* laying eggsacs on the littoral substrate. June 25th 2020 is the first confirmed sighting of the species in Iceland. Mynd/Photo: Aron Alexander Þorvarðarson.

Í júní 2020 bárust Náttúrustofu Suðvesturlands myndir af hvítum sekkjum í fjöru í Fossvogi (1. mynd). Sekkirnir voru í miklum þéttleika í fjörunni og taldir vera möttuldýr. Við greiningu myndanna kom í ljós að um eggjasekki var um að ræða. Árið 2021 fann starfsfólk Náttúrustofunnar sams konar eggjasekki í fjöru í Sandgerði. Voru þeir ljósmyndaðir og teknir til frekari rannsókna og varðveislur. Þá eru til myndir teknar í júní og desember árið 2022 í innanverðum Breiðafirði. Sjá mátti mikið magn sams konar sekkja um sumarið og stöku sekki í desember. Það var svo haustið 2023 að starfsmenn Hafrannsóknastofnunar uppgötvuðu dýr sem voru að mynda eggjasekki í innanverðum Breiðafirði.



Byggt á: Rudman 1972, Anthes 2007

2. mynd. Innri gerð svartserks. – Anatomy of *Melanochlamys diomedea*. Teikning/Drawing: Sindri Gíslason.

Starfsfólk Náttúrustofu Suðvesturlands taldi út frá útlitseinkennum eggjasekkja að um væri að ræða tegundina *Melanochlamys diomedea*. Á sama tíma komst starfsfólk Hafrannsóknastofnunar að sömu niðurstöðu út frá sýnum frá Ósi á Skógarströnd, bæði útlitseinkennum dýra og útliti innri skeljar. Erfðarannsóknir á dýrum og eggjasekk leiddu til sömu niðurstöðu.

Tekin var ákvörðun um samvinnu milli Hafrannsóknastofnunar og Náttúrustofu Suðvesturlands, en þar starfa helstu sérfræðingar Íslands í framtíð tegundum í sjó. Nú var búið að staðfesta tegundina og næsta skref var að kynna fundinn fyrir fræðasamfélaginu og almenningi, til að athuga hvort einhverjir „fjörulallar“ hefðu frekari vitneskju um tegundina hér. Tilvist tegundarinnar á Íslandi var kynnt á veggspjaldi á Líffræðiráðstefnu Líffræðifélags Íslands haustið 2023, sem og með viðtölum og umfjöllun í fjölmiðlum og á samfélagsmiðlum. Kynningin hafði tilætluð áhrif og fljótlega bárust upplýsingar frá valinkunnum fjörulöllum. Þar sem tegundin hafði ekki íslenskt nafn kom það í hlut hópsins að finna viðeigandi heiti. Fyrir valinu varð heitið svartserkur. Það þótti mjög lýsandi fyrir tegundina, en vert er að nefna að grísk-latneska fræðiheitið *Melanochlamys* er samsett úr gríska lýsingarorðinu *melanos* = svartur, og nafnorðinu *khlamus* = skikkja eða serkur. Fyrstu dýrin fundust ekki langt frá Berserkjahrauni á Snæfellsnesi og þar kviknaði hugmyndin að nafninu -serkur. Áður hafa aðeins fundist tvær tegundir af þessum ættbálki (*Cephalaspidea*) við Ísland, þ.e. *Philine angulata* (skráningar úr gagnagrunni Hafrannsóknastofnunar) og *Philinissima denticulata*.<sup>8</sup> Báðar þessar tegundir lifa í Norður-Atlantshafi, en svartserkur hefur áður aðeins

fundist í Kyrrahafinu við strendur Norður-Ameríku.<sup>9</sup> Fundur svartserks við strendur Íslands þykir því mjög athyglisverður og þótti ástæða til að rannsaka erfðæfni sniglanna og bera saman við aðgengilegar genaradir í genasafni til að fá greiningu staðfesta.

Markmiðið með þessum skrifum er að greina frá fyrsta fundi svartserks í Atlantshafi. Segja frá ferlinu frá því að hann sást fyrst í fjöru við Ísland þar til staðfest tegundagreining fékkst, greina frá þektri útbreiðslu og fjalla um mikilvægi þess að fylgst sé vel með nýrri framtíð tegund og framvindu hennar.

## ALMENNT UM SVARTSERK

### Útlit

Tegundinni *M. diomedea* var fyrst lýst af Bergh (1894) sem *Doridium diomedea* en seinna var tegundin flutt í ættkvíslina *Aglaja*. Tegundin hafði verið greind sem *A. nana* í San Fransískó-flóa<sup>10</sup> og sem *A. diomedea*<sup>11</sup> í Kaliforníu. Rudman flutti tegundina *A. nana* í ættkvíslina *Melanochlamys* (1972). Árið 1978 staðfesti Gosliner að *M. nana*<sup>12</sup> væri samheiti *M. diomedea* (Bergh, 1894). Það var svo árið 2014 að Camacho-Garcia o.fl. staðfestu að tegundin tilheyrði *Melanochlamys*-ættkvíslinni.<sup>13</sup>

Bergh (1894) lýsti þeim tveim eintökum sem hann fjallaði um þannig að sniglarnir væru meiri á lengdina en á breiddina og lægri en breiddin. Litinn taldi hann vera svartan eða dökkbrúnan með dreifðum hvítum og gulum doppum. Lögum skeljanna væri sérstök, þær væru kalkkenndar og frekar þykkar en þynnri á jöðrunum. Gulleitar á jöðrum en vindingurinn hvítur.<sup>14</sup>

Dýrin geta orðið yfir 2 cm á lengd og 0,5–1 cm á breidd. Litur þeirra er dökkbrúnn eða svartur, oft með blárri slikju á möttuljöðrum. Skelin er inni í afturbol dýrsins og nær yfir um þriðjung af lengd þess (2. mynd). Löggun skeljarinnar er einstök fyrir tegundina, bæði stærri og lengri en hjá öðrum tegundum ættkvíslarinnar<sup>12</sup> (3. mynd).

Framendi dýranna er ávalur (4. mynd), og við munnopið eru skynhár. Búsvæði svartserks er í fjöru og neðan hennar á leir- og sandbotni.<sup>15</sup> Beggja megin munnins opnast slímkiptlar sem taldir eru gegna hlutverki við hreyfingar dýranna í seti. Dýrin ferðast um að hálfu eða öllu leyti niðurgrafin í setinu eftir nokkurs konar slímgöngum sem þau mynda jafnóðum<sup>14,16</sup> (5. mynd vinstri).

### Lifnaðarhættir

Sniglar *Melanochlamys*-ættkvíslarinnar eru rándýr og finnast almennt ofan í seti þar sem þeir leita að bráð, svo sem burstaormum, þráðormum og lindýrum.<sup>17</sup> Líta má á ávalt höfuðform þessara tegunda (4. mynd) sem aðlögun að graftarhegðun þeirra.<sup>12,16</sup> Hér við land finnst svartserkur oft að hálfu niðurgrafinn í setið og myndar þá oft för í sandinn (5. mynd).

Eins og aðrir baktáknar eru svartserkir tvíkynja og myndar hver einstaklingur bæði egg og sáðfrumur. Getnaðarlimur svartserks er ólíkur getnaðarlim annarra tegunda ættkvíslarinnar *Melanochlamys*. Framendi hans er oddlaga með kítíni á endanum.<sup>16</sup> Svartserkir festa eggin saman í eggjasekki sem eru 0,5 til 2,5 cm á lengd (sjá 1. og 6. mynd).<sup>18,19</sup> Eggjasekkirnir eru festir við undirlagið með þráðum sem liggja niður í setið og varna því að eggjasekkirnir losni frá undirlaginu. Í hverjum eggjasekk eru fjölmörg eggjahylki, umlukin slímhjúpi. Í hverju hylki eru eitt til fjögur egg. Eggjahylkin raðast á þráð svo úr verður perlulaga spírall.<sup>18</sup> Í hverjum eggjasekk eru frá 25 til 50 þúsund eggjavisar.<sup>20</sup> Slímið sem umlykur eggjahylkin veitir vörn gegn seltu- og sýrustigsbreytingum og fleiri umhverfisþáttum. Vegna þessa þola eggjasekkirnir



3. mynd. Skel svartserks er innan í dýrinu. Löggun hennar er einkennandi fyrir tegundina. – The shell of *Melanochlamys diomedea* is located inside the animal. Its shape is characteristic of the species. Ljós./Photo: Svanhildur Egilsdóttir.



4. mynd. Svartserkur. Framendi dýrsins er hægra megin. – *Melanochlamys diomedea* with the front of the animal facing right. Ljós./ Photo: Svanhildur Egilsdóttir.



5. mynd T.v. Far eftir svartserk. T.h.: Svartserkur hálf-niðurgrafinn í setið. – Left: Tracks left by *Melanochlamys diomedea*. Right: *Melanochlamys diomedea* half buried in the sediment. Ljós./ Photos: Svanhildur Egilsdóttir.



6. mynd. T.v.: Eggjasekkur. Perlulaga þræðir sjást vel (mynd tekin í stúdíói). T.h.: Svartserkur að mynda eggjasekk. – Left: Egg sac with clearly visible pearl-like threads (photo taken in a studio). Right: *Melanochlamys diomedea* laying an eggsac. Myndir/ Photos: Svanhildur Egjilsdóttir.

mjög lága seltu, svo sem við árósa.<sup>20</sup> Það tekur egginn um 7–10 daga að þroskast og að þeim tíma loknum klekjast lirlfur sem eru sviflægur í meira en mánuð.<sup>15</sup> Lirlfur geta því borist langar leiðir frá staðnum sem þær klöktust á.

### Útbreiðsla á heimsvísu

Náttúruleg útbreiðsla svartserks er meðfram Kyrrahafsströnd Norður-Ameríku frá Suður-Kaliforníu til Alaska.<sup>10</sup> Skilgreining náttúrulegrar, upprunalegrar eða innlendrar tegundar er að um sé að ræða tegund sem er innan náttúrulegs útbreiðslusvæðis, þ.e. tegund sem hefur þróast þar eða komist þangað eftir náttúrulegum leiðum.<sup>21</sup> Fyrstu eintökin af sniglunum fundust í Alaska, annað á eyjunni St. Paul í Beringshafi og hitt á eyjunni Shumagin í Norður-Kyrrahafi.<sup>10,12</sup>

Einn fundarstaður svartserks er skráður utan Kyrrahafs, í Mexíkóflóa (7. mynd), en sú skráning er frá 1951 og eintakið aðeins eitt, óvarðveitt. Í grein Cookes o.fl. frá 2014 er eina tegundin af *Melanochlamys*-ættkvíslinni í Atlantshafi talin vera *M. maderensis*.<sup>9</sup>

Engar heimildir eru til um fund svartserks í Atlantshafi utan Íslands. Í *Melanochlamys*-ættkvíslinni eru 18 viðurkenndar tegundir.<sup>22</sup> Flestar þeirra eru á Indó-Kyrrahafssvæðinu.<sup>9</sup> Þar til nú hafði einungis ein tegund ættkvíslarinnar, þ.e. *M. maderensis*,<sup>23</sup> verið staðfest í Atlantshafi, nánar tiltekið við Madeiraeyjar, Kanaríeyjar og Grænhöfðaeyjar.<sup>9,24</sup>

Líklegt verður að teljast að svartserkur hafi borist hingað úr Kyrrahafi. Ekki er þó hægt að útiloka að dýrið sé að finna á öðrum hafsvæðum og hafi borist þaðan til Íslands.

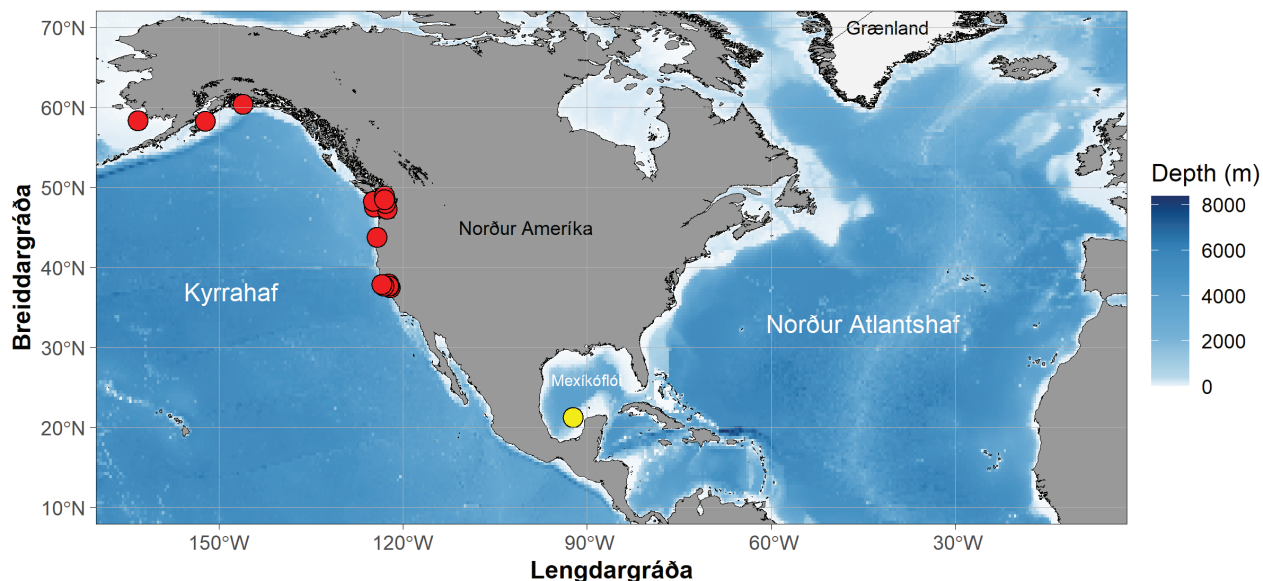
### SVARTSERKUR Á ÍSLANDI

#### *Getur verið að svartserkur hafi verið hér lengi?*

Fyrsta yfirlit um ættbálkinn Cephalaspidea á Íslandi gerði danski dýrafræðingurinn Henning M. Lemche árið 1938 og skráði hér 11 tegundir.<sup>25</sup> Sex áratugum síðar bættust við tvær tegundir í rannsókn sænska lindýrafræðingsins Anders Warén.<sup>26</sup> Í hvorugt skiptið er getið um svartserk. Árið 2006 kom út í ritröðinni Zoology of Iceland, samantekt 30 ára rannsókna Agnars Ingólfssonar á fjörum við Ísland. Þar eru birtar niðurstöður rannsókna hans á sandmaðks- og skeraleirum allt í kringum landið tímabilið 1981 til 1998. Tegundarinnar *M. diomedea* er þar hvergi getið.<sup>27</sup>

Í botnþörunarannsóknnum sem fram fóru á árunum 2016–2021 við innanvert Hörgsnes í Vatnsfirði, þar sem endurvöxtur klóþangs (*Ascophylum nodosum*) var metinn, varð ekki vart við svartserki eða eggjasekki þeirra, en í heimsókn á sama svæði sumarið 2024 mátti á hinn bóginn sjá mikinn fjölda eggjasekkja um alla vikina (8. og 9. mynd). Ólíklegt er að eggjasekkirnir hafi farið fram hjá rannsokendum áður, þar sem vaða þarf leirinn til að komast á sýnatökusvæðið. Leiða má að því líkur að svartserkur hafi komið á þetta svæði á tímabilinu 2021 til 2024.

Sá möguleiki er alltaf fyrir hendi að við rannsóknir í fjörum fari lífverur fram hjá rannsokendum, og sérstaklega á þetta við ef um mjög smáar lífverur er að ræða. Eggjasekkir svartserks eru hins vegar mjög áberandi, 0,5–2,5 cm á lengd, og því ólíklegt að tegundin hafi verið hér án vitundar þeirra sem fara í fjöru.



7. mynd. Þekkt útbreiðsla svartserks skv. OBIS (OBIS mapper, 2024, gögn sótt 20. janúar 2025). Staðfestir fundarstaðir (rauðir punktar) eru meðfram Kyrrahafsströnd N-Ameríku. Einn óstaðfestur fundarstaður tegundarinnar er í Mexíkóflóa (gulur punktur). – Known distribution of *Melanochlamys diomedea* according to OBIS (OBIS mapper, 2024, data retrieved 20 January 2025). Confirmed locations (red dot) are along the Pacific coast of North America. One unconfirmed location of the species is in the Gulf of Mexico (yellow dots). Kort/Map: Sindri Gíslason.

## UPPGÖTVUNIN OG FYRSTU FUNDIR

Eins og kom fram í inngangi barst starfsmönnum Náttúrustofu Suðvesturlands mynd af sekkjum í fjöru í Fossvogi í júní 2020. Að sögn ljósmyndara, sem taldi að hér væri mögulega um að ræða möttuldýrið glærmöttul (*Ciona intestinalis*), voru stórir sekkir (1. mynd) um alla fjöruna. Í apríl árið 2021 fann starfsfólk Náttúrustofunnar töluvert magn samskonar eggjasekkja í Sandgerði og voru sýni og myndir teknar á vettvangi til staðfestingar. Meira var ekki gert að sinni, en í júní árið 2023 var magn þessara ógreindu eggjasekkja svo mikið í Sandgerði að starfsfólki Náttúrustofunnar stóð orðið ekki á sama. Nú væri orðið brýnt að finna út hvaða dýrategund þeir tilheyrðu. Ferskum sýnum var safnað úr fjörunni og jafnóðum hafin greining á rannsóknarstofu Náttúrustofunnar í Sandgerði. Leit í helstu bókum og greiningarlyklum skilaði ekki árangri en við leit á netinu vöknudu sterkar grunsemdir um að eggjasekkirnir tilheyrðu tegundinni *M. diomedea*. Sýni voru þá undirbúin og samband haft

við Matís um að fá eggjasekkina raðgreinda til að leiða málið til lykta. Sökum sumarfría og verkefnastöðu var síðan ákveðið að biða fram á haustið.

Í júní 2022 varð einnig vart við töluvert magn eggjasekkja á leirum við innanverðan Breiðafjörð og til er mynd af eggjasekkjum þaðan frá desember það ár. Sumarið 2023 var síðan enn orðið afar mikið af eggjasekkjum í innanverðum Breiðafirði. Hinn 18. júní 2023 setti einn greinarhöfunda, starfsmaður Hafrannsóknastofnunar, fyrirspurn í hópinn „Íslenskir líffræðingar“ á samfélagsmiðlinum Facebook, þar sem spurt var hvort einhverjir könnuðust við þessa einkennilegu sekki. Engin svör bárust. Í ágúst 2023 voru eggjasekkirnir myndaðir á rannsóknarstofu og ljósmynd send til sérfræðings í hryggleysingjum við Háskólann í Bergen. Vaknaði þá grunur um að um ágenga tegund gæti verið að ræða. Ein tilgátan var að þetta væri snigillinn *Haminella solitaria*, tegund sem fannst fyrst í Evrópu árið 2016, nánar tiltekið við strendur Þýskalands<sup>28</sup>, og síðar í Danmörku árið 2020.<sup>29</sup> Í ljósi þessa þótti ástæða til að fara á fundarstað



8. mynd. Við Hörgsnes á Barðaströnd 21. ágúst 2016. – At Hörgsnes, Barðaströnd, S-Westfjords, on 21 August, 2016. Ljós./Photo: Svanhildur Egilsdóttir.

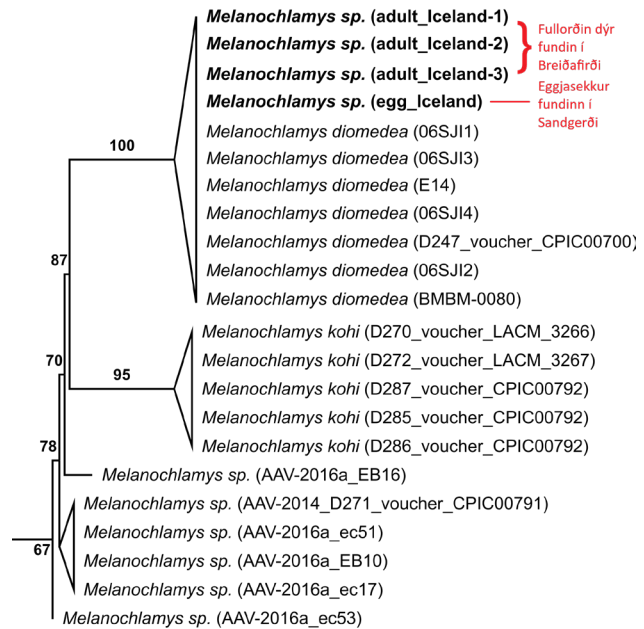


9. mynd. Eggjasekkir svartserks við Hörgsnes 5. ágúst 2024. – Egg sacs at Hörgsnes, Barðaströnd, on 5 August 2024. Ljós./Photo: Svanhildur Egilsdóttir.



10. mynd. Svartserkir að makast. Gula örín vísar á getnaðarlími sniglanna. – *Melanochlamys diomedea* mating. The yellow arrow points to the penises of the snails. Ljósmynd./Photo: Svanhildur Egilsdóttir.

11. mynd. T.h.: Hluti af þróunarferilstré, reiknað með hámarkssennileikaaðferð byggð á COI-genaaröðum frá sniglum úr Breiðafirði og eggjasekk frá Sandgerði, sem og genaröðum frá NCBI GenBank. Íslensku sýnin eru feitletruð og sagt frá sýnistökustað (rautt letur). – Right: A portion of the phylogenetic tree produced via comparison of the mt COI sequences of the Icelandic snail and egg sac samples to all available *Melanochlamys* sequences available from NCBI GenBank. The Icelandic samples are highlighted in bold, with the sample source specified in red. Ljósmynd./Photo: Áki Jarl Láruson.



eggjasekkjanna í innanverðum Breiðafirði og leita snigilsins. Hinn 28. ágúst 2023 fóru tveir starfsmenn Hafrannsóknastofnunar í Breiðafjörð. Bar sú ferð þann árangur að eintökum var safnað til frekari rannsókna og myndir náðust af sniglum að mynda eggjasekki, og einnig af sniglum að makast (10. mynd).

Á rannsóknarstofu voru sniglarnir mældir og krufðir, og skelin innan í dýrinu rannsökuð (3. mynd). Athugun á skelinni leiddi í ljós að ekki væri um tegundina *Haminella solitaria* að ræða. Útlit skeljarinnar benti til að tegundin tilheyrði ættinni Aglajidae í ættbálknum Cephalaspidea. Ástæða þótti að rannsaka erfðamengi sniglanna og bera saman við aðgengilegar genaraðir í genasafni.

## STAÐFESTING TEGUNARINNAR

Tekin voru sýni úr eggjasekk frá Sandgerði og úr fæti þriggja snigla sem safnað var í innanverðum Breiðafirði og sýnin varðveitt í 96% etanóli. Á rannsóknarstofu Mátis var DNA einangrað úr sýnunum. Þrjú genabútar voru magnaðir upp úr hverju sýni samkvæmt aðferðafræði Galindo o.fl.,<sup>30</sup> tveir í hvatberaerfðamenginu, cytokrómí c oxídasi I (COI)<sup>30</sup> og 16S ríbósóm RNA (16S),<sup>31</sup> og einn í kjarnaerfðamenginu, histónn H3 (H3).<sup>32</sup> DNA-raðgreining fór fram á ABI3730XL-tæki á vegum Eurofins Genomics í Köln, Þýskalandi. DNA-raðir voru lagðar saman með ClustalW-algrími.

Genaraðir hvatberagenanna voru bornar saman við allar aðgengilegar genaraðir ættkvíslarinnar *Melanochlamys* úr gagnasafni NCBI GenBank. Þróunarferilstré var reiknað með Iqtree<sup>34-36</sup> með hámarkssennileikaaðferð og skóþvengsaðferð með

1000 endurtekningum til að reikna stuðningsgildi hverrar greinar (11. mynd). Niðurstöður erfðagagna staðfestu að hér var ótvírætt um að ræða tegundina *M. diomedea*.

## NÚVERANDI ÚTBREIÐSLA

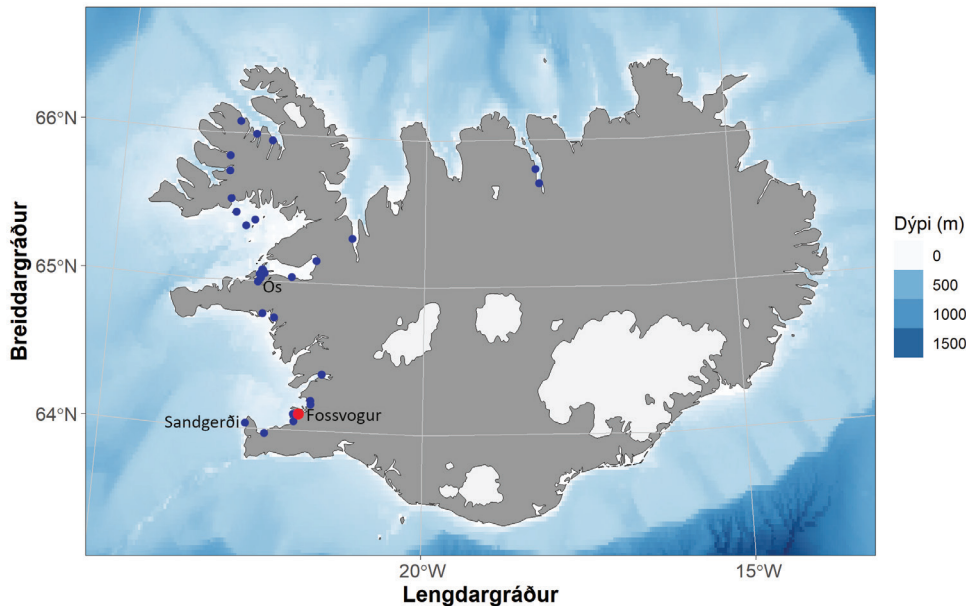
Eins og fram hefur komið varð fyrst vart við eggjasekki í Fossvogi árið 2020, næst árið 2021 í Sandgerði og árið 2022 við innanverðan Breiðafjörð. Sekkir voru á öllum þessum stöðum 2023. Fyrstu fullorönu dýrin fundust haustið 2023. Árið 2023 var þekkt útbreiðsla bundin við Suðvestur- og Vesturland en árið 2024 bættust meðal annars við fundarstaðir á Vestfjörðum (Arnarfirði, Dýrafirði, Ísafjarðardjúpi), í innanverðum Húnaflóa og í Eyjafirði (1. tafla).

Sumarið og haustið 2024 varð vart við eggjasekki og dýr í fjörum víða við suðvestan-, vestan- og norðanvert landið, á svæðinu frá Sandgerði til Eyjafjarðar (sjá 1. töflu). Meðal annars fundust svartserkir í setsýnum á 8 m dýpi utan við Sundahöfn við Reykjavík í sýnatöku Hafrannsóknastofnunar þegar verið var að meta ástand strandsjávar.

Útbreiðsla svartserks virðist hafa verið hröð hér við land. Hafi hann komið fyrr en hér er talið er líklegt að hann hefði sést í fjörurannsóknum, svo sem í Breiðafirði árið 2021. Mjög líklega hefur svartserkur því uppgötvast fljótlega eftir komuna til landsins og sennilega hefur hann dreifst frá Suðurnesjum réttisælis í kringum landið. Svartserk virðist vegna vel hér við land og þéttleiki í sumum fjörum er mikill (mat höfunda). Strandstraumur flæðir réttisælis í kringum landið og gegnir mikilvægu hlutverki við flutning lirlfna frá hrygningarsvæði á uppeldissvæði.<sup>37</sup> Að sama skapi hefur strandstraumurinn verið talinn leika

1. tafla Fundarstaðir svartserks við Ísland árin 2020–2025. – Observations of *Melanochlamys diomedea* around Iceland Iceland in 2020-2025.

Fundarstaður <i>Location of find</i>	Dagsetning <i>Date of find</i>	Finnandi/Heimild <i>Found by/Reference</i>	Athugasemd <i>Comment</i>
Fossvogur	25.06.2020	Aron Alexander Þorvarðarson	Mikill fjöldi eggjasekkja. Myndir staðfestar: Sindri Gíslason.
Sandgerði	28.04.2021	Sindri Gíslason og Joana Micael	Mikill fjöldi eggjasekkja. Sýni varðveitt í EtOH og formalíni.
Ós í Breiðafirði	15.06.2022	Svanhildur Egilsdóttir	Mikill fjöldi eggjasekkja. Myndaðir.
Sandgerði	19.06.2023	Sindri Gíslason og Joana Micael	Mikill fjöldi eggjasekkja. Sýni varðveitt í EtOH og formalíni.
Ós í Breiðafirði	28.08.2023	Svanhildur Egilsdóttir og Laure de Montety	Fullorðin dýr og eggjasekkir í miklum fjölda. Dýr varðveitt í EtOH.
Mjóvík í Álftafirði	15.07.2024	Jörundur Svavarsson	Mikill fjöldi eggjasekkja.
Reykeyjarflaga í Breiðafirði	08.08.2023	Hafþór Hannesson	Mikill fjöldi eggjasekkja á háfjörú sunnan Reykeyjarflögu. Myndir staðfestar: Sindri Gíslason.
Fossvogur	08.04.2024	Sindri Gíslason	Fullorðin dýr.
Kollafjörður	13.05.2024	Sindri Gíslason	Eggjasekkir.
Leiruvogur	23.05.2024	Sindri Gíslason	Mikill fjöldi eggjasekkja og dýra.
Hvallátur	10.07.2024	Dagný Lára Mikaelisdóttir	Eggjasekkir. Mynd staðfest: Svanhildur Egilsdóttir.
Búðardalur	09.07.2024	Dagný Lára Mikaelisdóttir	Eggjasekkir. Mynd staðfest: Svanhildur Egilsdóttir.
Hausthús á Skógarnesi	16.07.2024	Gunnar Þór Hallgrímsson	Eggjasekkir. Mynd staðfest: Svanhildur Egilsdóttir.
Kaldárós	16.07.2024	Gunnar Þór Hallgrímsson	Eggjasekkir. Mynd staðfest: Svanhildur Egilsdóttir.
Öxney í Breiðafirði	18.07.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Mikill fjöldi eggjasekkja.
Stórhólmi í Breiðafirði	18.07.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Mikill fjöldi eggjasekkja milli Suðureyjar og Ólafseyjar.
Ólafsey í Breiðafirði	18.07.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Eggjasekkir.
Árnúsaey í Breiðafirði	19.07.2024	Róbert Arnar Stefánsson	Mikill fjöldi eggjasekkja.
Stóra Hrísey í Breiðafirði	20.07.2024	Jón Sólmundsson og Gunnar Ingi Friðriksson	Eggjasekkir.
Galtarey í Breiðafirði	20.07.2024	Jón Sólmundsson og Gunnar Ingi Friðriksson	Eggjasekkir.
Botn í Dýrafirði	04.08.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Fullorðin dýr og eggjasekkir.
Dynjandisvogur	05.08.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Fullorðin dýr og eggjasekkir.
Hörgsnes	05.08.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Eggjasekkir.
Hvallátur	09.08.2024	Þórður Örn Kristjánsson	Eggjasekkir. Mynd staðfest: Svanhildur Egilsdóttir.
Prestsbakki Hrutafirði	26.08.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Fullorðin dýr og eggjasekkir.
Ós í Eyjafirði	26.08.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Við mynni Hörgár. Fullorðin dýr og eggjasekkir.
Lónsvík í Eyjafirði	26.08.2024	Svanhildur Egilsdóttir og Jón Sólmundsson	Fullorðin dýr og eggjasekkir.
Flatey á Breiðafirði	28.08.2024	Sindri Gíslason	Fullorðin dýr og mikill fjöldi eggjasekkja.
Ísafjörður	29.08.2024	Sindri Gíslason og Sigríður Vala Finnsdóttir	Eggjasekkir.
Hvítanes í Ísafjarðardjúpi	29.08.2024	Sindri Gíslason og Sigríður Vala Finnsdóttir	Fullorðin dýr og eggjasekkir.
Mjóifjörður í Ísafjarðardjúpi	29.08.2024	Sindri Gíslason og Sigríður Vala Finnsdóttir	Eggjasekkir.
Seylan á Álftanesi	01.09.2024	Sindri Gíslason og Sæunn Iða Sindradóttir	Eggjasekkir.
Hvaleyrarlón í Hafnarfirði	01.09.2024	Sindri Gíslason og Sæunn Iða Sindradóttir	Eggjasekkir.
Vogar á Vatnsleysuströnd	03.09.2024	Sindri Gíslason og Joana Micael	Mikill fjöldi eggjasekkja og dýra.
Innri Sund í Kollafirði	17.09.2024	Laure de Montety	Dýr fundust í sýni af 8 m dýpi.
Sunnan við ós Fáskrúðar í Dalabyggð	03.10.2024	Róbert Arnar Stefánsson	Eggjasekkir.
Helguvík í Hvalfirði	28.04.2025	Sindri Gíslason og Sigríður Vala Finnsdóttir	Fullorðin dýr og mikill fjöldi eggjasekkja.
Hafnarey við Flatey á Breiðafirði	17.05.2025	Karl Gunnarsson	Mikill fjöldi eggjasekkja og dýr á 6 m dýpi.



12. mynd. Þekkt útbreiðsla svartserks við Ísland í apríl 2025. Fyrsti fundarstaður er merktur með rauðum punkti en allir aðrir fundarstaðir með bláum punktum. – A map showing the known distribution of *Melanochlamys diomedea* in Iceland in April 2025. Red dot indicates the location where the first individual was found, others with blue dots. Kort/Map: Sindri Gíslason.

lykilhlutverk í hraðri útbreiðslu framandi tegunda með sviflæg lirfustig.<sup>3,4</sup> Mikið magn eggjasekkja og fjöldi eggja í hverjum sekk hjá svartserknum, og sú staðreynd að lirfustig hans er sviflægt í meira en mánuð,<sup>15</sup> gefur til kynna að dreifing geti verið hröð. Hann er nú þegar kominn í Eyjafjörð og líklegt er að hann finnist fljótlega nánast allt í kringum landið. Takmarkandi þáttur í útbreiðslu hans gæti orðið skortur á búsvæðum, sér í lagi við suðurströndina þar sem brimasamar sandfjörur eru víðáttumestar.<sup>38</sup>

#### HVERNIG BARST SVARTSERKUR HINGAÐ?

Ekki er vitað með vissu hvernig svartserkur barst til landsins. Mikill fjöldi sjávarlífvera hefur í tímans rás borist víðs vegar um heimshöfin, með sjávarstraumum og á rekavið og öðrum fljótandi hlutum. Á okkar tímum tengist flutningur lífvera milli fjarlæggra hafsvæða aðallega athöfnum manna og er síður hluti náttúrulegra ferla eins og áður var, enda hafa sjóflutningar aukist stöðugt frá miðri 20. öld.<sup>39,40</sup> Flutningur lífvera með kjölvatni skipa og á skipskrokkum er nú talinn helsta dreifingarleið framandi sjávarlífvera.<sup>2</sup> Líklegast má því telja að tegundin hafi borist hingað með skipum. Mikill fjöldi framandi sjávartegunda hefur einmitt numið hér land á síðastliðnum áratugum og eru grjótkrabbí, glærmöttull (*Ciona intestinalis*) og sindraskel dæmi um slíka landnema.<sup>5,6,41–43</sup> Í því ljósi má nefna að bæði grjótkrabbí og sindraskel eru talin hafa borist til landsins með kjölvatni flutningaskipa frá austurstönd

Norður-Ameríku.<sup>5</sup> Litlar upplýsingar er að finna um skipaferðir frá Kyrrahafsströnd Norður-Ameríku til Íslands en nokkur skipafyrirtæki, svo sem MSC Mediterranean Shipping og Hapag-Lloyd, sigla reglulega milli Vancouver og austurstrandar Norður-Ameríku. Siglingin tekur um 40 til 60 daga. Eins og áður er nefnt geta lirfur svartserks lifað meira en mánuð í vatni. Þá getur set flust með kjölvatnstönkum<sup>43</sup> og í því egg, belgir (e. cyst) og gró svifþörungum.<sup>44</sup> Berist eggjasekkur svartserks í kjölvatnstank gæti fræðilegur flutningstími tegundarinnar því lengst sem nemur þroskunartíma eggjanna og þannig lengt mögulega aðkomuleið tegundarinnar um eina viku. Því gæti svartserkurinn mögulega lifað ferðalagið af, þótt sigling frá Kyrrahafsströnd Norður-Ameríku tæki lengri tíma, til dæmis vegna viðkomu í höfnum. Tíðar skipaferðir hafa verið milli Íslands og austurstrandar Norður-Ameríku um áratuga skeið<sup>45</sup> og hættan á tegundaflutningi því verið viðvarandi. Víða í heiminum eru strjálbýl svæði sem eru lítið rannsökuð eða heimsótt og mögulegt er að svartserk sé nú þar að finna.

Annar möguleiki er að tegundin hafi borist hingað með fuglum. Sýnt hefur verið fram á að fræ og tegundir snigla með utanálggjandi skel geta lifað það af að fara í gegnum meltingarveg fugla, og hafa lífverur dreifst á þann hátt.<sup>46</sup> Eins og áður segir hefur svartserkur innri skel og því er flutningur í meltingarvegi ólíklegur. Hins vegar er þekkt að farfuglar geta borið hryggleysingja útvortis milli svæða,<sup>47</sup> og þekkt er að fuglar geta borið fræ og egg hryggleysingja í fjöðrum eða á fótum.<sup>48</sup>

Eggjasekkir svartserks eða dýrið sjálft gætu mögulega festst í fjöðrum eða á fótum fugla, en þetta verður þó að teljast frekar ólíklegt þar sem sekkirnir eru ekki límkennir, og um þetta eru engar heimildir. Ísland er viðkomustaður margra farfugla. Koma sumir þeirra hingað til dvalar um hríð en aðrir eru svokallaðir fargestir og koma hér við á leið sinni milli varpstöðva og vetrarstöðva. Dæmi eru um fargesti sem stunda árstíðabundið far milli Evrópulanda og Kanada og nýta strandsvæði til fæðuöflunar, svo sem margæsir (*Branta bernicla*) og rauðbristingar (*Calidris canutus*).<sup>49</sup>

Ekki er hægt að fullyrða um hvernig svartserkur barst til Íslands alla þessa leið úr Kyrrahafi, þótt flutningur með skipum sé líklegasta sviðsmyndin. Því verður ekki breytt að hingað er hann kominn. Forvitnilegt verður að fylgjast með framvindu hans hér og ekki síður hvort hann finnst í kjölfarið víðar við strendur Atlantshafs.

## ÁHRIF Á ÍSLENSKT VISTKERFI

Hröð útbreiðsla svartserks við strendur Íslands er áhyggjuefni. Fyrstu rannsóknir benda til að hann geti fjölgað sér hratt. Mikilvægt er að fylgjast með þróuninni, útbreiðslunni og fjölda dýra, sem og því hvaða áhrif svartserkurinn hefur á það lífríki sem fyrir er. Nýjar tegundir eru flokkaðar eftir þeim áhrifum sem þær hafa á vistkerfið. Tegund telst framandi hafi hún verið flutt af mannavöldum á nýjan stað, viljandi eða óviljandi, úr náttúrulegu umhverfi sínu.<sup>50</sup> Framandi tegund er síðan skilgreind ágeng ef fram kemur mikil eða hröð útbreiðsluaukning eða líklegt er að tegundin hafi neikvæð áhrif á líffræðilegan fjölbreytileika á nýja staðnum, valdi efnahagslegu eða umhverfislegu tjóni eða hafi skaðleg áhrif á heilsu manna.<sup>51</sup>

Dreifing svartserks hingað til verður að teljast hröð. Frá 2020 til 2024 hefur hans orðið vart frá Reykjanesi norður í Eyjafjörð. Víða virðist þéttleiki eggjasekkja vera mikill, og bendir það til þess að afrán sé takmarkað. Litlar upplýsingar eru um afræningja á svartserki í Kyrrahafi, en í heimild getur þó um sæsnigilinn *Olea hansineensis*, sem finnst aðeins í Kyrrahafi.<sup>52</sup> Í ljósi fjöldans og mikillar útbreiðslu er áriðandi að kanna hvaða áhrif svartserkur getur haft á vistkerfi Íslands. Áhrif á það lífríki sem fyrir er eru enn ekki ljós, en gætu verið dulin vegna takmarkaðra rannsókna.

Sniglar *Melanochlamys*-ættkvíslarinnar eru rándýr. Þeir ferðast um hálfvegis niðurgrafnir og leita bráðar á borð við burstaorma, þráðorma og lindýr.<sup>19</sup> Vaðfuglar eru dýraætur sem éta alls konar hryggleysingja í fjörum. Í rannsókn á fæðuvali vaðfugla á fari um Reykjanesskaga kom fram að þeir eru tækifærissinnar og sækja í flesta fæðuhópa fjörunnar.<sup>53</sup> Rannsaka þarf áhrif svartserks á lífríki förunnar. Svára þarf t.d. spurningum um hvort fuglar nýti svartserk til fæðu, eða hvort hann sé í samkeppni við fuglana

um fæðu, beint eða óbeint með áhrifum sínum. Þessum spurningum er brýnt að svara, ekki síst í ljósi mikilvægis Íslands sem viðkomustaðar farfugla. Rannsaka þarf afrán, lífsferil, tímgun, þroskunartíma eggja og lifrna, fæðu og sníkjudýr sem svartserkurinn kann að hafa borið með sér.

## ENGLISH SUMMARY

In the summer of 2020, unidentified egg sacs were first observed on the shore in Fossvogur, SW-Iceland in the capital area of Reykjavík. In 2021, similar egg sacs were seen in Sandgerði, and in 2022 in Breiðafjörður. During a search on the shore in Breiðafjörður in August 2023, there was an abundance of egg sacs and adult animals laying egg sacs were found. Subsequent reviews of footage from the first discovery in Fossvogur in 2020 showed animals laying eggs. When the animals found in Breiðafjörður were examined, their appearance and the shape of their shells indicated it was the snail *Melanochlamys diomedea*. This discovery was considered highly significant, as this species had not previously been confirmed outside the Pacific Ocean. Genetic research on the animals in 2023, using COI, H3, and 16S rRNA markers, confirmed the identification of the species as *M. diomedea*. A related species had previously been found near Madeira, the Canary Islands, and Cape Verde. *M. diomedea*, which was given the Icelandic name "svartserkur", had until now only been found at the west coast of North America (from Alaska south to California). How and exactly when this species arrived in Iceland is unknown. It is considered most likely that species travel long distances either via ballast water, attached to ship hulls, or as part of biofouling.

## ÞAKKIR

Höfundar þakka Aroni Alexander Þorvarðarsyni fyrir upplýsingar um fyrsta fundarstað tegundarinnar og afnot af mynd, sem og þeim Christiane Delongueville og Roland Scaillet frá belgísku Náttúrufræðistofnuninni fyrir góð ráð við fyrstu skref rannsóknarinnar. Einnig þakka höfundar þeim Sæmundi Sveinssyni og Steinunni Magnúsdóttur hjá Mátis aðstoð við erfðagreiningu. Jóni Sólmundssyni er þakkað fyrir yfirlestur handrits. Sömuileiðis er ritstjóra, prófaraklesara og ritrýnunum þeim Menju von Schmalensee og Hilmar J. Malmquist kærlega þakkað fyrir góðar og gagnlegar ábendingar. Sérstakar þakkir fá allir þeir sem tilkynntu um fundi eggjasekkja og nefndir eru í 1. töflu.

1. Vihma, T. 2014. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review. *Surveys in Geophysics* 35(5). 1175–1214. <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9284-0>
2. Roy, H.E., Pauchard, A., Stoett, P., Renard Truong, T., Bacher, S., Galil, B.S., Hulme, P.E., Ikeda, T., Sankaran, K., McGeoch, M.A., Meyerson, L.A., Nuñez, M.A., Ordonez, A., Rahlao, S.J., Schwindt, E., Seebens, H., Sheppard, A.W., & Vandvik, V. 2023. The thematic assessment report on invasive alien species and their control: Summary for policymakers. Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services (IPBES), Bonn. 31 bls. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10127924>
3. AquaNIS 2025. Information system on Aquatic non-indigenous and cryptogenic species. (skoðað 6.5. 2025): [https://aquaniresearch.com/aquanis/search/search\\_expand/row/2838235/sid/21/msid/22/from/mx/cby/ie/bpid](https://aquaniresearch.com/aquanis/search/search_expand/row/2838235/sid/21/msid/22/from/mx/cby/ie/bpid).
4. Óskar Sindri Gíslason, Snæbjörn Pálsson, McKeown, J.N, Halldór P. Halldórsson, Shaw, P.W. & Jörundur Svavarsson 2013. Genetic variation in a newly established population of the Atlantic rock crab *Cancer irroratus* in Iceland. *Marine Ecology Progress Series* 494. 219–230. <https://doi.org/10.3354/meps10537>
5. Karl Gunnarsson, Sæmundur Sveinsson, Davíð Gíslason, Hilmar J. Malmquist, Joana Micael & Sindri Gíslason 2023. Mollusc on the move; First record of the Newfoundland's razor clam, *Ensis terranovensis* Vierna & Martínez-Lage, 2012 (Mollusca; Pharidae) outside its native range. *BioInvasions Records* 12. 765–774.
6. Hilmar J. Malmquist, Karl Gunnarsson, Davíð Gíslason, Sæmundur Sveinsson, Joana Micael & Sindri Gíslason 2024. Sindraskel (*Ensis terranovensis*) – nýr landnemi í sjó við Ísland. *Náttúrufræðingurinn* 94(1–2). 6–18.
7. UN Trade and Development 2024. Review of maritime transport 2024. United Nations Publications, Genf. 166 bls. <https://doi.org/10.18356/9789211065923>
8. Mannvík, H.-P. & Snorri Gunnarsson 2022. C-Survey at Haganes, 2022 (max biomass). (Unnið fyrir Arnarlax ehf.). Akvaplan-niva (Report: 2022 64106.03), Tromsø. 36 bls.
9. Cooke, S., Hanson, D., Hirano, Y., Ornelas-Gatdula, E., Gosliner, T.M., Tsjernyshev, A.V. & Valdés, Á. 2014. Cryptic diversity of *Melanochlamys* sea slugs (Gastropoda, Aglajidae) in the North Pacific. *Zoologica Scripta* 43. 351–369. <https://doi.org/10.1111/zsc.12063>
10. Steinberg, J.E. & Jones, M.L. 1960. A new opisthobranch of the genus *Aglaja* in San Francisco Bay. *The Veliger* 2. 73–75.
11. Marcus, E. 1961. Opisthobranch mollusks from California. *The Veliger* 3(Suppl. 1). 1–85.
12. Gosliner, T.M. 1978. The evolution of the Cephalaspidea (Mollusca: Gastropoda) and its implications to the origins and phylogeny of the Opisthobranchia. University of New Hampshire, Durham. 264 bls. <https://scholars.unh.edu/dissertation/1197>
13. Camacho-García, YE, Ornelas-Gatdula, E, Gosliner, TM and Valdes, A (2014) Phylogeny of the family Aglajidae (Pilsbry, 1895) (Heterobranchia: Cephalaspidea) inferred from mtDNA and nDNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 71, 113–126. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1055790313004272?via%3Dihub>
14. Bergh, R. 1894. Reports on the dredging operations off the west coast of Central America to the Galapagos, to the west coast of Mexico, and in the Gulf of California, in charge of Alexander Agassiz, carried on by the U.S. Fish Commission steamer 'Albatross,' during 1891, Lieut. Commander Z. L. Tanner, U.S.N., commanding. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology* 25(10). 125–233.
15. Strathmann, M.F. 1987. Reproduction and development of marine invertebrates of the Northern Pacific coast: Data and methods for the study of eggs, embryos and larvae. University of Washington Press. Seattle. 682 bls.
16. Rudman, W.B. 1972. On *Melanochlamys* Cheeseman, 1881, a genus of the Aglajidae (Opisthobranchia, Gastropoda). *Pacific Science* 26. 50–62.
17. Zamora-Silva, A. & Malaquias, M.A.E. 2016. Diet preferences of the Aglajidae: A family of cephalaspidean gastropod predators on tropical and temperate shores. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 96(5). 1101–1112. <https://doi.org/10.1017/S0025315415000739>
18. Hurst, A. 1967. The egg masses and veligers of thirty Northeast Pacific opisthobranchs. *The Veliger* 9. 255–288.
19. Castro, D.A. & Podolsky, R.D. 2012. Holding on to a shifting substrate: Plasticity of egg mass tethers and tethering forces in soft sediment for an intertidal gastropod. *Biological Bulletin* 223. 300–311.
20. Woods, H.A. & DeSilets, R.L. 1997. Egg-mass gel of *Melanochlamys diomedea* (Bergh) protects embryos from low salinity. *Biological Bulletin*.193. 341–349. <https://doi.org/10.2307/1542936>
21. Menja von Schmalensee 2010. Vágestir í vistkerfum. Fyrri hluti: Stiklað á stóru um framandi ágengar tegundir. *Náttúrufræðingurinn* 80. 15–26. <https://timarit.is/page/6468563#page/n14/mode/2up>
22. WoRMS á slóð (skoðað 1.5. 2025): <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=576296>
23. Watson, R.B. 1897. On the marine Mollusca of Madeira; with descriptions of thirty-five new species, and an index-list of all the known sea-dwelling species of that island. *Zoological Journal of the Linnean Society* 26(168). 233–239.
24. Ortea, J. & Moro, L. 1998. Nuevos datos sobre la familia Aglajidae Pilsbry. 1895 (Mollusca: Opisthobranchia: Cephalaspidea) en las Islas Canarias. *Revista de la Academia Canaria de Ciencias* 10. 101–107.
25. Lemche, H.M. 1938. Gastropoda Opisthobranchiata. *Zoology of Iceland* 4. 1–54.
26. Warén, A. 1989. New and little known mollusca from Iceland. *Sarsia* 74(1). 1–28. <https://doi.org/10.1080/00364827.1989.10413419>
27. Agnar Ingólfsson 2006. The intertidal seashore of Iceland and its animal communities. *The Zoology of Iceland* 1(7). 1–85.
28. Wranik, W., Antonio, M. & Malaquias, E. 2018. Zum Auftreten der Kopfschildschnecke *Haminoea solitaria* (SAY 1822) im Bereich der deutschen Ostseeküste. *Mitteilungen der Deutschen Malakozoologischen Gesellschaft* 99. 1–20.
29. Jensen, K.R. 2022. Amerikansk snegl *Haminella solitaria* (Say, 1822) har etableret sig i Roskilde Fjord. *Flora og Fauna* 127. 1–4.
30. Galindo, L.A., Puillandre, N., Utge, J., Lozouet, P. & Bouchet, P. 2016. The phylogeny and systematics of the Nassariidae revisited (Gastropoda, Buccinoidea). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 99. 337–353.
31. Black, M., Hoeh, W., Lutz, R. & Vrijenhoek, R. 1994. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular Marine Biology and Biotechnology* 3(5). 294–299.
32. Palumbi, S., Martin, A., Romano, S., McMillan, W.O., Stice, L. & Grabowski, G. 2002. The Simple fool's guide to PCR. (2. útg.) . Department of Zoology and Kewalo Marine Laboratory, University of Hawaii, Honolulu. 45 bls.
33. Colgan, D.J., McLauchlan, A., Wilson, G.D.F., Livingston, S.P., Edgecombe, G.D., Macaranas, J., Cássis, G. & Gray, M.R. 1998. Histone H3 and U2 snRNA DNA sequences and arthropod molecular evolution. *Australian Journal of Zoology* 46(5). 419–437. <https://doi.org/10.1071/ZO98048>
34. Chernomor, O., von Haeseler, A. & Minh, B.Q. 2016. Terrace aware data structure for phylogenomic inference from supermatrices. *Systematic Biology* 65(6). 997–1008. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syw037>
35. Kalyaanamoorthy, S., Minh, B.Q., Wong, T.K.F., von Haeseler, A. & Jeremiin, L.S. 2017. ModelFinder: Fast model selection for accurate phylogenetic estimates. *Nature Methods* 14(6). 587–589. <https://doi.org/10.1038/nmeth.4285>

36. Minh, B.Q., Schmidt, H.A., Chernomor, O., Schrempf, D., Woodhams, M.D., von Haeseler, A., Lanfear, R. & Teeling, E. 2020. IQ-TREE 2: New models and efficient methods for phylogenetic inference in the genomic era. *Molecular Biology and Evolution* 37(5). 1530–1534. <https://doi.org/10.1093/molbev/msaa015>
37. Steingrímur Jónsson & Héðinn Valdimarsson 2005. The flow of Atlantic water to the North Icelandic shelf and its relation to the drift of cod larvae. *ICES Journal of Marine Science* 62(7). 1350–1359. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.05.003>
38. Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir & María Harðardóttir 2016. Vistgerðir á Íslandi. Náttúrufræðistofnun Íslands (Fjölrít nr. 54), Garðabæ. 299 bls.
39. Brickman, D. 2006. Risk assessment model for dispersion of ballast water organisms in shelf seas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63. 2748–2759.
40. UNCTAD 2018. 50 years of Review of Maritime Transport, 1968–2018: Reflecting on the past, exploring the Future. UNCTAD, Genf. 86 bls..
41. Karl Gunnarsson, Guðrún Þórarinsdóttir & Sindri Gíslason 2015. Framandi sjávarlífverur við Ísland. Náttúrufræðingurinn 82. 4–14.
42. Micael, J., Rodrigues, P., Ramos-Esplá, A.A. & Sindri Gíslason 2022. Establishment and proliferation under climate change: Temperate tunicates in south-western Iceland. *Marine and Freshwater Research* 73(6). 803–811. <https://doi.org/10.1071/MF21351>
43. Maglić, L., Frančić, V., Zec, D. & David, M. 2019. Ballast water sediment management in ports. *Marine Pollution Bulletin* 147. 237–244.
44. Gollasch, S. & David, M. 2019. Ballast water: Problems and management. Bls. 237–250 í: *World seas: An environmental evaluation III. Ecological issues and environmental impacts.* (ritstj. C. Sheppard; 2. útg.). Academic Press.
45. Guðmundur Magnússon 1998. Eimskip frá upphafi til nútíma. Eimskipafélag Íslands, Reykjavík. 424 bls.
46. van Leeuwen, C.H.A., van der Velde, G., van Lith, B. & Klaassen, M. 2012. Experimental quantification of long distance dispersal potential of aquatic snails in the gut of migratory birds. *PLoS ONE* 7(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032292>
47. Green, A.J. & Figuerola, J. 2005. Recent advances in the study of long-distance dispersal of aquatic invertebrates via birds. *Diversity and Distributions* 11(2). 149–156. <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2005.00147>
48. Figuerola, J. & Green, A.J. 2002. How frequent is external transport of seeds and invertebrate eggs by waterbirds? A study in Doñana, SW Spain. *Archiv für Hydrobiologie* 155(4). 557–565. <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/155/2002/557>
49. Tómas Grétar Gunnarsson 2009. Fuglar og loftslagsbreytingar. *Bliki* 30. 61–64.
50. Lög um náttúruvernd nr. 60/2013.
51. IUCN 2000. IUCN guidelines for the prevention of biodiversity loss caused by alien invasive species. International Union for Conservation of Nature, Gland. 21 bls.
52. Behrens, D.W. 2004. Pacific coast nudibranchs, Supplement II: New species to the Pacific coast and new information on the oldies. *Proceedings of the California Academy of Sciences* 55(4). 11–54.
53. Sölvi Rúnar Vignisson 2019. Fæðuval vaðfugla í fjörum á fari um Reykjanesskaga. Meistararitgerð við Líf- og umhverfisvísindadeild Háskóla Íslands. 48 bls.
54. Nils Anthes, Michiels, N. K. (2007). Reproductive morphology, mating behavior, and spawning ecology of cephalaspid sea slugs (Aglajidae and Gastropteridae). *Invertebrate Biology*, 126(4): 335–365. <http://www.jstor.org/stable/4621922>
55. OBIS mapper: Ocean Biodiversity information system, slóð (skoðað 24.11.2024) <https://mapper.obis.org/?taxonid=576296>

## HÖFUNDAR

Svanhildur Egilsdóttir (f. 1966) lauk BS-prófi í líffræði við Háskóla Íslands árið 1992 og meistaraprófi í líffræðiljósmyndun frá Nottingham háskóla ári 2015. Svanhildur starfar sem sérfræðingur á Hafrannsóknastofnun.

[svanhildur.egilsdottir@hafogvatn.is](mailto:svanhildur.egilsdottir@hafogvatn.is)



Áki Jarl Láruson (f. 1985) lauk BS-prófi í almennri líffræði með aukagrein í efnafræði við California State Polytechnic University, Humboldt, árið 2010, og doktorsprófi við Hawaií-háskóla í Mānoa 2018. Hann hefur unnið við að svara þróunar- og vistfræðilegum spurningum með erfðamengjagögnum, meðal annars við Northeastern-háskóla og Cornell-háskóla. Áki Jarl starfar sem stofnerfðafræðingur á Hafrannsóknastofnun.

[aki.jarl.laruson@hafogvatn.is](mailto:aki.jarl.laruson@hafogvatn.is)



Laure de Montety (f. 1977) lauk BS-prófi í líffræði frá Joseph Fourier-háskólanum í Grenoble 1998, og meistaraprófi í haffræði frá Québec-háskóla 2002. Laure er sérfræðingur í flokkunarfræði botndýra á Hafrannsóknastofnun.

[laure.demontety@hafogvatn.is](mailto:laure.demontety@hafogvatn.is)



Joana Micael (f. 1979) lauk BS-prófi í sjávarlíffræði við háskólann á Asoreyjum 2003, meistaraprófi við háskólanum í Porto 2006 og doktorsprófi við háskólann á Asoreyjum 2011. Hún hefur stundað rannsóknir á framandi tegundum í á annan áratug. Hún er stofnfélagi í Arctic Coastal Biodiversity Observation Network (ARC-BON). Joana starfar sem sérfræðingur á Náttúrustofu Suðvesturlands.

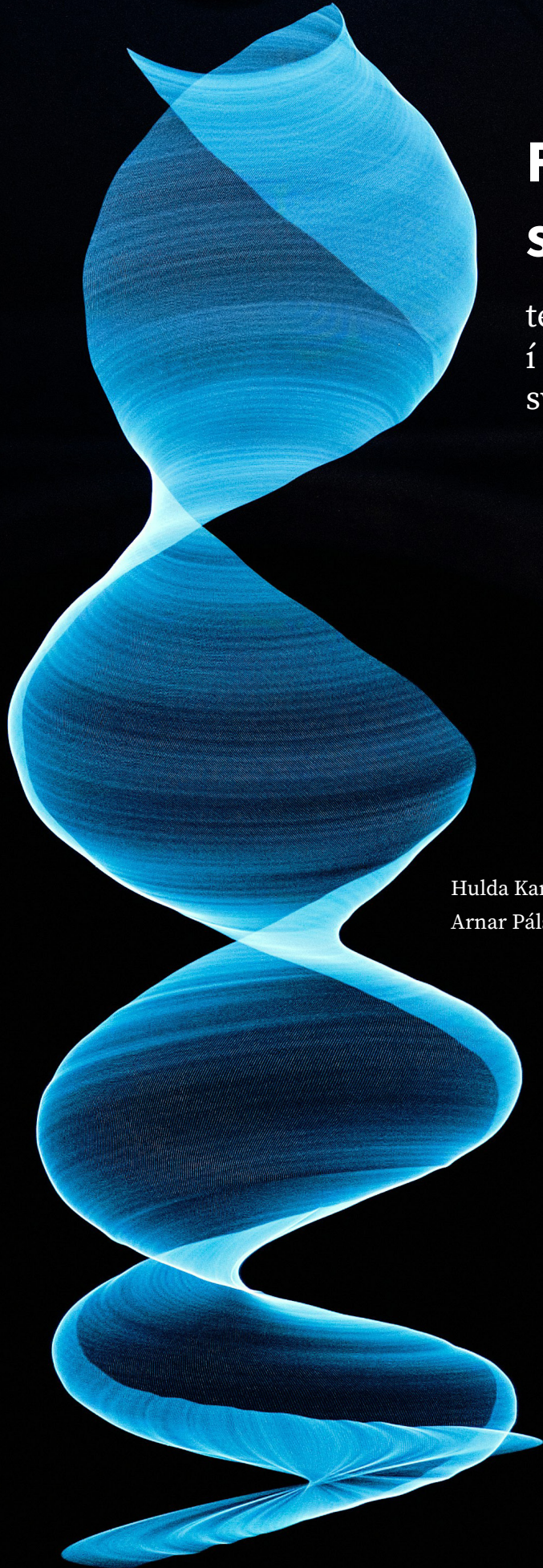
[joana@natturustofa.is](mailto:joana@natturustofa.is)



Sindri Gíslason (f. 1984) lauk BS-prófi í líffræði við Háskóla Íslands 2007, meistaraprófi við sama skóla 2009 og doktorsprófi við sama skóla 2015. Sindri hefur í tvo áratugi stundað rannsóknir á framandi tegundum í sjó hér við land og haft forystu um eflingu rannsókna á því fræðasviði hérlendis. Hann er fyrsti og eini fulltrúi Íslands í vinnuhópi Alþjóða-hafrannsóknaráðsins um flutning framandi tegunda í sjó (ICES WGITMO). Sindri hefur frá 2015 starfað sem forstöðumaður Náttúrustofu Suðvesturlands.

[sindri@natturustofa.is](mailto:sindri@natturustofa.is)





# Frá arfgerð til svipgerðar:

tengsl breytileika  
í genastjórnun við  
svipgerðir og sjúkdóma

Hulda Karen Ingvarsdóttir  
Arnar Pálsson

Myndun svipgerðar er flókið og margþætt ferli sem byggir á genatjáningu þar sem fjölmargir þættir hafa áhrif á tjáningu gena og þar með breytileika í svipgerð. Erfðabreytileiki, umhverfisáhrif og tilviljanakenndar breytingar spila þar inn í og samspil þessara þátta getur jafnvel stuðlað að myndun sjúkdóma. Með tilkomu lífmengjafræði, sem gerir kleift að greina þúsundir þátta samtímis, hefur skilningur okkar á genatjáningu og undirliggjandi líffræðilegum ferlum aukist verulega. Lífmengjafræðilegar rannsóknir, hvort sem þær beinast að afmörkuðum kerfum eða genatjáningu í heild sinni, geta varpað ljósi á hvernig breytileiki í arfgerð birtist í svipgerð. Í þessari grein verður skoðað hvernig arfgerð mótar svipgerð, með sérstakri áherslu á breytileika á mismunandi stigum genastjórnunar, frá DNA til prótína og hvernig slíkur breytileiki getur haft áhrif á svipgerð og sjúkdóma. Nýjar greiningaraðferðir hafa verið þróaðar til að vinna úr gífurlegu magni ganga sem safnast hefur á síðustu árum. Þær gera m.a. kleift að kortleggja erfðarþætti sem hafa áhrif á mRNA-styrk allra gena lífveru, greina áhættuþætti fyrir sjúkdóma og tengja styrk próteina í blóði við sjúkdóma eins og Alzheimer, sykursýki og hjartasjúkdóma. Með samþættingu gagna af ólíkum stigum genatjáningar má dýpka skilning á samspili sameinda, stjórnkerfi frumna, þroskunarferli og lífeðlisfræði. Slík þekking getur leitt til þróunar persónubundinna lækningaraðferða þar sem ólík líffræðileg gögn úr sama einstaklingi veita upplýsingar um undirgerðir sjúkdóma og leiða til markvissari meðferða. Frekari rannsóknir á breytileika í genatjáningu og áhrifapáttum hennar munu áfram auka þekkingu okkar á sjúkdómum og bæta meðferðarúrræði.

## INNGANGUR

Erfðaupplýsingar eru grundvallarþáttur í lífverum þar sem þær stjórna myndun svipgerðar hvers einstaklings. Vörpun arfgerðar yfir í svipgerð (tafla 1) krefst margra mismunandi stjórnunarþátta og sameinda sem leggja sitt að mörkum til þess að byggja eiginleika lífverunar, t.d. form og líffæri. Þessi vörpun er háð umhverfi sem hver lífvera býr við eða velur sér. Til dæmis þroskast fóstur fiska ekki ef þau lenda í of miklum hita eða frosti. Breytileiki í erfðum og umhverfisþáttum, samspil gena og umhverfisþátta sem og tilviljun stuðla að breytileika í eiginleikum svipgerðar eins og meðalhæð fólks eða fjölda bletta á tigrisdýrum. Erfðabreytileiki (tafla 1) er af mörgum gerðum, en algengastur er einkirnabreytileiki (e. single nucleotide polymorphism, SNP).<sup>1</sup> Með tilkomu aðferða eins og sambandsgreininga á erfðamengjum (e. genome wide association study, GWAS hér eftir, tafla 1) hafa fundist margir erfðabreytileikar sem tengjast sjúkdómum.<sup>2</sup> Einnig hefur RNA-raðgreining verið gífurlega mikilvæg en með henni er hægt að skoða virkni nær allra gena í mörgum sýnum eða einstaklingum.<sup>3</sup>

Þekking á stjórnunarferlum hinna mismunandi stiga genatjáningar hefur knúið framfarir á sviði líf- og læknávisinda. Rannsóknir á líffræðilegum kerfum, bæði afmörkuðum og í heild sinni, geta upplýst okkur um hvað stuðlar að breytileika í svipfari og erfðum. Í grein þessari verður fjallað um nýlegar framfarir í erfðamengjafræði og skyldum greinum. Höfundar rifja upp grundvallaratriði sameindalíffræði með það að markmiði að útskýra hversu miklar framfarir

hafa orðið í þessum geira. Með notkun dæma, m.a. nokkura innlendra verður sagt frá ólíkum aðferðum og hvað má læra af þeim. Greinin hallar töluvert til læknisfræðilegra nota en grundvallatriðin eru öll líffræðileg og eru rætur breytileika í svipfari lífvera í náttúrulegum stofnum sem tengist vistfræði, þróun og verndun lífríkisins.

Fyrst verður útskýrt hvernig breytileiki í gena-stjórnun tengist tilurð breytileika í svipgerðum og líkum á sjúkdómum. Farið verður yfir helstu stig genastjórnunar, frá arfgerð til prótíns, og rakið hvaða mismunandi kerfi stjórna genatjáningu og hvernig aðrir þættir eins og umframerfðir (tafla 1) tengjast genastjórnun. Rætt verður um orsakir svipgerðar-breytileika og í framhaldinu um lífmengjafræði, þ.e.a.s. gögn og aðferðir sem nýtast til að rannsaka genatjáningu á mismunandi stigum stjórnunar. Að greina mögulega orsakaþætti breytileika í stjórnun gena og tengja þá við svipgerð og sjúkdóma er lykilatriði til að dýpka skilning okkar á lífverum og vistkerfum, auk þess sem það getur leitt til þróunar nýrra meðferða við sjúkdómum.

## GENASTJÓRNUN

Genatjáning er mikilvægt ferli sem leiðir til stöðugra svipgerða í öllum lífverum. Ferlið samanstendur af mörgum skrefum og kerfum sem í sameiningu ákvarða birtingarmynd svipgerðarinnar en aðrir þættir eins og t.d. mismunandi umhverfisaðstæður, tilviljun og erfðabreytileiki geta haft áhrif á svipgerðina.<sup>4</sup> Þótt

erfðir séu skilvirkar er genatjáning breytileg á milli einstaklinga og tengist að vissu leyti breytileika í svipgerð þeirra.<sup>5</sup> Ferlið frá arfgerð yfir í svipgerð er mismunandi eftir eiginleikum og getur verið stutt, langt, flókið eða einfalt (mynd 1).

Erfðamengið (e. genome) inniheldur gen sem geyma erfðaupplýsingar og þurfa að vera umritaðar yfir í RNA. Hér verður ekki fjallað ítarlegar um breytileika í erfðamengjum. Af ólíkum gerðum RNA er mRNA (e. messenger RNA) veigamest þar sem það er þýtt í prótín sem eru mikilvægustu byggingareiningar og efnahvatar frumunnar. Aðalferlin í genatjáningu eru umritun (e. transcription) og þýðing (e. translation). Í umritun er mRNA myndað eftir DNA móti. Í þýðingu er röð mRNAsins túlkað, sem leiðir til myndunar peptíðs með ákveðinni röð aínósýra (keðjur aínósýra myndar prótín).<sup>6</sup> Eftir þýðingu er í mörgum tilfellum gerðar breytingar á prótínum (e. post-translational modifications). Genastjórn felur í sér flókið samspil margra prótína, RNA sameinda og annarra sameinda í frumum og lífverunni sem í sameiningu undirbyggja svipgerð einstaklings.<sup>4</sup> Sá hluti verður ekki kannaður frekar hér en það er viðfangsefni þroskunar- og lífeðlisfræði.

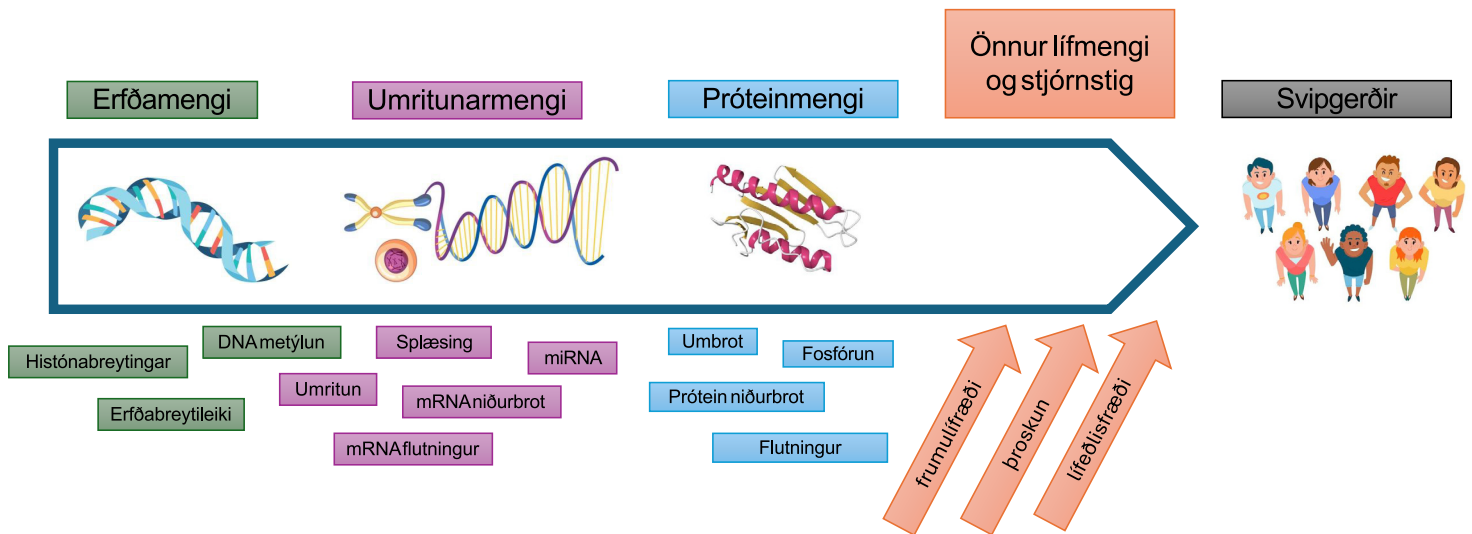
Hver einasta fruma í líkamanum inniheldur sömu erfðaupplýsingar í röðum núkleótíða (með nokkrum undantekningum) sem segja til um hvaða afurðum hvert gen tjáir fyrir. Erfðaupplýsingar gena standa einnig undir kerfum frumunnar sem sinna t.d. umritun og þýðingu en geta einnig framkvæmt efnafræðilegar breytingar á DNA og litni, t.d. metýlun sem leiðbeinir frumunum hvernig á að lesa upplýsingarnar. Þannig eru ólíkar frumur líkamans með sömu DNA röð en með t.d. mismunandi metýlunar mynstur í DNA og á histónum sem mótar líka genatjáninguna.<sup>7</sup> Mismunur í metýlun DNA og gerðum og skreytingum históna á ólíkum stöðum í erfðamenginu heyrir undir kerfi sem miðla umframerfðum í þroskun fjölfrumunga. Þessi kerfi hjálpa frumum að muna hverjar þær eru og hvaða gen þær eiga að tjá.

## STJÓRNUN GENATJÁNINGAR OG ÁHRIF HENNAR Á BREYTILEIKA Í SVIPGERÐ OG MYNDUN SJÚKDÓMA

Genatjáningu er stjórnað af mörgum þáttum á ýmsum stigum.<sup>4</sup> Stjórn á umritun krefst t.d. erfðaupplýsinga sem byggjast á röð basa í genunum sjálfum sem innihalda bindiset fyrir svokallaða umritunarþætti (e. transcription factors). Umritunarþættir skiptast í almenna og sértæka umritunarþætti. Almennir umritunarþættir hjálpa RNA pólýmerasa að mynda grunnumritunarbúnað (e. basal transcription apparatus) við stýrilsvæði gena, oft nálægt svokölluðu TATA boxi.<sup>8</sup> Sértækir umritunarþættir binda sértækar stjórnraðir sem geta verið bæði nærri og fjarri stýrlinum og hafa þannig áhrif á hvort umritun fari fram og hversu virk hún er.<sup>8</sup> Stjórnunin byggist einnig á öðrum stjórnsameindum sem bæla, virkja og/eða

Tafla 1: Skilgreiningar á nokkrum lykilhugtökum erfðamengjafræði (e. genomics) – Definitions of key concepts used in genomics.

Hugtak	Skilgreining
Arfgerð (e. genotype)	Erfðasamsetning einstaklinga, getur vísað til staks gens eða alls mengisins.
Svipgerð (e. phenotype)	Eiginleikar lífveru (einstaklings) í víðustum skilningi, t.d. útlit, hegðan, þol og efnaskiptageta.
Genatjáning (e. gene expression)	Í þessari grein er þetta skilgreint sem ferli sem breytir erfðaupplýsingum í prótín (eða aðra virkni). Stundum einnig notað í víðari skilningi eins og um myndun svipgerðar frá arfgerð.
Erfðabreytileiki (e. genetic variant)	Breytileiki í röð eða byggingu erfðaefnis innan og milli einstaklinga eða stofna. Getur leitt til breytileika í svipgerð (t.d. sjúkdómum) eða ekki.
Einkirnabreytileiki/Stök basabreyting (e. single nucleotide polymorphism, SNP)	Skipti á einum basa á ákveðnum stað í erfðamenginu (t.d. A yfir T á stöðu 30200 í Egrf geninu). Slík breyting verður fyrst til í einum einstaklingi en ef hún erfist áfram getur hún orðið algengari og finnst þá í fleiri einstaklingum innan þýðis.
Umframerfðir (e. epigenetics)	Hefur tvennskonar merkingu. Getur fjallað um erfðir eiginleika sem ekki tengjast breytileika á DNA röðinni sjálfri. Einnig notað um byggingu litnis í mismunandi frumum og breytingum á genatjáningu (sem ekki heldur skýrast af frávikum í sjálfri DNA röðinni).
Lífmengjafræði (e. omics)	Safn fagsviða sem fjalla um stór gagnasett um lífrænar sameindir á mismunandi stigum skipulags eins og erfðamengi, umritunarmengi, prótínmengi, efnaskiptamengi. Fjallar um aðferðir og uppgötvanir á þessum sviðum.
Umritunarmengi (e. transcriptome)	Heildarsafn RNA umrita af erfðaefninu í frumu eða sýni á ákveðnum tímapunkti. Til eru fjölbreyttar gerðir af RNA umritum s.s. mRNA, rRNA, tRNA og táknalaus RNA. Greiningar á umritunarmengjum sýna t.d. hvaða gen eru tjáð á ákveðnum tíma eða stað í fóstri og geta gefið innsýn í genastjórnun og starfsemi.
Sambandsgreining á erfðamengi GWAS (e. genome wide association study)	Aðferð sem skannar erfðamengið og prófar fyrir tengslum erfðabreytileika (oftast einkirnabreytileika) og aukinni áhættu á sjúkdómum eða öðrum einkennum. Prófað er fyrir mun á tíðni breytileika meðal einstaklinga með eða án sjúkdóms sjúkdóms. Einnig er hægt að skoða magnbundna eiginleika eins og hæð eða þykkt beina.



1. mynd. Yfirlit yfir ferli genatjáningar, hin mörgu skref á sameindasviðinu frá arfgerð yfir í svipgerð. Stóru þrepin eru úr erfðamengi (e. genome) yfir í umritunarmengi (e. transcriptome) og þaðan yfir í próteinmengi (e. proteome) sem með samspili annarra skrefa þar sem frumurnar, þroskun, og lífeðlisfræði tvinnast saman til að mynda svipgerð einstaklinganna. Mynd byggð á grein Buccitelli & Selbach 2020 4 með vissum breytingum – An overview of the gene expression process and the many molecular steps from genotype to phenotype. The main steps involve the transcription of the genome to the RNA level (transcriptome) and subsequently from mRNA's to the proteome. This process also includes other interacting steps where the cells, development, and physiology intertwine to form the phenotypes of individuals. Picture adapted and reworked from Buccitelli & Selbach 2020.<sup>4</sup>

viðhalda umritun. Stjórnþættir eru t.d. skilgreindir eftir staðsetningu miðað við umritaða genið, þ.e.a.s. annars vegar cis-stjórnraðir (e. cis regulatory elements) eða trans-þættir (e. trans-factors). Til þeirra fyrri flokkast t.a.m. stýrlar (e. promoter), bæliðir (e. suppressors) og efliraðir (e. enhancers)<sup>5</sup> sem eru staðsettar á sama eintaki litnings og umritaða genið, oftast í námunda við komandi gen. Stýrlar eru staðsettir fyrir framan genin (miðað við stefnu umritunar, þ.e. 5' megin við genið). Aðrar stjórnraðir geta hins vegar verið staðsettar innan gensins sjálfs (t.d. í innröðum), fyrir aftan (þ.e. 3' megin við genið) eða jafnvel skarast við táknröðina. Þannig að samkvæmt skilgreiningu virka cis-raðir bara á gen á sama litningi. Þessar stjórnraðir samanstanda af sérstökum kinnaröðum (e. nucleotide sequences) sem umritunarþættir þekkja og bindast. Slík binding getur haft áhrif á hvort gen í nágrenni eru tjáð eða þöggud.<sup>9</sup> Á hinn bóginn hafa svokallaðir trans-stjórnþættir áhrif á umritun gena t.d. ef þeir bindast DNA röðum nálægt þeim. Þessir þættir eru afurðir gena og geta virkað víða í erfðamenginu og þannig virkjað/hindrað mörg gen. Ólíkt cis-röðum geta trans-stjórnþættir (samkvæmt skilgreiningu) virkað á gen sem eru staðsett á öðrum litningum og hafa því víðtækari stjórnunargetu.<sup>10</sup> Mikilvægastir fyrir ákveðnar svipgerðir eru umritunarþættir sem hafa mikla sértækni í ákveðin bindiset og eru mismunandi tjáðir eftir frumgerðum og þroskun og lífeðlisfræðilegu ástandi lífverunnar.

Breytileiki í cis-röðum eða trans-stjórnþáttum getur haft veruleg áhrif á mRNA styrk tiltekins gens og þar af leiðandi valdið mun á svipgerðum innan og milli tegunda og tengist þannig þróun og

aðlögun lífvera.<sup>10</sup> Stökkbreytingar í cis-röðum s.s. efliröðum og stýrlum geta haft áhrif á magn mRNA ákveðins gens, staðsetningu þess eða tímasetningu í þroskun og stuðlað að fjölbreytileika í svipgerð innan og milli tegunda. Stökkbreytingar í stýrlum og stjórnstöðum manna tengjast margar sjúkdómum.<sup>5</sup> Þar sem cis-raðir hafa áhrif á eitt eða nokkur gen en virka sjaldnast í öllum vefjum lífverunnar umber þróunin fleiri stökkbreytingar í þeim en í táknröðum gena. Því finnst meiri breytileiki á þessum svæðum á milli tegunda en innan táknraðanna. Áður ræddum við í Náttúrufræðingnum hvernig breytileiki í genastjórn tengist þróun nýrra forma.<sup>11</sup> Spyrja má hvort breytileiki í cis-röðum eða trans-þáttum hafi meiri áhrif á breytileika í genatjáningu á milli einstaklinga? Það er auðveldara að greina áhrif cis-breytileika en breytileiki í trans-þáttum getur haft áhrif á mörg gen eða víðtækari ferla sem getur leitt til svipfarsbreytileika á milli tegunda.<sup>12</sup> CAP próteinið (umritunarþáttur) er dæmi um trans-stjórnþátt sem hefur áhrif á tjáningu margra gena, þar á meðal hóp gena sem kóðar fyrir prótínum sem sjá um að brjóta niður (e. catabolize) galaktósa og arabínósa. Ef stökkbreyting verður í geninu sem framleiðir CAP (kallað crp) getur það leitt til skerðingar á tjáningu margra gena sem taka þátt í niðurbroti sykra eins og galaktósa og arabínósa og þannig haft víðtæk áhrif á síðari skref í efnaskiptaferlinu.<sup>13</sup> Cis-raðir og trans-þættir, þrátt fyrir að vera bæði stjórnþættir, hafa ólík áhrif á genatjáningu og mismiklar afleiðingar. Breytileiki í fleiri þáttum síðar í ferlinu getur haft áhrif á breytileika í svipfari.

Meðal heilkjörnunga með innraðir (e. introns)

er for-mRNA (e. pre-mRNA) verkað til að mynda mRNA. Á þessu stigi eru raðir innraðir fjarlægðar úr for-mRNA-inu með ferli sem kallast splæsing (e. mRNA splicing). Splæsing getur leitt til ólíkra mRNA afbrigða úr for-mRNA hvers geni og þannig leitt til þess að mismunandi prótín-ísóform myndast, jafnvel hvert með ólíka virkni.<sup>14</sup> Þetta er talið stuðla að mun á frumgerðum og jafnvel fjölbreytileika í svipgerð. Á svipaðan hátt og í umritunarstjórn ræðst splæsing af bæði cis-röðum innan umritans og trans-þáttum (bæði RNA og prótín). Þetta ferli er mikilvægur partur af genajáningu flestra gena í manningum og öðrum dýrum.<sup>14</sup> Breytileiki í mRNA splæsingu hefur verið tengdur við svipgerðarbreytileika í mönnum en u.þ.b. 10% af öllum stökkbreytingum í mönnum sem tengjast sjúkdómum virðast hafa áhrif á splæsingu.<sup>15</sup> Annað mat er að um þriðjungur allra stakra basabreytinga sem hafa verið tengdir við sjúkdóma geti truflað splæsingu.<sup>14</sup>

Auk mRNA finnast í erfðamengjum dýra aðrar tegundir af RNA sem kóða ekki fyrir prótínum og kallast einu nafni táknaless RNA (e. non-coding RNA). Þetta er fjölbreyttur hópur með misvel skilgreind hlutverk. Tegundir af táknalessum RNA sameindum sem hafa mest áhrif á genatjáningu í umritun og seinni skrefum eru: miRNA (e. microRNA), siRNA (e. small interfering RNA), piRNA (e. piwi-interacting RNA) og löng táknaless RNA eða lncRNA (e. long non-coding RNA).<sup>16</sup> Fyrst verður sagt frá s.k. löngum táknalessum RNA-sameindum en þau eru tiltölulega ný-uppgötvuð með umrit lengri en 200 núkleótíð en afurðir þeirra skrá ekki fyrir prótínum. Löng táknaless RNA geta verkað óbeint sem umframerfða stjórnþáttur og mótað genastjórnun og tjáningu.<sup>17</sup> Tjáning lncRNA er oft vefja- eða frumusérhæfð og koma þau að stjórnun genatjáningar á öllum stigum s.s. umritun, umframerfðum, prótein nýmyndun, RNA-verkun og stjórnun eftir-þýðingu.<sup>17,18</sup> Slík lncRNA eru umrituð frá mörgum svæðum í erfðamengjum dýra og nýlegar rannsóknir ýja að mikilvægi þeirra fyrir mörg líffræðileg ferli þó margt sé ennþá óljóst. Upplýsingar úr GENCODE verkefninu benda til að í erfðamengi mannsins séu meira en 16.000 lncRNA gen.<sup>19</sup> Til samanburðar eru í erfðamengi okkar um 20.000 gen sem skrá fyrir prótínum. Rannsóknir hafa sýnt að nokkrir stakir erfðabreytileikar innan lncRNA tengjast sjúkdómum sem gefur til kynna að þessir SNP (borið fram snippar) geti breytt virkni lncRNA og þannig truflað stjórnun genatjáningar og ýtt undir framvindu sjúkdóma.<sup>18</sup>

Önnur mikilvæg gerð af táknalessum RNA sem getur mótað svipgerðir og sjúkdóma er miRNA. Þessi hópur sameinda var uppgötvaður af m.a. Garry Ruvkun og Victor Ambros sem fengu Nóbelsverðlaunin í læknisfræði árið 2024.<sup>20</sup> miRNA eru litlar sameindir, yfirleitt í kringum 21 núkleótíð, sem gegna mikilvægu hlutverki við stjórnun genatjáningar eftir umritun<sup>21</sup> með því að bindast við mRNA til að bæla tjáningu.<sup>22</sup>

Þau gegna hlutverki í mörgum líffræðilegum ferlum og tjáning miRNA sameinda gerist á mismunandi stigum þroskunar dýra.<sup>21</sup> Til dæmis eru ákveðin miRNA nauðsynleg fyrir myndun fósturvísis á meðan önnur eru mikilvæg á síðari stigum þroskunar eins og við aðgreiningu vefjaforvera eða myndun líffæra. Rannsóknir hafa afhjúpað að breytileiki í tjáningu ákveðinna miRNA gena tengist sjúkdómum í mönnum eins og krabbameinum og taugahrörunarsjúkdómum.<sup>21</sup> Einnig hefur sjónin beinst að miRNA sameindum sem mögulegum lífmörkum (e. biomarkers) fyrir ýmsa sjúkdóma þar sem breytingar á styrk þeirra í blóði eru vísbendingar um sjúkdóma eða forstig þeirra.

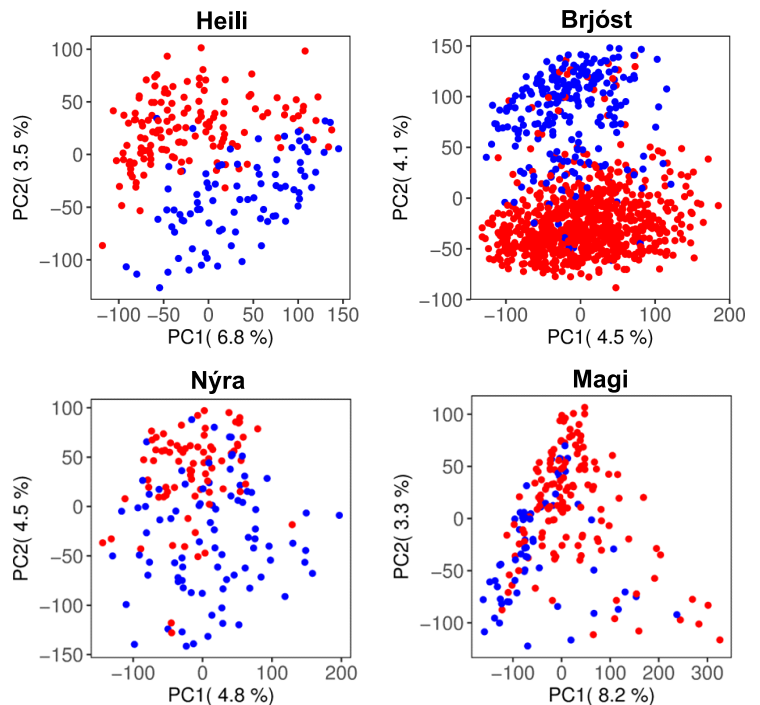
## ÞROSKUN LÍFFÆRAKERFA OG GENATJÁNING

Líkt og flest dýr með flókna líkamsgerð hefur hefur maðurinn fjölbreytt líffærakerfi þar sem hvert þeirra hefur flókna lífeðlisfræðilega stjórnun. Líffærakerfi vinna einnig saman og hjálpast að við að byggja upp líkamann og viðhalda góðri heilsu.<sup>23</sup> Öll líffæri mótast vegna genatjáningar<sup>24</sup> en á vissum tímasteiðum þroskunar verða miklar breytingar á umritunarmengi (tafla 1) fruma samfara „ákvörðunum“ sem frumurnar taka.<sup>25</sup> Nýleg rannsókn kannaði genatjáningu á mismunandi stigum þroskunar í sex tegundum spendýra. Í ljós kom að þróun líffæra spendýranna er tengd þroskun þeirra. Tegundir spendýra hafa svipaða genatjáningu í líffærum snemma í þroskun en munurinn eykst síðar og er mestur hjá tegundum sem eru fjarskyldastar. Rannsóknin sýndi að snemma í þroskun hafa virk gen mörg hlutverk í mismunandi líffærum og á ólíkum stigum en eftir því sem líffæri aðgreinast og þroskast fá virk gen sértækara hlutverk. Þetta getur verið vegna breytinga í fjölvirkni (e. pleiotropy).<sup>25</sup> Fjölvirkni þýðir að eitt gen hefur áhrif á margar svipgerðir eða einkenni. Svona rannsóknir hjálpa okkur að skilja betur hvernig genatjáning og stjórnun hennar hefur áhrif á þroskun og þróun líffæra og veitir innsýn inn í það hvernig breytileiki í erfðum og/eða umhverfi hefur áhrif á svipfar.

## UMFRAMERFÐIR

Aðrir þættir sem geta haft áhrif á breytileika í svipgerðum eða líkurnar á sjúkdómum eru umframerfðir (e. epigenetics). Orðið umframerfðir er notað um tvennt. Í fyrsta lagi um breytingar á genatjáningu eða frumustarfsemi sem erfast milli kynslóða og tengjast ekki mun í DNA röðinni sjálfri. Nokkrar rannsóknir hafa afhjúpað svokölluð foreldraáhrif eða kynslóða áhrif þar sem ástand foreldra eða annara fyrri kynslóða mótast ástand einstaklinga. Leitin að orsakaþáttum sem bera slík áhrif milli kynslóða bendir til kerfa umframerfða en margt er enn óvitað um þessi ferli. Einnig er lítið vitað hvort og hvernig þessi áhrif komist í gegnum endurstillingu umframerfða (e. epigenetic reprogramming) hjá fósturvísnum.<sup>26</sup> Hug-

2. mynd. Myndin er tekin úr rannsókn Vidman o.fl 2019<sup>47</sup> sem mat genatjáningu í fjórum gerðum krabbameina. Á myndinni er notast við PCA aðferð til þess að bera kennsl á nýjar undirgerðir krabbameina. Hver punktur er eitt krabbameinssýni sem var RNA raðgreint. Á myndinni eru undirgerðirnar táknaðar með mismunandi lit (rautt og blátt) fyrir krabbamein úr fjórum ólíkum vefjum. Meginþættir (e. principal components) eru nýjar breytur sem byggðar eru á upprunarlegu breytunum í gagnasettinu þar sem fyrsti höfuðþátturinn (PC1) útskýrir mestan breytileika í gögnunum, næsti þáttur (PC2) næst mestan breytileika o.s.frv. Þetta minnkar þannig fjölda breyta sem þarf að vinna með án þess að mikilvægar upplýsingar tapist. Sýndir eru tveir fyrstu þættirnir (PC1 og PC2) og tilgreint á ásunum hversu mikinn hluta breytileikans hver þeirra útskýrir. Skýrt sjást undirgerðir krabbameinanna í heila (e. brain) og brjósti (e. breast) aðskiljast á fyrstu tveimur ásunum, en á sýnum úr nýra (e. kidney) og maga (e. stomach), er aðgreiningin ekki eins skýr. – The plot is from a study by Vidman et al. 2019<sup>47</sup> that investigated gene expression in four types of cancer. A PCA method was used to identify new cancer subtypes, with each dot representing an RNA-sequenced cancer sample. The subtypes are represented by different colors (red and blue), and each plot corresponds to a different tissue type. Principal components are new variables derived from the original dataset, where the first principal component (PC1) explains the largest proportion of variability in the data, the second principal component (PC2) explains the second largest proportion, and so on. This method reduces the number of dimensions to analyze while retaining essential information. The figure shows the first two principal components (PC1 and PC2), with the proportion of variability explained by each component indicated on the axes. A clear separation of cancer subtypes can be observed for brain and breast tissues along the first two principal components. However, for kidney and stomach tissues, the separation of subtypes is less distinct.



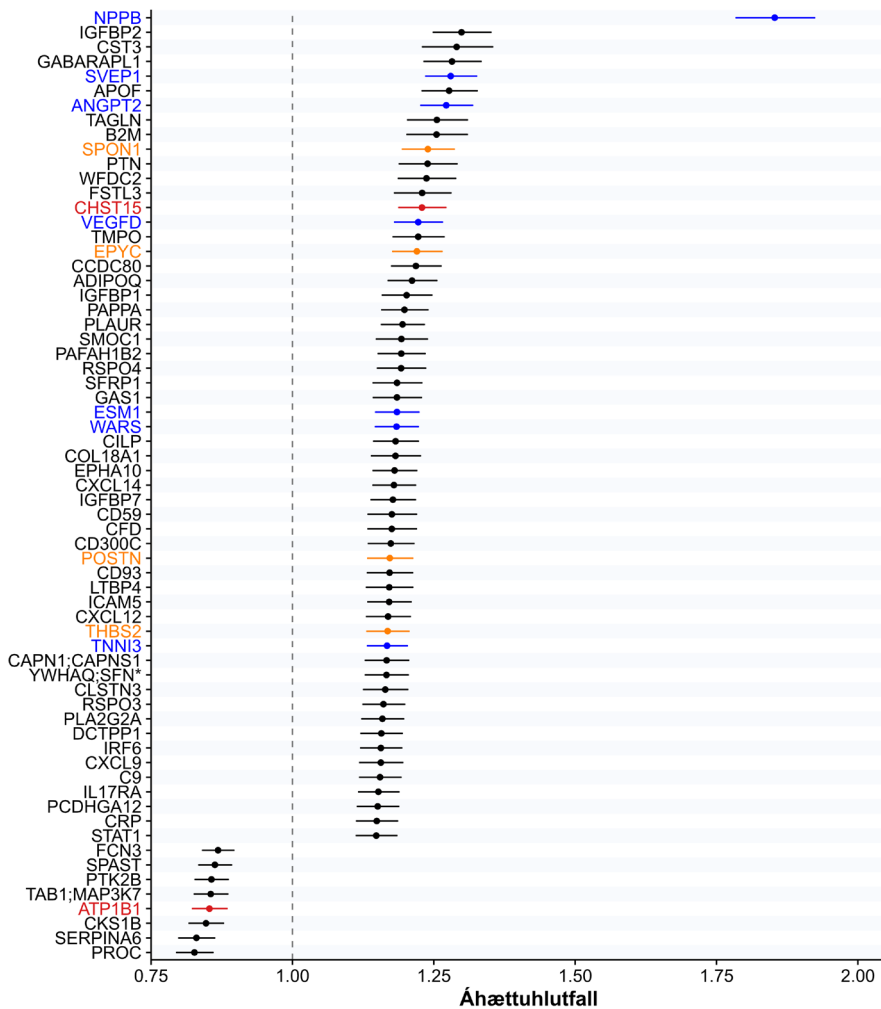
myndin er að þættir (ekki breytileika í DNA) erfist milli kynslóða og hafi áhrif á svipfar lífvera (líklega með því að tiltekin gen séu tjáð eða þöggud).

Í öðru lagi er hugtakið umframerfðir einnig notað um kerfi sem stýra aðgengi og eiginleikum litnis í frumum hvers einstaklings og hjálpa frumum að muna (eins og minnst var á að ofan). Í báðum tilfellum eru helstu sameindakerfin DNA metýlun (e. DNA methylation), histón breytingar (e. histone modifications) og táknalaus RNA (e. non-coding RNAs).<sup>27</sup> Dæmin hér að neðan tengjast aðallega áhrifum umframerfðakerfa í þroskun og lífeðlisfræði en ekki milli kynslóða.

Umframerfðir geta haft áhrif á líffræðilega ferla og breytileika í svipgerð.<sup>28</sup> Ein leið til að þetta geti gerst er með DNA metýlun. Meðal spendýra erfist mynstur DNA metýlunar almennt ekki til næstu kynslóðar líkt og DNA röðin sjálf en þó eru nokkar undantekningar. Kerfið virkar þannig að metýl hóp (CH3) er bætt við cytósín núkleótíð á DNA sameindinni og getur það í vissum tilfellum bælt genatjáningu með því að koma í veg fyrir að umritunarþættir geti bundist DNA (t.d. í stýrlum). DNA metýlun á vissum setum í stjórnröðum eins og stýrlum eða efliröðum geta einnig bælt tjáningu nálgra gena.<sup>7</sup> Rannsóknir hafa sýnt að breytingar á umframerfðamerkjum eins og DNA metýlun geta tengst ýmsum sjúkdómum þar sem þær hafa áhrif á tjáningu lykilgena en þetta gerist sérstaklega í krabbameini. Orsökina gæti þá verið stökkbreytingar sem leiða til mismunar í byggingu litnis í vefnum sem krabbameinið á upptök sín í<sup>29</sup> eða raskandi umhverfisþættir.

CpG eyjar (e. cytosine-phosphate-guanine islands) eru raðir með margar cytósín og gúanín tvenndir (basarnir tengdir í þessari röð). CpG eyjar eru oftast frá 100–1000 bp langar og innihalda hærra hlutfall af C og G miðað við aðrar raðir. Um það bil 70% af stýrlum manna hafa eina eða fleiri CpG eyjar og gegna þær hlutverki í genastjórn. Ef þær eru lítið eða ekki metýlraðar er genatjáning stöðug. Mikil metýlun á þeim leiðir almennt til minni genatjáningar (þöggunar). Stýrlar með CpG eyjar eru algengasta tegund stýrla í hryggdýrum en þeir tengjast stjórnun gena sem eru annað hvort vefjasértæk eða til búshalds (e. housekeeping genes) gena sem þurfa að vera tjáð í næstum öllum frumum fyrir eðlilega starfsemi.<sup>30</sup> Því er mikilvægt að búshaldsgenin verði ekki metýluð því það getur valdið þöggun í tjáningu þeirra og dregið úr lífslíkum.

Annað þrep umframerfða sem tengist líffræði fjölfruma heilkjörnunga er litni (e. chromatin) kjarnans. Kirnisögnin (e. nucleosome) í litni samanstendur af histón próteinum sem eru umvafin DNA þræði, oftast 146–147 bp um hvern klasa af histón prótínum. Kirnisagnir raðast síðan saman í stærri einingar sem leiðir til þéttar þökkunar á erfðaeftir. Hvaða svæði erfðamengisins eru þéttþökkuð og hver minna eða óþökkuð ræðst af efnahópum sem hengdir eru á histón prótínum á ákveðnum stöðum og þeim ytri og innri boðum sem þessu stjórna. Þetta byggist því á sögu hvernar frumu og boðum sem hún hefur fengið. Efnahóparnir eru s.s. asetýling (e. acetylation), fosfórun (e. phosphorylation) og metýlun sem flokkast allt sem umbreyting á prótínum eftir



3. mynd. Niðurstöður úr rannsókn Jonmundsson et al 2023 á 4.765 einstaklingum úr AGES þýðinu þar sem 1.172 þátttakendur þróuðu með sér gáttatif.<sup>57</sup> A) Hér má sjá áhættuhlutfall (e. hazard ratio) próteina sem eru marktækt tengd við gáttatif, þ.e.a.s. magn þessara prótína í blóði er marktækt minna eða meira í þáttakendum sem þróuðu með sér gáttatif miðað við aðra en búast má við vegna tilviljunar. Sterkasta tengingin var við NPPB (Natriuretic Peptid B) prótínið og sést á myndunum hvernig það hefur hæsta áhættuhlutfallið fyrir gáttatif. – Results from the study by Jonmundsson et al. 2023<sup>57</sup> involving 4,765 individuals from the AGES cohort, of whom 1,172 developed atrial fibrillation. A) This panel shows the hazard ratios for proteins that were significantly associated with the development of atrial fibrillation. These proteins were either elevated or reduced in the blood of participants who later developed atrial fibrillation, beyond what would be expected by chance. The strongest association was observed for the protein NPPB (Natriuretic Peptide B), which had the highest hazard ratio for atrial fibrillation among all measured proteins.<sup>57</sup>

þýðingu (e. post-translational modification). Þetta getur valdið breytingum á genatjáningu þar sem gen verða aðgengileg fyrir aðra stjórnþætti þegar losnar um litni og öfugt þegar þau bæld í þéttlitni.<sup>31</sup> Nýlega hafa nokkrar tegundir RNA saneinda verið tengdar við stýringu á litnispökkun, eins og lncRNA.<sup>32</sup>

### UPPSPRETTUR BREYTILEIKANS

Öll ofangreind þrep genatjáningar geta verið breytileg vegna mismunar í erfðabáttum, ákveðnum umhverfisbreytum og sértækum tilviljunarkenndum atburðum og þannig stuðlað að svipfarsbreytileika. Erfðabreytileiki getur orsakast vegna margvíslegra stökkbreytinga í genum sem tilheyra ólíkum stjórnþrepum genatjáningar: stakar basabreytingar (SNP), innskot (e. insertions), úrfellingar (e. deletions)

o.fl. (flóknari breytingar verða ekki ræddar hér). Umhverfisþættir geta líka haft áhrif á kerfin sem stýra tjáningu gena og þar með svipfars. Ljóst er að svipfarsbreytileiki manna á milli er afurð víxlverkunnar milli margra erfðafraðilegra- og umhverfisþátta sem og hendingar. Svipfarseiginleikar og sjúkdómar eru einnig misjafnir hvað varðar mikilvægi erfðafamlags (arfgengi) og umhverfisþátta. Jafnvel þó tveir sjúkdómar hafi svipað arfgengi geta fá gen legið bak við einn en mörg annan. Sumir sjúkdómar myndast aðallega vegna galla í einum erfðabætti eins og t.d. stökkbreytingar sem tengjast cystic fibrosis sjúkdómnum (stökkbreyting í CFTR geninu). Aðrir sjúkdómar birtast vegna áhrifa margra þátta sem geta þá bæði verið erfðabreytileikar og ólíkir umhverfisþættir. Til

dæmis þróa einungis um 10–30% einstaklinga sem eru með stökkbreytingu í geni sem kallast complement component 2 með sér sjálfsöfnæmissjúkdóminn helluroða (e. lupus erythematosus).<sup>33</sup> Hér fyrir neðan verða tekin dæmi um hvernig breytileiki sem verður vegna erfða eða umhverfis getur verið sértækur fyrir ákveðna vefi eða haft víðtækari áhrif.

Kímlínustökkbreytingar berast frá einni kynslóð til annarrar með egg- og sæðisfrumum þannig að allar frumur afkvæmisins bera þennan breytileika (í flestum tilfellum). Afleiðingar stökkbreytinga eru háðar hlutverki og tjáningu gensins sem þær verða í. Til dæmis geta stökkbreytingar í genum sem gegna mikilvægum hlutverkum við þroskunarferla eða nauðsynlega frumustarfsemi haft alvarlegar afleiðingar. Einnig skiptir tímasetning virkninar sem stökkbreytingin raskar máli. Stökkbreyting í efliröð sem er nauðsynleg snemma í þroskun getur leitt til fæðingargalla eða dauða fósturs á meðan stökkbreyting í efliröð sem virkar seinna í þroskun eða bara í fullorðnum hefur bara áhrif á ákveðinn vef og er ekki banvæn. Þetta geta verið efliraðir sama gens. Gen sem tengjast grundvallarferlum frumunnar eru nauðsynleg fyrir (nær) allar frumugerðir líkamans. Fóstur arfhrein um skaðlegar stökkbreytingar í slíkum genum komast ekki í gegnum fyrstu skiptingarnar eða verða ólífvænleg mjög snemma í þroskun.

Tvílitna lífverur hafa tvö eintök af hverju geni, eitt frá hvoru foreldri. Lífsnauðsynleg gen (e. essential genes) eru gen sem taka þátt í frumustarfsemi eins og t.d. DNA afritun, umritun, þýðingu, stjórnun frumuhringa og efnaskiptaferlum. Þessi gen eru tjáð í öllum frumum og ef bæði eintök af geninu missa virkni sína (arfhreint form) leiðir það til dauða.<sup>34</sup> Stakskortur (e. haploinsufficiency) er þegar annað eintakið missir virkni sem getur gerst vegna úrfellingar eða vanvirknibreytingar (e. loss-of-function mutation). Í mörgum tilvikum getur eitt eintak af geninu ekki staðið undir framleiðslu nægilegs magns af prótíni fyrir eðlilega frumustarfsemi – sem getur leitt til sjúkdómsástands t.d. ef genið spilar lykilhlotverk í þroskun.<sup>35</sup> Dæmi um slíkan stakskort er Williams heilkennið (e. Williams syndrome) sem tengist 28 basapara úrfellingu á litningi 7q11.23. Einstaklingar með stakskort á þessu svæði hafa eitt virkt eintak af BAZ1B geninu sem gegnir hlutverki í tengslum við litnismótun (e. chromatin remodeling).<sup>36</sup> Vanvirknibreyting á báðum eintökum leiðir yfirleitt til dauða á meðan vanvirknibreyting á öðru eintakinu til skerðingar sem einstaklingurinn lifir yfirleitt með. Annað dæmi er mörg þeirra gena sem skrá fyrir prótínhluta ríbósómanna.<sup>37</sup>

Öndverð dæmi eru líka til. Áhrif stökkbreytinga í mismunandi miRNA genum eru misalvarleg eftir því hvort miRNAið er vefjasértækt eða framleitt í öllum frumum líkamans. Tiltekið miRNA (miR-16) gegnir hlutverki í mörgum líffræðilegum ferlum, t.d. frumuhringnum og stýrðum frumudauða (e. apoptosis).

Úrfelling á miR-16 eða stökkbreyting veldur minni tjáningu þess sem getur ýtt undir myndun krabbameina eins og t.d. hægfara eitilfrumuhvítblæðis (e. chronic lymphocytic leukemia).<sup>38</sup> Almennt eru miRNA tjáð í mörgum líffræðilegum vefjum algengir krabbameinsvaldar. Hins vegar ef að miRNA sameindin sér um mikilvæga stjórnun í ákveðnum vef geta stökkbreytingar haft mikil áhrif og jafnvel verið banvænar. Í rannsókn á músum var hjarta- og vöðvafrumu-sértæka miRNA genið miR1-2 slegið út en það leiddi til galla í formþroskun (e. morphogenesis) hjartans eða sleglaskiptagalla (e. ventricular septal defect) sem veldur hárrí dánartíðni við fæðingu.<sup>21</sup>

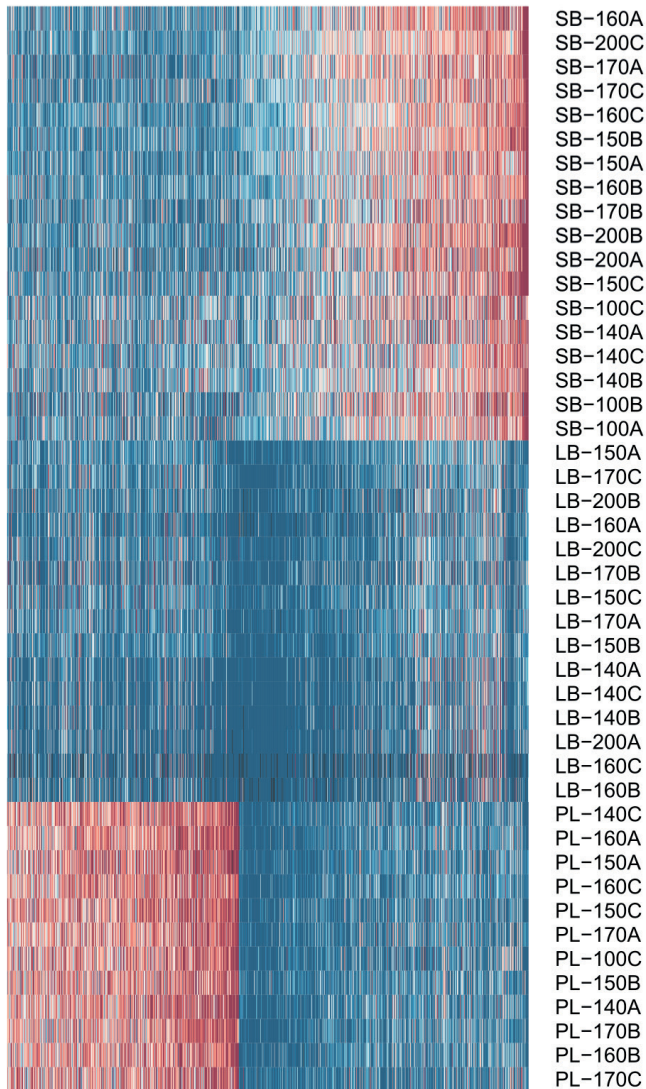
Mismunandi umhverfisþættir hafa einnig áhrif á tjáningu gena og svipfarsbreytileika. Líkt og stökkbreytingar geta þeir haft sértæk áhrif á ákveðna þætti í þroskun eða víðtækari afleiðingar. Fósturskemmdir vegna áfengis (e. fetal alcohol syndrome) er dæmi um umhverfisþátt sem getur haft víðtæk áhrif á fóstrið. Neysla móður á umtalsverðu áfengi á meðgöngu (þegar fósturþroska stendur yfir) getur valdið margs konar afleiðingum eins og greindarskerðingu og fæðingargöllum sem ekki koma fram við venjulegar aðstæður.<sup>39</sup> Aðrir umhverfisþættir geta haft sértækari áhrif. Til að mynda geta staðbundnar sýkingar eða mengun ýtt undir sjúkdóma sem eru sértækir við ákveðna vefi líkamans eins og t.d. öndunarfærasjúkdóma líkt og astma.<sup>33</sup>

Áhrif erfðabreytileika eða vissra umhverfisþátta á sjúkdóma og svipfar á millistig genatjáningar er hægt að skoða með ýmis konar aðferðum eins og t.d. mismunandi tilbrigðum RNA-raðgreiningar (e. RNA-sequencing) á ákveðnum vefjum og styrkmælingum á prótínum úr blóði.

## LÍFMENGJAFRÆÐI

Á hverju stigi genastjórnunar starfa margir þættir og breytileiki í þeim getur orðið vegna erfða, umhverfis eða tilviljunar. Með tilkomu nýrra aðferða sem byggja á háhraðaraðgreiningu (e. high-throughput-sequencing) hafa orðið til margvísleg gögn sem nýtast til að rannsaka ólík þrep genastjórnunar og tengsl við t.d. þroskun, ónæmissvör, sjúkdómsástand og þróun lífvera.<sup>40</sup> Nokkrar tegundir af lífmengjafraðilegum gögnum verða ræddar hér með sérstakri áherslu á hvernig þau geta gefið vísbendingar um hvernig breytileiki í genatjáningu mótar svipgerð.

Lífmengjafraði (e. omics) býr yfir aðferðum sem nýtast til að rannsaka ferli genastjórnunar með því að mæla magn mismunandi sameinda á ólíkum stigum frá DNA til prótína. Með þessum aðferðum er hægt að fá víðtæka sýn á genatjáningu með því að skoða styrk eða jafnvel virkni þúsunda sameinda af ákveðnum gerðum, t.d. mRNA, miRNA, bindingu umritunarþátta við DNA og styrk prótína, í frumum eða lífverum. Lífmengjafraði hefur einnig verið notuð til að greina annars konar fyrirbæri, til dæmis



Erfðabreytileiki í 3 gerðum bleikja úr þingvallavatni. Hver lína er eitt sýni, og dálkarnir tákna ólíka staði í umritunarmenginu. Litirnir tákna tíðni samsæta í hverju sýni. Úr grein Jóhannesar Guðbrandssonar og félaga frá 2019, í *Ecology and Evolution*. – Genetic variation in three morphs of Arctic charr from Þingvallavatn. Each row represents a sample, and columns different locations in the transcriptome. The colours indicate allele frequency per sample. From Guðbrandsson et al 2019, in *Ecology and Evolution*.

bakteríuflóru í mögum fólks eða örverur í vistkerfum.<sup>41</sup> Í þessum svokölluðu umhverfiserfðamengjum (e. metagenomics) er rannsakað erfðaeftni úr umhverfinu, jarðvegi, vatni eða lofti.<sup>42</sup> Þessum aðferðum fylgir mikið magn af gögnum og upplýsingum og nauðsynlegt að nota vandaðar tölulegar aðferðir.<sup>41</sup>

Gríðarleg fjölbreytni er í lífmengjafræðilegum aðferðum sem notaðar eru við greiningu mismunandi sameinda s.s. DNA, RNA, mRNA, miRNA, DNA metýlun, prótínur, breytingum á prótínur og histónur, o.s.frv.<sup>40</sup> Hér fyrir neðan verður farið í nokkur dæmi um bæði gögn og aðferðir í lífmengjafræði og hvernig þær nýtast við rannsóknir á millistigum genatjáningar í tengslum við breytileika í svipgerð og sjúkdómum.

## ERFÐAMENGJAFRÆÐI

Erfðamengjafræði (e. genomics) fjallar um rannsóknir á heilum erfðamengjum og virkni þeirra,<sup>41</sup> þ.á.m. stökkbreytingum og tengingu þeirra við sjúkdóma. Flestir erfðabreytileikar eru einkennalausir (eða a.m.k. hlutlausir með tilliti til þróunarfræðilegrar hæfni) en sumir SNPar geta tengst auknum líkum á að einstaklingar fái ákveðinn sjúkdóm, svari lyfjum mismunandi eða að einstaklingur sýni ákveðna hegðun.<sup>18</sup> Með því að skima marga breytileika (SNPa) í erfðamengi og spyrja um tengsl þeirra við sjúkdóm getum við öðlast meiri skilning á sameindalíffræði sjúkdómsins og mögulega þróað aðferðir til greiningar eða til persónubundnar eða fyrirbyggjandi meðferðar. Eins og áður sagði er sambandsgreiningum (GWAS) beitt til að leita gena sem tengjast svipgerðum. Sérstaklega hafa stærri þýði og fleiri endurtekningar leitt til mikils árangurs í kortlagningu eiginleika sem eru undir áhrifum margra gena (eins og hæð og flestir sjúkdómar) eða sjaldgæfra breytileika sem hafa mikil áhrif á sjúkdóma.<sup>43</sup> GWAS getur borið kennsl á svæði á litningum sem innihalda erfðabreytileika sem tengjast aukinni áhættu á ákveðnum sjúkdómum eða einkennum. Eitt fyrsta dæmið voru tengsl erfðabreytileika í FTO geninu við offitu.<sup>44</sup> Þó mikill árangur hafi náðst með þessari aðferð þá er vert að nefna að oftast er erfitt að vita nákvæmlega hvaða stökkbreyting á tilteknu svæði í erfðamenginu hefur sterkust áhrif (mesta áhættu fyrir sjúkdóm) og því er notast við tölfræðilega marktækni til að meta áreiðanleika tengslanna.<sup>2</sup> Einnig er stundum erfitt að segja til um hvaða gen eða ferli tiltekin stökkbreyting hefur áhrif á sem kallar á greiningar á t.d. umritun gena eða virkni prótína.

## UMRITUNARMENGJAFRÆÐI

Umrítunarmengjafræði (e. transcriptomics) snýst um rannsóknir á gerðum og fjölda RNA umrita í frumum eða vefjum. Aðferðin hefur nýst til að skilja hvernig breytingar á genatjáningu geta stuðlað að flóknum svipgerðum sem þarfnast virkni margra gena.<sup>45</sup> Við svona greiningar voru fyrst notaðar svokallaðar DNA-örflögur (DNA microarray/chips) en nú er RNA-raðgreiningu mest beitt til að mæla fjölda RNA umrita og meta byggingu þeirra, t.d. úr frumum, vef eða beint úr umhverfinu.<sup>3</sup> Umrítunarmengi reyndust mun flóknari en upphaflega var talið, sérstaklega meðal heilkjörnunga vegna mismunandi splæsingar sem getur gefið ólík mRNA af sama DNA móti sem gerir greiningar krefjandi.<sup>46</sup> Hér verða RNA-raðgreiningar kynntar stuttlega og hvernig hægt er að nýta þær til að rannsaka tjáningu gena.

Í RNA-raðgreiningu eru umrit (eða afrit af þeim) raðgreind og hægt að meta magn genatjáningar með því að mæla fjölda þeirra.<sup>3</sup> Byrjað er á því að útbúa svokallað cDNA genasafn en cDNA stendur

fyrir mótlægt DNA (e. complementary DNA). cDNA umrit eru mynduð með sameindaerfðafræðilegum aðferðum<sup>46</sup> og síðan er safn þeirra úr ákveðnum vef eða frumgerð raðgreind, oftast með Illumina aðferð. Slík raðgreining myndar safn strengja sem eru yfirleitt 100–250 bp bútar (kallast „reads“ upp á ensku). Með svokallaðri stöflun (e. read mapping) eru þessir bútar bornir við viðmiðunarerfðamengi (e. reference genome) og þannig hægt að meta magn þeirra í mismunandi sýnum.<sup>3</sup> Þar sem RNA-raðgreiningar ala af sér stór gagnasett þarf öflugar tölulegar greiningaraðferðir. Algengast er tilgátupróf fyrir hvert gen sem getur sagt til um hvaða þáttur (t.d. aldur, arfgerð eða umhverfisþáttur) hefur áhrif á það tiltekna gen. Einnig er beitt aðferðum eins og meginþáttgreiningu (e. principal component analysis, PCA) og klösum (e. clustering) sem draga fram mynstur í gagnasettinu bæði vegna tæknilegra og líffræðilegra þátta. Aðferðirnar greina undirliggjandi mynstur og samband milli breyta sem skýra mestan breytileikan í gögnunum (tjáningu genanna í sýnunum sem skoðuð eru). Til dæmis hafa meginþáttgreiningar á RNA-raðgreiningargögnum afhjúpað nýjar undirgerðir krabbameina (mynd 2).<sup>47</sup> RNA-raðgreiningar hafa opnað nýjar dyr í rannsóknum á genatjáningu og veita nákvæmari upplýsingar en DNA-örflögur.

## PRÓTÍNMEGJAFRÆÐI

Prótínmenngjafræði (e. proteomics) gerir kleift að greina styrk hundruða eða þúsunda prótína og peptíða í hverju sýni. Prótínmengi (e. proteome) einstaklinga mótast bæði af genum og umhverfinu og geta verið breytileg eftir lífeðlisfræðilegu ástandi, kyni og aldri.<sup>48</sup> Með próteinmenngjafræði er hægt að bera kennsl og magngreina flest (ekki alveg öll) prótín sem eru til staðar í einni frumu, vef eða jafnvel heilli lífveru.<sup>49</sup> Með því að greina styrk próteina úr blóði er líka hægt að afla mikilvægra upplýsinga um heilsu og sjúkdómsástand einstaklinga.<sup>50</sup> Betri skilningur á orsakaþáttum breytileika magns prótína í blóði gæti nýst sérstaklega fyrir persónubundnar lækningar, ekki einungis til að meta heilsu- og sjúkdómsástand heldur einnig til að geta fyrr greint forstíga sjúkdóma ásamt því að geta fylgst með þróun þeirra á meðan að meðferð stendur.<sup>51</sup> Prótínmengi geta einnig gefið mikilvægar upplýsingar um breytileika í genatjáningu líkt og umritunarmengi. Fylgni er á milli styrks mRNA og samsvarandi prótína í frumum en hún er ófullkomin.<sup>52</sup> Kosturinn við greiningar prótínmenngja er að þau eru virku einingarnar í frumunni en mRNA t.d. er yfirleitt talið óvirkt millistig.<sup>49</sup> Prótínmengin eru því nær endanlegum svipgerðum einstaklinga en t.d. breytileiki í mRNA eða piwiRNA. Hins vegar hafa próteinmengi vissar takmarkanir: ekki er hægt að mæla öll peptíð sem mynda prótínmengið með hverri aðferð og eru ýmsar ástæður fyrir því

(sambærilegar hömlur eru ekki á mRNA mengjum). Til dæmis svokölluð himnuþrótein (e. membrane protein) (nauðsynleg fyrir fjölbreytta frumferla) sem mynda u.þ.b. 30% af próteinmenginu eiga það til að klumpast saman og falla út (e. precipitate) í lausn sem veldur ónákvæmni í greiningum.<sup>53</sup> Einnig eru margar aðferðir prótínmenngjafræði kostnaðarsamar og geta verið flóknar í framkvæmd.

Á síðustu öld voru notaðar aðferðir eins og ELISA, western blot og aðferðir byggðar á litskiljun (e. chromatography) sem nú teljast hefðbundnar greiningar á prótínum. Tæknilegar framfarir í greiningu þeirra hafa verið töluverðar, bæði í efnafræði, eðlisfræði og tækjabúnaði. Þróaðar hafa verið nokkrar aðferðir til að greina prótínmengi s.s. prótein örflögur, massagreining, Edman raðgreining og greiningar byggðar á hlaupi (e. gel based approaches). Sérstaklega forvitnilegar eru magnbundnar greiningar s.s. ICAT, SILAC og iTRAQ og afkastamiklar aðferðir s.s. röntengeislagreining kristalla (e. X-ray crystallography), NMR-litrófsgreiningar og cryoEM. Að síðustu hafa verið framfarir í lífupplýsingafræðilegum greiningum á prótínmenngja gögnunum.<sup>49</sup> Val á aðferð fer eftir áherslum rannsóknar en hver þeirra hefur sína kosti og galla. Ekki verður farið nánar ofan í aðferðafræðina að þessu sinni.

Nýlegt dæmi þar sem notast var við próteinmenngja aðferðir er AGES (Age, Gene/Environment, Susceptibility) Reykjavík rannsóknin sem er framkvæmd af rannsóknarhópi Hjartaverndar. Rannsóknin er lýðgrunduð langsníðsrannsókn á 5.764 Íslendingum á aldrinum 66–93 ára þar sem hluti þátttakenda mætti í 5 ára eftirfylgnirannsókn. Rannsóknarhópurinn hefur mælt og greint rúmlega 7.000 prótín í sermi með aðferðinni SOMAScan sem byggir á prótein örflögum.<sup>54</sup> Síðustu ár hefur farið fram greining og vinnsla á göngunum og fundist tengsl ákveðinna prótín í sermi við svipgerðir og sjúkdóma. Rannsókn á 5.438 einstaklingum úr þýðinu sýndi fram á tengsl styrks hundruða prótína í sermi við sykursýki 2<sup>55</sup> á meðan önnur rannsókn á 5.294 einstaklingum (einnig AGES) fann tengingu u.þ.b. 303 prótína úr sermi við Alzheimer's sjúkdóminn.<sup>56</sup> Prótínöggnin úr AGES rannsókninni hafa að auki verið notuð til að kanna hvaða prótín séu marktækt tengd við gáttatif (e. atrial fibrillation) (hjartasjúkdómur sem veldur hröðum og óreglulegum hjartslætti).<sup>57</sup> Mynd 3 sýnir hluta af niðurstöðum rannsóknarinnar og er gott dæmi um hvernig tölfræðilegar greiningar nýtast við rannsóknir á tengingu sjúkdóma við styrk prótína. Að auki er vert að nefna að aðrar nýlegar rannsóknir (ekki AGES) hafa skoðað tengsl styrks próteina í blóði við lífaldur (e. chronological age) og öldrunarsjúkdóma og hvernig hægt væri að nýta þessi prótín sem lífmerki fyrir öldrun.<sup>58</sup>

## Hb9

## Hb8

```
CGTTTTTAAGATCCGTTTGTGTTGTTGTTGTTGTTGCCGCGATGGCAATTCACGTTTTTACGAGCTCGTTCCITCGG-----GTCCAAAATTAAGCCAGTT
CGTTTTTAAGATCCGTTTGTGTTGTTGTTGTTGTTGCCGCGATGGCAATTCACGTTTTTACGAGCTCGTTCCITCGGGGCCAACCATGTCCAAAATTAAGCCAGTT
CGTTTTTAAGATCCGTTTGTGTTGTTGTTGTTGTTGCCGCGATGGCAATTCACGTTTTTACGAGCTCGTTCCITCGGGGCCAACCATGTCCAGAATTAAGCCAGTT
CGTTTTTAAGATCCGTTTGTGTT-----ATGCCAGTT
```

## Hbs2

## Hbs1

```
CTTTTTTAAATGCCCCACTGCTAAATGCAGCTAAATTCGTCGATTTGTCGAAAAGCGTTCTACAAGCTGAAGCACCTTTTTTAAGATGTTTGCATAGAAAATTA
CTTTTTTAAATGCCCCACTGCTAAATGCAGCTAAATTCGTCGATTTG-----TTAAAATTA
CTTTTTTAAATGCCCCACTGCTAAATGCAGCTAAATTCGTCGATTTGTCGAAAAGCGTTCTACAAGCTGAAGCACCTTTTTTAAGATGTTTGCATAGAAAATTA
```

Setraðir sem spanna tvo hluta eve gensins í ávaxtaflugum. Í báðum hlutum gensins finnast stórar úrfellingar, sem raska bindisetum fyrir umritunarþáttinn Hb. Úr grein Arnars Pálssonar ofl frá 2014 í PLoS One. – Haplotypes span two parts of the eve gene in fruitflies. Both parts contain large deletions, that disrupt binding sites for the transcription factor Hb. From Pálsson et al 2014 PLoS One.

## UMFRAMERFDAMENGJAFRÆÐI

Umframerfðamengjafiræði nýttist til að rannsaka hvernigbygginglitnisogmynsturDNA-metýlunarhefur áhrif á tjáningu gena og svipfar.<sup>59</sup> Umframerfðamengi getur verið ólíkt á milli fruma og innan vefja og haft áhrif á genatjáningu á nokkra mismunandi vegu (rætt að ofan). Til þess að öðlast betri skilning á stjórnun umritunar er hægt að skoða bindingu próteina og DNA en einnig umframerfðamerki. Aðferð sem kallast ChIP-raðgreining (e. chromatin immunoprecipitation sequencing) byggist á greiningum á bindingu prótína við DNA í erfðamenginu<sup>60</sup> en eins og áður sagði geta sumir umritunarþættir bundist mjög sértækt. ChIP-raðgreining hefur reynst gagnleg m.a. í að rannsaka hvar og hvenær ákveðinn umritunarþáttur bindst í erfðamenginu sem er vísbending um hvaða gen sá þáttur hefur áhrif á. Missterk binding slíks prótíns við stjórnroð ákveðins gens gæti leitt til breytileika í umritun þess og myndun sjúkdóma. Víkjum aftur að dæminu um stakskort á BAZ1B og Williams heilkennið. Ónógt BAZ1B leiðir til heilkennisins. ChIP-raðgreiningu var beitt til þess að finna stjórnsvæði þeirra gena sem BAZ1B bindst við. Gögnin sýna að BAZ1B próteinið tengist við stjórnsvæði margra gena sem eru mikilvæg fyrir þroskun og sérhæfingu tauga. Stakskortur á BAZ1B geninu leiðir til víðtækra breytinga á genatjáningu í forverafrumum tauga og er þetta vísbending um að brenglun á umritun margra gena í taugum tengist líffræði Williams heilkennisins.<sup>36</sup> Þetta er eitt dæmi um hvernig ChIP-raðgreining hefur verið notuð til að rannsaka áhrif umframerfða á genastjórnun.

## LOKAORÐ

Hér hefur verið fjallað um mikilvægi breytileika í genastjórnun og tengsl þessara ferla við breytileika í svipgerð og sjúkdómum. Helstu stig genastjórnunar frá umritun yfir í þýðingu voru tekin fyrir en ekki fjallað um ferli á stigum þroskunar, vefja og lífeðlisfræði sem eru einnig mjög mikilvæg. Stjórnun genatjáningar er flókið ferli með mörgum þáttum. Margt getur haft áhrif á ferlið s.s. breytileiki í erfðum, umhverfi ásamt tilviljun sem allt getur valdið breytileika í svipgerð og jafnvel stuðlað að myndun sjúkdóma.

Notagildi aðferða lífmengjafiræðinnar hefur vaxið á síðustu áratugum enda veita þær innsýn, með því að skoða þúsundir eða tugþúsundir þátta á sama tíma, á ákveðin stig genastjórnunar (jafnvel tvö eða fleiri). Samþætting margra gerða lífmengjafiræðilegra gagna getur þannig aukið skilning á samspili sameinda, stjórnkerfum fruma, þroskunar og lífeðlisfræði og hvernig áhrif ákveðinna þátta (erfðabreytileika eða umhverfisþátta) getur hríslast um kerfi fruma og lífvera. Til dæmis er hægt að gera kortlagningu á erfðabáttum sem hafa áhrif á mRNA styrk, fyrir öll gen lífveru. Í ávaxtaflugum hafði breytileiki í cis-röðum áhrif á tjáningu um 2.000 gena (af ~13.600) en merkilegt var að innúr (e. indels) stökkbreytingar valda að meðaltali meiri breytingum á styrk viðkomandi gena.<sup>61</sup> Einng er nú mögulegt að rannsaka stöðugleika kerfanna. Munur á hópum birtist í mun á meðaltölum en dreifni (e. variance) segir til um breytileika í kringum meðaltöl. Í skemmtilegum íslenskum dæmi fannst fyrst munur á tjáningu um 2000 gena milli þriggja afbrigða bleikju úr Þingvallavatni.<sup>62</sup> Næsta

rannsókn skoðaði einnig mun á dreifni í tjáningu (auk meðaltals) og sýndi að munur var á dreifni í tjáningu nokkur hundruð gena milli afbrigða bleikju í Þingvallavatni.<sup>63</sup> Einnig hafa fundist erfðabreytileikar í ávaxtaflugum sem tengjast dreifni í tjáningu gena.<sup>64</sup>

Auk erfðamengja og umritunarmengja fleygir fram rannsóknnum á umframerfða- og prótínmenngjum. Tekið var dæmi um hvernig ChIP-raðgreining varpaði ljósi á hver áhrif stakskorts á BAZ1B geninu væru á Williams heilkennið.<sup>36</sup> Með prótínmenngjafræði hefur starfsfólki Hjartaverndar tekist að tengja styrk próteina í blóði við ýmsa sjúkdóma s.s. Alzheimer's, sykursýki 2 og gáttatif.<sup>55-57</sup> Með ofangreindum dæmum er hægt að sjá hvernig hvert stig lífmengjafræðinnar getur leitt í ljós mikilvægar upplýsingar um orsakir fyrir breytileika í svipgerðum og sjúkdómum.

Vonir standa til að aukin þekking af þessu tagi gæti nýst fyrir persónubundnar lækningar þar sem margskonar gögn úr sama einstakling geta afhjúpað undirgerðir sjúkdóma sem má e.t.v. meðhöndla á ólíka vegu. Einstaklingar með sama sjúkdóm geta sýnt mismunandi svörum við lyfjum eða meðferðum sem getur stafað af þáttum sem valda breytileika í gena-tjáningu. Sumar meðferðir geta því gagnast ákveðnum hluta sjúklinga en að sama skapi verið hættulegar öðrum.<sup>65</sup> Öll ofangreind dæmi endurspeglar mikilvægi lífmengjarannsóknna og hvernig þróun á því sviði mun veita betri innsýn í hvernig líffræðileg kerfi vinna saman í heild sinni að mótun lífvera. Næsta skref er að samþætta núverandi þekkingu úr hverju skrefi lífmengjafræðinnar til að skoða áhrif gena, próteina og umframerfðabátta í heild sinni á ólíkar svipgerðir og undirgerðir sjúkdóma.<sup>66</sup>

Fyrirséð er að rannsóknir á lífmengjafræði muni verða algengari í framtíðinni og mun vitneskja okkar um breytileika í genastjórnun vera enn víðtækari. Eitt er víst, að breytileiki í genatjáningu hefur áhrif á tilurð breytileika í svipgerð og sjúkdómum á mjög marga ólíka vegu.

## ABSTRACT

Phenotype formation is a complex and multifaceted process governed by gene expression, where genetic variation, environmental influences, and random effects interact to shape biological outcomes. These interactions contribute not only to phenotypic diversity but also to disease risk. The emergence of omics technologies has enabled large-scale analysis of gene regulation, providing insights into key molecular processes from DNA to proteins. This review focuses on how genotype influences phenotype through variations in gene expression levels, highlighting how such variations may contribute to phenotypic variation and disease. Recent advances in molecular biology and integrative data analysis have enabled researchers to map genetic influences on mRNA expression across the genome, identify causal variants

and risk loci for diseases, and uncover protein-level associations with conditions such as Alzheimer's disease, type 2 diabetes, and cardiovascular disease. By integrating data from different omics techniques, we gain a deeper understanding of cellular regulation, development, and physiology, as well as the interplay between genetic and environmental factors. This knowledge is essential for developing personalized medicine, where molecular profiling can help classify disease subtypes and guide targeted therapies. Further research into gene expression variability and its regulatory mechanisms holds great promise for enhancing our understanding of complex biological systems and advancing medical treatments.

## HEIMILDIR

- Zhang J., Yang J., Zhang L., Luo, J., Zhao, H., Zhang, J. & Wen, C. 2020. A new SNP genotyping technology Target SNP-seq and its application in genetic analysis of cucumber varieties. *Sci Rep* 10 (1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62518-6>
- Gallagher, M. D. & Chen-Plotkin, A. S. 2018. The Post-GWAS Era: From Association to Function. *Am J Hum Genet* 102 (5). 717–730. DOI: 10.1016/j.ajhg.2018.04.002
- Lowe, R., Shirley, N., Bleackley, M., Dolan, S. & Shafee T. 2017. Transcriptomics technologies. *PLoS Comput Biol* 13 (5). DOI: 10.1371/journal.pcbi.1005457
- Buccitelli, C. & Selbach, M. 2020. mRNAs, proteins and the emerging principles of gene expression control. *Nat Rev Genet* 21 (10). 630–644. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41576-020-0258-4>
- Wittkopp, P. J. & Kalay, G. 2012. Cis-regulatory elements: Molecular mechanisms and evolutionary processes underlying divergence. *Nat Rev Genet*. 13 (1). 59–69. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrg3095>
- Clancy, S. & Brown, W. 2008. Translation : DNA to mRNA to Protein. *Nature Education* 1 (1). 101. Sótt af <https://www.nature.com/scitable/topicpage/translation-dna-to-mrna-to-protein-393/> (skoðað 20. júní 2024).
- Dor, Y. & Cedar, H. 2018. Principles of DNA methylation and their implications for biology and medicine. *The Lancet* 392 (10149). 777–786. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31268-6
- Eun, H-M. 1996. RNA Polymerases. Bls. 491–565 í: *Enzymology Primer for Recombinant DNA Technology* (ritstj. Eun, H-M.). Academic Press, Cambridge.
- Hernandez-Garcia, C.M. & Finer, J.J. 2014. Identification and validation of promoters and cis-acting regulatory elements. *Plant Science* 217–218. 109–119. DOI: 10.1016/j.plantsci.2013.12.007
- Mattioli, K., Oliveros, W., Gerhardinger, C., Andergassen, D., Maass, P. G., Rinn, J. L. & Melé, M. 2020. Cis and trans effects differentially contribute to the evolution of promoters and enhancers. *Genome Biol* 21 (1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13059-020-02110-3>
- Arnar Pálsson 2014. Stefnumót skilvirkni og breytileika - snertiflötur þroskunar og þróunar. *Náttúrufræðingurinn* 84 (1–2). 53–60.
- Huang, Y., Shang, R., Lu, G. A., Zeng, W., Huang, C., Zou, C. & Tang, T. 2022. Spatiotemporal Regulation of a Single Adaptively Evolving Trans-Regulatory Element Contributes to Spermatogenic Expression Divergence in *Drosophila*. *Mol Biol Evol* 39 (7). DOI: 10.1093/molbev/msac127
- Emerson, J.J. & Li, W.H. 2010. The genetic basis of evolutionary change in gene expression levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365 (1552). 2581–2590. DOI: 10.1098/rstb.2010.0005

14. Singhm, R.K. & Cooper, T. A. 2012. Pre-mRNA splicing in disease and therapeutics. *Trends Mol Med* 18 (8). 472–482. DOI: 10.1016/j.molmed.2012.06.006
15. Majewski, J. & Pastinen, T. 2011. The study of eQTL variations by RNA-seq: From SNPs to phenotypes. *Trends in Genetics* 27 (2). 72–79. DOI: 10.1016/j.tig.2010.10.006
16. Li, Y. 2021. Modern epigenetics methods in biological research. *Methods* 187. 104–113. DOI: 10.1016/j.ymeth.2020.06.022
17. Li, J. & Liu, C. 2019. Coding or noncoding, the converging concepts of RNAs. *Front Genet* 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00496>
18. Castellanos-Rubio, A. & Ghosh, S. 2019. Disease-associated SNPs in inflammation-related lncRNAs. *Front Immunol* 10. 420. DOI: 10.3389/fimmu.2019.00420
19. Frankish, A., Diekhans, M., Ferreira, A. M., Johnson, R., Jungreis, I., Loveland, J., Mudge, J. M., Sisu, C., Wright, J., Armstrong, J., Barnes, I., Berry, A., Bignell, A., Carbonell Sala, S., Chrast, J., Cunningham, F., Di Domenico, T., Donaldson, S., Fiddes, I. T., García Girón, C., Gonzalez, J. M., Grego, T., Hardy, M., Hourlier, T., Hunt, T., Izuogu, O. G., Lagarde, J., Martin, F. J., Martínez, L., Mohanan, S., Muir, P., Navarro, F. C. P., Parker, A., Pei, B., Pozo, F., Ruffier, M., Schmitt, B. M., Stapleton, E., Suner, M. M., Sycheva, I., Uszczynska-Ratajczak, B., Xu, J., Yates, A., Zerbino, D., Zhang, Y., Aken, B., Choudhary, J. S., Gerstein, M., Guigó, R., Hubbard, T. J. P., Kellis, M., Paten, B., Reymond, A., Tress, M. L. & Flicek, P. 2019. GENCODE reference annotation for the human and mouse genomes. *Nucleic Acids Res* 47 (D1). D766–773. DOI: 10.1093/nar/gky955
20. Karolinska Institutet 2024. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2024 to Victor Ambros and Gary Ruvkun. Sótt af <https://news.ki.se/the-nobel-prize-in-physiology-or-medicine-2024-to-victor-ambros-and-gary-ruvkun> (skoðað 10. janúar 2025).
21. Kawahara, Y. 2014. Human diseases caused by germline and somatic abnormalities in microRNA and microRNA-related genes. *Congenit Anom (Kyoto)* 54 (1). 12–21. DOI: 10.1111/cga.12043
22. Syeda, Z. A., Langden, S. S., Munkhzul, C., Lee, M. & Song, S. J. 2020. Regulatory mechanism of microRNA expression in cancer. *Int J Mol Sci* 21 (5). DOI: 10.3390/ijms21051723
23. Bartsch, R. P., Liu, K. K. L., Bashan, A. & Ivanov, P. C. 2015. Network physiology: How organ systems dynamically interact. *PLoS One* 10 (11). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142143>
24. Cholewa-Waclaw, J., Bird, A., von Schimmelmann, M., Schaefer, A., Yu, H., Song, H., Madabhushi, R. & Tsai, L-H. 2016. The role of epigenetic mechanisms in the regulation of gene expression in the nervous system. *Journal of Neuroscience. Society for Neuroscience* 36 (45). 11427–11434. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2492-16.2016
25. Cardoso-Moreira, M., Halbert, J., Valloton, D., Velten, B., Chen, C., Shao, Y., Liechti, A., Ascensão, K., Rummel, C., Ovchinnikova, S., Mazin, P. V., Xenarios, I., Harshman, K., Mort, M., Cooper, D. N., Sandi, C., Soares, M. J., Ferreira, P. G., Afonso, S., Carneiro, M., Turner, J. M. A., VandeBerg, J. L., Fallahshahroudi, A., Jensen, P., Behr, R., Lisgo, S., Lindsay, S., Khaitovich, P., Huber, W., Baker, J., Anders, S., Zhang, Y. E. & Kaessmann, H. 2019. Gene expression across mammalian organ development. *Nature* 571 (7766). 505–509. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1338-5>
26. Heard, E. & Martienssen, R. A. 2014. Transgenerational epigenetic inheritance: Myths and mechanisms. *Cell* 157 (1). 95–109. DOI: 10.1016/j.cell.2014.02.045
27. Glastad, K. M., Hunt, B. G. & Goodisman, M. A. D. 2018. Epigenetics in Insects: Genome Regulation and the Generation of Phenotypic Diversity. *Annual Review of Entomology* 64. 185–203. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011118-111914>
28. Lappalainen, T. & Grealay, J. M. 2017. Associating cellular epigenetic models with human phenotypes. *Nat Rev Genet* 18 (7). 441–451. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrg.2017.32>
29. Kagohara, L. T., Stein-O'Brien, G. L., Kelley, D., Flam, E., Wick, H. C., Danilova, L. V., Easwaran, H., Favorov, A. V., Qian, J., Gaykalova, D. A. & Fertig, E. J. 2018. Epigenetic regulation of gene expression in cancer: Techniques, resources and analysis. *Brief Funct Genomics* 17 (1). 49–63. DOI: 10.1093/bfpg/elx018
30. Deaton, A. M. & Bird, A. 2011. CpG islands and the regulation of transcription. *Genes Dev* 25 (10). 1010–1022. DOI: 10.1101/gad.2037511
31. Zhang, Y., Sun, Z., Jia, J., Du, T., Zhang, N., Tang, Y., Fange, Y. & Fang, D. 2021. Overview of Histone Modification. *Adv Exp Med Biol* 1283. 1–16. DOI: 0.1007/978-981-15-8104-5\_1
32. Ibeagha-Awemu, E. M. & Zhao, X. 2015. Epigenetic marks: Regulators of livestock phenotypes and conceivable sources of missing variation in livestock improvement programs. *Front Genet* 6. 302. DOI: 10.3389/fgene.2015.00302
33. Virolainen, S. J., VonHandorf, A., Viel, K. C. M. F., Weirauch, M. T. & Kottyan, L. C. 2023. Gene–environment interactions and their impact on human health. *Genes Immun* 24 (1). 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41435-022-00192-6>
34. Xu, Y. C. & Guo, Y. L. 2020. Less Is More, Natural Loss-of-Function Mutation Is a Strategy for Adaptation. *Plant Commun* 1 (6). DOI: 10.1016/j.xplc.2020.100103
35. Johnson, A. F., Nguyen, H. T. & Veitia, R. A. 2019. Causes and effects of haploinsufficiency. *Biological Reviews* 94 (5). 1774–1785. DOI: 10.1111/brv.12527
36. Lalli, M. A., Jang, J., Park, J. H. C., Wang, Y., Guzman, E., Zhou, H., Audouard, M., Bridges, D., Tovar, K. R., Papuc, S. M., Tutulan-Cunita, A. C., Huang, Y., Budisteanu, M., Arghir, A. & Kosik, K. S. 2016. Haploinsufficiency of BAZ1B contributes to Williams syndrome through transcriptional dysregulation of neurodevelopmental pathways. *Hum Mol Genet* (7). 1294–1306. DOI: 10.1093/hmg/ddw010
37. Mills, E. W. & Green, R. 2017. Ribosomopathies: There's strength in numbers. *Science* 358 (6363). DOI: 10.1126/science.aan2755
38. Aqeilan, R. I., Calin, G. A. & Croce, C. M. 2010. miR-15a and miR-16-1 in cancer: Discovery, function and future perspectives. *Cell Death Differ* 17 (2). 215–220. DOI: <https://doi.org/10.1038/cdd.2009.69>
39. Kaminen-Ahola, N. 2020. Fetal alcohol spectrum disorders: Genetic and epigenetic mechanisms. *Prenat Diagn* 40 (9). 1185–1192. DOI: 10.1002/pd.5731
40. Graw, S., Chappell, K., Washam, C.L., Gies, A., Bird, J., Robeson, M. S. & Byrum, S. D. 2021. Multi-omics data integration considerations and study design for biological systems and disease. *Mol Omics* 17 (2). 170–185. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MO00041H>
41. Yamada, R., Okada, D., Wang, J., Basak, T. & Koyama, S. 2021. Interpretation of omics data analyses. *J Hum Genet*. 66 (1). 93–102. DOI: 10.1038/s10038-020-0763-5
42. Wooley, J. C., Godzik, A. & Friedberg, I. 2010. A primer on metagenomics. *PLoS Comput Biol* 6 (2). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000667>
43. Barbeira, A. N., Dickinson, S. P., Bonazzola, R., Zheng, J., Wheeler, H. E., Torres, J. M., Shah, K. P., Garcia, T., Edwards, T. L., Stahl, E. A., Huckins, L. M., GTEx Consortium, Nicolae, D. L., Cox, N. L. & Im, H. K. 2018. Exploring the phenotypic consequences of tissue specific gene expression variation inferred from GWAS summary statistics. *Nat Commun* 9 (1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03621-1>
44. Huang, Y. H., Grasis, J. A., Miller, A. T., Xu, R., Soonthornvacharin, S., Andreotti, A. H., Tsoukas, C. D., Cooke, M. P. & Sauer, M. 2007. Positive regulation of Itk PH domain function by soluble IP4. *Science* 316 (5826). 886–889. DOI: 10.1126/science.1138684
45. Harrison, P. W., Wright, A. E. & Mank, J. E. 2012. The evolution of gene expression and the transcriptome-phenotype relationship. *Semin Cell Dev Biol* 23 (2). 222–229. DOI: 10.1016/j.semcdb.2011.12.004
46. Ozsolak, F. & Milos, P. M. 2011. RNA sequencing: Advances, challenges and opportunities. *Nat Rev Genet* 12 (2). 87–98. DOI: 10.1038/nrg2934
47. Vidman, L., Källberg, D. & Rydén, P. 2019. Cluster analysis on high dimensional RNA-seq data with applications to cancer research - An evaluation study. *PLoS One* 14 (12). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219102>
48. Bodaghi, A., Fattahi, N. & Ramazani, A. 2023. Biomarkers: Promising and valuable tools towards diagnosis, prognosis and treatment of Covid-19 and other diseases. *Heliyon* 9 (2). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13323

49. Aslam, B., Basit, M., Nisar, M. A., Khurshid, M. & Rasool, M. H. 2017. Proteomics: Technologies and their applications. *J Chromatogr Sci* 55 (2). 182–196. DOI: 10.1093/chromsci/bmw167
50. Dodig-Crnković, T., Hong, M. G., Thomas, C. E., Häussler, R. S., Bendes, A., Dale, M., Edfors, F., Forsström, B., Magnusson, P. K., Schuppe-Koistinen, I., Odeberg, J., Fagerberg, L., Gummesson, A., Bergström, G., Uhlén, M. & Schwenk, J. M. 2020. Facets of individual-specific health signatures determined from longitudinal plasma proteome profiling. *EBioMedicine* 57. BIO: 10.1016/j.ebiom.2020.102854
51. Zhong, W., Edfors, F., Gummesson, A., Bergström, G., Fagerberg, L. & Uhlén, M. 2021. Next generation plasma proteome profiling to monitor health and disease. *Nat Commun* 12 (1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22767-z>
52. Liu, Y., Beyer, A. & Aebersold, R. 2016. On the Dependency of Cellular Protein Levels on mRNA Abundance. *Cell* 165 (3). 535–550. DOI: 10.1016/j.cell.2016.03.014
53. Chandramouli, K. & Qian, P.-Y. 2009. Proteomics: Challenges, Techniques and Possibilities to Overcome Biological Sample Complexity. *Human Genomics and Proteomics* 1 (1). DOI: 10.4061/2009/239204
54. Harris, T. B., Launer, L. J., Gudny Eiríksdóttir, Ólafur Kjartansson, Palmi V Jonsson, Gunnar Sigurdsson, Guðmundur Thorgeirsson, Thor Aspelund, Garcia, M. E., Cotch, M. F., Hoffman, H. J. & Vilundur Gudnason. 2007. Age, gene/environment susceptibility-reykjavik study: Multidisciplinary applied phenomics. *Am J Epidemiol* 165 (9). 1076–1087. DOI: 10.1093/aje/kwk115
55. Valborg Guðmundsdóttir, Zaghlool SB, Valur Emilsson, Thor Aspelund, Ilkov, M., Elias F Guðmundsson, Stefan M Jonsson, Zilhao, N. R., Lamb, J. R., Suhre, K., Jennings, L. L. & Vilundur Gudnason 2020. Circulating protein signatures and causal candidates for type 2 diabetes. *Diabetes* 69 (8). 1843–1853. DOI: 10.2337/db19-1070
56. Elisabet A. Frick, Valur Emilsson, Thorarinn Jonmundsson, Anna E. Steindorsdóttir, Johnson, E. C. B., Puerta, R., Dammer, E. B., Shantaraman, A., Cano, A., Boada, M., Valero, S., García-González, P., Elias F. Guðmundsson, Alexander Guðjonsson, Pitts, R., Qiu, X., Finkel, N., Loureiro, J. J., Orth, A. P., Seyfried, N. T., Levey, A. I., Ruiz, A., Thor Aspelund, Jennings, L. L., Launer, L. J., Valborg Guðmundsdóttir & Vilundur Gudnason 2024. Serum proteomics reveal APOE-ε4-dependent and APOE-ε4-independent protein signatures in Alzheimer's disease. *Nat Aging* 4. 1446–1464. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43587-024-00693-1>
57. Thorarinn Jonmundsson, Anna E Steindorsdóttir, Austin, T. R., Elisabet A Frick, Gisli T Axelsson, Launer, L., Psaty, B. M., Loureiro, J., Orth, A. P., Thor Aspelund, Valur Emilsson, Floyd, J. S., Jennings, L., Vilundur Gudnason & Valborg Guðmundsdóttir 2023. A proteomic analysis of atrial fibrillation in a prospective longitudinal cohort (AGES-Reykjavik study). *Europace* 25 (11). DOI: 10.1093/europace/euad320
58. Argentieri, M. A., Xiao, S., Bennett, D., Winchester, L., Nevado-Holgado, A. J., Ghose, U., Albukhari, A., Yao, P., Mazidi, M., Lv, J., Millwood, I., Fry, H., Rodosthenous, R. S., Partanen, J., Zheng, Z., Kurki, M., Daly, M. J., Palotie, A., Adams, C. J., Li, L., Clarke, R., Amin, N., Chen, Z. & van Duijn, C. M. 2023. Proteomic aging clock predicts mortality and risk of common age-related diseases in diverse populations. *Nat Med* 30. 2450–2460. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03164-7>
59. Wang, K. C. & Chang, H. Y. 2018. Epigenomics technologies and applications. *Circ Res* 122 (9). 1191–1199. DOI: 10.1161/CIRCRESA-HA.118.310998
60. Park, P. J. 2009. ChIP-seq: Advantages and challenges of a maturing technology. *Nat Rev Genet* 10 (10). 669–680. DOI: 10.1038/nrg2641
61. Massouras, A., Waszak, S. M., Albarca-Aguilera, M., Hens, K., Holcombe, W., Ayroles, J. F., Dermitzakis, E. T., Stone, E. A., Jensen, J. D., Mackay, T. F. C. & Deplancke, B. 2012. Genomic Variation and Its Impact on Gene Expression in *Drosophila melanogaster*. *PLoS Genet* 8 (11). DOI: 10.1371/journal.pgen.1003055
62. Jóhannes Guðbrandsson, Sigríður Rut Franzdóttir, Bjarni Kristófer Kristjánsson, Ahi, E. P., Maier, V. H., Kapralova, K. H., Sigurður Sveinn Snorrason, Zophonías Oddur Jónsson & Arnar Pálsson 2018. Differential gene expression during early development in recently evolved and sympatric Arctic charr morphs. *PeerJ* 6. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.4345>
63. Horta-Lacueva, Q. J. B., Zophonías Oddur Jónsson, Dagny A. V. Thorholludóttir, Benedikt Hallgrímsson, Kapralova, K. H. 2023. Rapid and biased evolution of canalization during adaptive divergence revealed by dominance in gene expression variability during Arctic charr early development. *Commun Biol* 6 (1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05264-5>
64. Huang, W., Carbonea, M. A., Magwire, M. M., Pieffer, J. A., Lyman, R. F., Stone, E. A., Anholt, R. R. H. & Mackay, T. F. C. 2015. Genetic basis of transcriptome diversity in *Drosophila melanogaster*. *Proc Natl Acad Sci USA* 112 (44). E6010–E6019. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1519159112>
65. Simonovsky, E., Schuster, R. & Yeger-Lotem, E. 2019. Large-scale analysis of human gene expression variability associates highly variable drug targets with lower drug effectiveness and safety. *Bioinformatics* 35 (17). 3028–3037. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz023>
66. Subramanian, I., Verma, S., Kumar, S., Jere, A. & Anamika, K. 2020. Multi-omics Data Integration, Interpretation, and Its Application. *Bioinform Biol Insights* 14. DOI: 10.1177/1177932219899051

## UM HÖFUNDA

**Hulda Karen Ingvarsdóttir** (f. 2001) er með meistaraþróf í Lífupplýsingafræði og nú doktorsnemi í Líf- og læknávisindum við Háskóla Íslands. Í doktorsverkefninu vinnur Hulda með rannsóknarhópi Hjartaverndar en markmiðið er að greina og skilgreina peptíð og próteóform í blóðrás sem tengjast snemmbúinni þróun á sykursýki 2. Einnig verða erfðamengjafræðileg gögn notuð til að meta möguleg orsakasambönd milli próteoforma og sykursýki 2.

[hki1@hi.is](mailto:hki1@hi.is)



**Arnar Pálsson** (f. 1970) er með doktorsþróf í erfðafræði. Hann starfar sem prófessor í lífupplýsingafræði við Líf- og umhverfisvísindadeild Háskóla Íslands, og rannsakar þróun, þroskun og erfðir í bleikjum, urriðum, ávaxtaflugum, maurum og lúsmý.

[apalsson@hi.is](mailto:apalsson@hi.is)



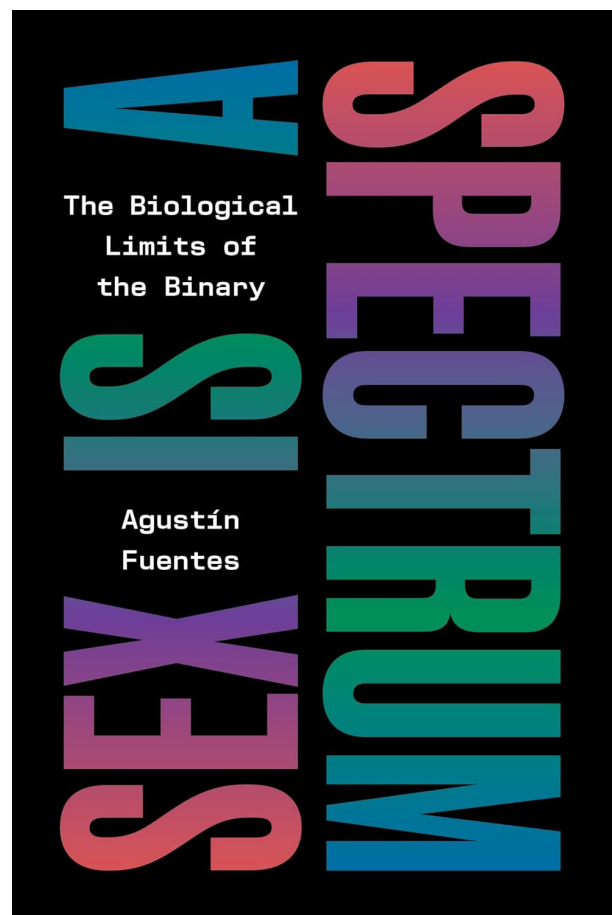
# Tveggja-flokka kynjakerfi er úrelt

Gísli Pálsson

Orðið *kyn* er lykilhugtak bæði í daglegu tali víða um heim og í ýmsum fræðum. Lengst af hafa líffræðileg kyn talist tvö (karlar og konur), en nú er það ekki lengur óumdeilt.<sup>1,2</sup> Deilum um kynjahugtakið, ekki síst fjölda kynja, fylgir talsverður hávaði, enda varðar þetta mörg svið samfélagsins, m.a. löggjöf, uppeldi og mannréttindi. Stundum er talað um kynusla, bæði í líffræðilegum og málfræðilegum skilningi. Í þessari grein er fjallað um kynjaumræðu samtímans. Hvað hefur fræðigreinin um manninn, sem ég hef lengst af lagt stund á, fram að færa í þessum efnum? Þá er meðal annars greint frá nýrri bók eftir kunnan bandarískan sérfræðing á sviði líffræðilegrar mannfræði, Agustín Fuentes, sem ber heitið *Sex is a Spectrum*.

Íslenska hagstofan, sem fylgist náið með þegnum landsins – rétt eins og Ágústus keisari (27 f.Kr. – 14 e.Kr) innan marka Rómaveldis forðum þegar hann lét „boð út ganga“ – gerir nú ráð fyrir nýjum flokki fólks, „kynsegin/annað“. Opinber kyn íbúa á Íslandi eru þá orðin fjögur, jafnvel fleiri. Samkvæmt mannfjölda-skýrslu Hagstofunnar voru 199.622 karlar, 189.623 konur og 199 kynsegin/annað búsett á landinu í upphafi árs 2025.<sup>3</sup> Athyglisvert er að þótt körlum og konum hafi ekki fjölgað svo nokkru nemi frá fyrra ári (körlum um 1,6%, konum um 1,4%) hefur kynsegin/annað fjölgað um 25,2%. Árið 2022 voru aðeins 70 skráðir kynsegin/annað, í janúar 2025 hafði fjöldi þeirra næstum þrefaldast. Þetta minnir á vaxandi þjóðfélagsumræðu um kynferði, merkimiða kynjanna, þýðingu þeirra og inntak, og rétt fólks til að kalla sig eins og það kys. Bandaríski kynjafræðingurinn Anne Fausto-Sterling bendir á að oft sé erfitt að ákvarða hlutfall intersexfólks (með ódæmigerð kyneinkenni): „Þetta eru ekki endilega upplýsingar sem fólk kemur á framfæri í starfsviðtölum.“<sup>4</sup> Hver vill vera „tvíkynjungur“ eða „viðrini“? Samt eru þetta mikilvægar upplýsingar um breytileika fólks, rétt eins og kynþáttur, sem reyndar veldur ekki minni usla en kyn.<sup>5</sup> En telji fólk sig „trans“ (með kynvitund sem samræmist ekki því kyni sem því var úthlutað við fæðingu), er þá ekki sjálfsagt að virða það?<sup>1</sup>

Töluvert hefur að undanförnu verið deilt um fjölgun kynja, bæði á Íslandi og erlendis, ástæður hennar,





Ljósmynd: Unsplash

réttmæti og þýðingu fyrir lagasetningu, samfélag og mannréttindi. Þau líffræðilegu kyn sem hafa bæst við í málinu, umfram „karla og konur“, hafa vafalaust verið til staðar allt frá landnámi þótt merkimiðarnir hafi varla verið til nema undir rós, svo sem þegar ýjað var að skömm „kvenlegra“ samkynhneigðra karla. Lesbíur voru sjaldan á dagskrá. Þetta var hinn kynlægi heimur sem birtist fljótlega eftir landnám í kjölfar kristnitöku í karlmiðaðri frásögn Íslendingasagna. En þótt raddir kvenna séu oft faldar í Íslendingasögum má víða greina þær að baki sagnanna, eins og Helga Kress hefur rakið í verkum sínum.<sup>6</sup>

Helga hefur rækilega staðfest kynusla (ef það er rétta orðið) í fornbókmentunum, þar sem ummyndanir hins kvenlæga og karllæga ber oft á góma, meðal annars í aðdróttunum um kvenleika karla og ókvenleika kvenna. Í Brennu-Njáls sögu (kafla 123) segir Flosi um Njál hinn skegglaus, á þingi: „Því að margir vita eigi er hann sjá hvort hann er karlmaður eða kona.“ Hann er með öðrum orðum hvorugt. Háð af þessu tagi kann að benda til þess að tvíhyggjan hafi ekki verið til staðar á landnámsöld. En ef til vill má líta svo á að tvíhyggjan hafi einmitt verið sá rammi sem uslinn hverfðist um, án hennar hefðu ummyndanir kynja verið ósannfærandi eða óhugsandi. Kynferði birtist ekki sem sveigjanlegt litróf heldur sem harðsvírað flokkunarkerfi.<sup>7</sup>

## HAGSTOFUR ANNARRA LANDA

Mannfræðirannsóknir víða um heim hafa leitt í ljós fjölbreytta kynjaða heima.<sup>8</sup> Stundum gegnir „þriðja kynið“ mikilvægu félagslegu eða trúarlegu hlutverki, til að mynda meðal frumbyggja Norður-Ameríku, í Suðaustur-Asíu og í Indónesíu. Flóran getur orðið allflókin; í menningu Búgis-fólks á Súlavésí-eyju í Indónesíu er til að mynda gert ráð fyrir nokkrum kynjum auk karls og konu, meðal annars calabi (líffræðilegum karli sem ögrar karllægum hefðum) og calalai (líffræðilegri konu sem ögrar kvenlegum hefðum).<sup>9</sup> Líffræðin og kynfærin segja ekki alla söguna; þetta fólk er gjarna nánast í guðatölu. Hagstofum er vandi á höndum.

Á allra síðustu árum hefur baráttan gegn einstrengings-legri tvíkynjaflokkun og þeim fordómum og misrétti sem henni fylgja sótt í sig veðrið. Ein af tilskipunum Joes Bidens, fyrrverandi Bandaríkjaforseta, kvað á um að mismunur fólks á grundvelli kynhneigðar eða kyngervis (félagslegrar vitundar) skyldi útrýmt. Nú ber hinsvegar svo við að arf-taki Bidens, Donald Trump, hefur snúið þessari stefnu við. Í kosningabaráttu sinni sóttist hann eftir fylgi öfgasinnaðra kjósenda sem sáu ofsjónum yfir auknu frelsi kynsegin fólks, og skömmu eftir að hann sór embættiseiðinn í annað sinn gaf hann út nýja tilskipun þar sem bann var lagt við „óvinsælum og róttækum aðgerðum í þessum efnunum hvarvetna á



Anne Fausto-Sterling  
Ljósmynd: Wikimedia Commons

vegum alríkisins“. Kynin væru bara tvö, og því yrði ekki breytt: „Frá og með deginum í dag er það opinber stefna Bandaríkjanna að kynin séu aðeins tvö, karlar og konur.“<sup>10</sup>

Líklega var þessi tilskipun samin í hasti í andrúmslofti ákafra deilna um sanngirni í samkeppnisíþróttum. Meðal gagnrýnenda var því haldið fram að transkonur hefðu laumast inn í kveníþróttir undir fölsku flaggi. Þetta minnti á gamlar þrætur um sanngirni í stangveiðum þar sem fólk birtist skyndilega með afkastamikinn veiðibúnað sem ekki hafði áður þekkt (togveiðar voru ekki komnar til sögunnar en hefðu sannarlega fyllt mælinn). En tilskipunin var ekkert grín; grundvallarmannréttindum var fórnað fyrir samkeppnisstöðu innan íþróttta. Bakslagið sem yfirlýsing Trumps um þetta efni var hluti af, var ekki bundið við Bandaríkin eða pólitískan vettvang þeirra. Nýlega kvað Hæstiréttur Bretlands upp þann úrskurð að transkonur féllu ekki undir sömu ákvæði jafnréttis laga og aðrar konur.<sup>11</sup> Vissulega er eðlismunur á forsetatilskipun og hæstaréttardómi, en í báðum tilvikum er verið að festa í sessi þá hugmynd að kvennarými séu ekki fyrir transkonur.

#### VITNISBURÐUR FRÆÐANNA

Mannfræðingar hafa bent á að skilningur fólks á lífheiminum og náttúrunni mótist óhjákvæmilega af menningu og samfélagi. Þetta á ekki aðeins við

svokallaðan almenning, heldur einnig vísindalegar rannsóknir og fræði. Kunn er rannsókn Emily Martin á störfum og verkum líffræðinga sem stunduðu rannsóknir á eggjum og sæði. Á síðustu öld var yfirleitt litið svo á að eggjið „hvíldi hálfsofandi“ í eggjastokkum konunnar og biði þess að frjóvgast þegar „fjörlegt sæði“ karlsins færi á kreik. Eggjið væri þolandinn í rómantík lífsins en karlinn gerandi, „skapari sögunnar“. Löngu eftir að bent hafði verið á að slík túlkun væri vafasöm, jafnvel beinlínis röng, kepptust kennslubækur á sviðinu við að endurtaka klisjuna.<sup>12</sup> Martin hélt því fram að þessi tregða ætti rætur að rekja til rótgróinna staðalmynda hins karllæga og hins kvenlega í menningu samtímans.

Þótt ímyndað valdakerfi eggs og sæðis nái langt út fyrir kvenlíkamann, er vægi þess fráleitt jafn djúpstætt og hinn raunverulegi kynjaði heimur sem oftast mætir nýfæddu barni. Það er kannski ekki að furða að klisjan um „náttúrulegu“ kynin tvö sé jafn lífseig og raun ber vitni. Erfiðara er að afbyggja hana en ævintýrið um eggjið og sæðið þar sem hún á djúpar rætur í sögu og menningu Vesturlanda og miklir hagsmunir eru óhjákvæmilega í húfi: völd, erfðir, réttindi og skyldur. Löggjafanum er vandi á höndum þegar kemur að kynferði, enda getur ákvörðun um kyn haft úrslitaáhrif á rétt til náinna kynna og stofnunar fjölskyldu. Víða á Vesturlöndum hefur þessi réttur verið rýmkaður á síðustu áratugum, en sums staðar hefur hann jafnharðan verið þrengdur.

Oft hefur verið litið svo á að tilvist kynseginfólks sé til marks um óeðli eða fráhrarf frá mennsku. Mikilvægt sé að leiðrétta skaðlega sjálfsmynd, hegðun og líkamsbyggingu. Það sé öllum fyrir bestu. Þegar skurðaðgerðir komu til sögunnar var hafist handa við að laga „afbrigðilegt fólk“ að normi samfélagsins, leiðrétta kynvitund þess og líkamsbyggingu. Anne Fausto-Sterling benti í tímamóta-grein í *The New York Times* árið 1993 á að fyrir vikið væri fátítt að intersexfólk varðveitti upprunalegt kyn sitt. Börn með óvenjuleg æxlunarfæri væru gripin fljótlega eftir fæðingu og látin gangast undir hormónamedferð og skurðagerð „svo þau gætu í kyrrð og ró komið sér fyrir í samfélaginu meðal gagnkynhneigðra samborgara.“<sup>14</sup> Að sumu leyti voru þetta vissulega framfaraspör, aðgerðir auðvelduðu mörgum lífið, og í vaxandi mæli fóru þær fram í samráði við nánustu fjölskyldu. En mannúðarstarfið gekk of langt, segir Fausto-Sterling; gengið var út frá því að aðeins gagnkynhneigð væri eðlileg.

Fausto-Sterling komst að þeirri niðurstöðu að ef ríkisvaldinu og löggjafanum væri annnt um að viðhalda tveggja-flokka kynjakerfi þá væru þau að bjóða náttúrunni byrginn – því líffræðilega séð væru mörg þrep á milli hins kvenlega og hins karllæga. Á því litrófi væru að minnsta kosti fimm kyn, kannski enn fleiri. Hún (ef það er kórrétt persónufornafn) hafði sett sér það markmið með stuttri grein sinni að ýta við fólki – og viðbrögðin létu ekki á sér standa. Áður en langt



Ljósmynd: Unsplash

um leið birtu Kapólsku samtökin fyrir trúarlegum og borgaralegum réttindum auglýsingu í The New York Times, þar sem sagði: „Það ærir óstöðugan að heyra fólk tala um ‘fimm kyn’ þar sem öllum heilbrigðum manneskjum er ljóst að kynin eru aðeins tvö, og að bæði eiga rætur í náttúrunni.“<sup>13</sup>

Fausto-Sterling þekkir flækjur kynjamálsins vel af eigin raun. Í formála bókar sinnar *Sexing the Body: Gender Politics and the Construction of Sexuality*, sem fyrst kom út árið 2000, segist hún vel til þess fallin að fjalla um efnið, sjálf hafi hún í gegnum tíðina „óhikað ýmist kallað sig gagnkynhneigða, lesbíu eða eitthvað þar á milli“.<sup>13</sup> Í vissum skilningi flokkast bók hennar undir það sem hefur verið kallað „mannfræði á heimaslóðum“ (e. anthropology at home). Vettvangur Fausto-Sterling er að hluta til hún sjálf og hennar eigið líf. Hún fer ýtarlega yfir kynjamálið í ljósi eigin reynslu og rannsókna í líffræði, náttúruvísindum og hugvísindum. Yfirleitt forðast hún eðlishyggju og sækir til hugsuða á borð við Donnu Haraway, sem líta á líffræði sem stjórnmalastarfsemi og á kyngervi (e. gender) og kynjun sem líkömnuð (e. embodied) ferli í hringrás lífsins þar sem náttúra og uppeldi renna saman í eina sæng (nature/nurture).<sup>14</sup>

## LÍFFRÆÐILEGIR ANNMARKAR TVÍHYGGJUNNAR

Um það leyti sem Donald Trump gaf út tilskipunina um tvö lögmæt kyn á sinni hagstofu, aldarfjórðungi eftir að Fausto-Sterling gaf út áður nefnda bók, sendi bandaríski líffræðilegi mannfræðingurinn Agustín Fuentes frá sér bókina *Sex is a Spectrum*.<sup>15</sup> Líffræðileg mannfræði Fuentes fjallar um eðli og uppruna *Homo sapiens*, fjölbreytni tegundarinnar og samanburð við skyldar tegundir. Í nútíma kynjaumræðu er eðlilegt að líta svo á að líffræðileg mannfræði sé nátengd öðrum fræðum, ekki síst félagslegri mannfræði sem meðal annars fjallar um kyngervi og kynjaheima í ólíkum menningum og tímum. Grein Emily Martin um egg og sæði, sem áður var greint frá, minnir einmitt á þennan mikilvæga snertiflöt. Hver er þá kjarninn í líffræðilegri mannfræði Fuentes í þessu víðfeðma samhengi?

Rannsóknnum á líffræði æxlunar, sem Fuentes kallar líffræði kyns (e. sex biology), hefur fleygt fram á síðustu árum. Markmið Fuentes er að draga saman það sem nú er vitað um efnið, hvað megi af því læra og hvernig tiltæk þekking geti orðið að liði í skólastarfi, við setningu laga og í daglegu lífi. Rannsóknir á heimi annarra dýra, forsögu mannkyns og lífi fólks nú til dags sýni að líffræði kyns snúist ekki um tvenndir, hið karllæga og kvenlæga. Líffræði æxlunar sé vissulega



Ljósmynd: Unsplash

áhrifavaldur í lífi fólks, en ráðandi tvíhyggja sé skaðleg spennitreyja sem grafi undan mannréttindum. Auk þess segi framleiðsla eggja og sæðis mun minna um líffræði okkar en oft sé haldið fram.

Fuentes bendir á að hugmyndin um líffræðilega aðskilin kyn eigi sér tiltölulega skamma sögu. Fræði Rómverja og Grikkja til forna (þeirra á meðal Aristótelesar og Hippókratesar) gerðu ekki ráð fyrir því að karlar og konur væru tveir aðskildir flokkar lífvera. Það var fyrst á 20. öld sem líffræðingar tóku að beina sjónum sínum að kynfrumum, og töldu að munurinn á sáðfrumum og eggfrumum skýrði líffræðilegan mun á körlum og konum. Kynin tvö hefðu lagast að mismunandi aðstæðum, framleiðslu sæðis og eggja sem lytu ólíkum lögmálum í samkeppni lífsins, í samræmi við „úrval náttúrunnar“ sem kenning Charles Darwins og Alfreds Russels Wallaces gerði ráð fyrir. Enski erfðafræðingurinn Angus John Bateman (1919–1996) leiddi rök að því, með tilvísun í tilraunir sem hann gerði á bananaflugum árið 1948, að náttúruval kynja helgaðist af því að sæði karlsins væri mun ódýrara líffræðilega séð í framleiðslu en egg konunnar, sem væru föst stærð og, fyrir vikið verðmætari. Áratugum saman var litið á „reglu Batemans“ sem heilög sannindi og miklir kenningarlegir loftkastalar byggðir á henni, en endurteknar tilraunir árið 2012 leiddu í ljós vilhalla skekkju og hröktu niðurstöður hans.<sup>16</sup>

Þótt kynfrumur séu tvenns konar, segir Fuentes, séu kerfin og líkamarnir sem framleiða þær það ekki. Þegar mannfólk er annars vegar sé málið sérlega flókið. Mannslíkaminn mótist og starfi í félagslegu og menningarlegu umhverfi sem óhjákvæmilega elur hann. Þess vegna sé nauðsynlegt að gera ráð

fyrir kyngervi, því hvernig fólk hugsar og tali um kyn, sem ekki verði rakið til líffræðinnar einnar. Kyngervi (kvenleiki og karlmennska) mótist af félagslegum aðstæðum. Í mannheimi sé kyn því óhjákvæmilega líffélagslegt („biocultural“ með tungutaki Fuentes). Eins og Simone de Beauvoir benti einnig á, og frægt er orðið: „Við fæðumst ekki sem konur, við verðum konur“. Við fæðumst ekki heldur karlar eða eitthvað annað, eins og Rúnar Helgi Vignisson ítrekar í bók sinni *Þú ringlaði karlmaður*, heldur verðum karlar.<sup>17</sup>

Fólk fæðist vissulega með ólík æxlunarfæri – ekki aðeins „karlleg“ eða „kvenleg“ – en kyngervið er ekki meðfætt, það „verður“. Leitt hefur verið í ljós með heilaskönnun að misrétti kynja (félagslegur aðbúnaður) endurspeglast í líffræðilegum og taugafræðilegum viðbögðum.<sup>18</sup> Þannig hefur kyngervi bókstaflega áhrif á heilastarfsemi, líffræðina „sjálfa“. Sagan sýnir að öldum saman var kyngervi transfólks viðurkennt og því fylgdi gjarna mikilvægt menningarlegt hlutverk, allt eftir aðstæðum. Þessar hefðir voru þaggaðar niður eða bannaðar samfara útbreiðslu kristni í kjölfar nýlendustefnu en hafa nú víða fengið aukið rými á ný í kynjapólitík aldarinnar, með kyngervum samtímans.

#### KYNGERVI PRÍMATA?

Til að skilja líffræði kyns í mannheimi þarf að hverfa aftur til upphafs og þróunar lífs á jörðinni. Skyldi vera réttmætt að tala um kyngervi í lífi annarra primata? Verða þeir kynverur eftir fæðingu, með sama hætti og við? Fuentes svarar því ekki beint þótt hann telji að margt megi læra af rannsóknum á skyldmennum okkar. Hann bendir á að „líkamarnir sem við göngum í og samfélögin sem við búum við hafi mótast af



Ljósmynd: Unsplash

prímataarfi okkar ... og þróunarsögu annarra lífvera mannættar,“ og ljóst megi vera af rannsóknum „að félagshegðun prímata og tengsl hafi mótandi áhrif á hvernig þeir túlka líffræði kynja.“ Þegar haft sé í huga hversu djúpt rætur líffræðilegra kynja liggi í sögu mannvera segir Fuentes það ekki vera að furða að líkamar og hegðun, bæði innan og milli tegunda, endurspegli mikinn breytileika. Samanburðinn við þróun mannsins eftir að leiðir skildu með honum og öðrum prímötum veiti skarpa sýn á reynslu og líffræði kynja hjá mönnum nú á tímum. Síðustu fimm til átta þúsund ár festust nútíma kynjahlutverk í sessi hjá tegundinni. Fyrstu merki um þetta sjást í frumstæðu haugfé sem fornleifafraeðingar drógu fram í dagsljósið, misjafnt eftir kven- eða karlkyni þess sem grafinn hafði verið.

Kyngervi verður varla til án einhvers konar orðræðu og máls og margir málfræðingar, með Noam Chomsky í broddi fylkingar, telja að *Homo sapiens* ein tegunda eigi tungumál. Kunnar eru rannsóknir á máltöku simpansans Nim Chimpsky, sem var alinn upp á rannsóknarstofu í Bandaríkjunum og nefndur nokkurn veginn í höfuðið á Chomsky.<sup>18</sup> Reynt var að skera úr um það hvort Chimpsky væri fær um að „tala“ við rannsakendur með aðstoð tákna. Chimpsky lærði fjölda tákna, hermdi eftir en bryddaði ekki upp á samræðum. Svarið við því hvort Chimpsky og önnur tilraunadýr búi yfir „tungumáli“ og „orðræðu“ fer eftir því hvernig við skilgreinum þessi hugtök. Ef kyngervi snýst um hefðir sem tengjast aðskilnaði og samskiptum kynja, má jafnframt gera ráð fyrir kyngervi hjá öðrum prímötum - jafnvel víðar í dýraríkinu.<sup>19</sup> Hugtök á borð við „mál“ og „orðræðu“ eru mannmiðuð, en mikilvægt er að viðurkenna að margar teg-

undir dýra hafa flókna vitsmunalega færni, eins og rannsóknir síðustu aldar sýna.<sup>20</sup>

Á 19. öld varð vísindamönnum sem fengust við líkamsbyggingu *Homo sapiens* ljóst að ytri kynfæri voru margs konar og erfitt var að draga fólk í tvo aðskilda dilka á þeim grunni. Kannski var það einmitt af þessum ástæðum að rannsóknir beindust að kynfrumum, eggjum og sæði. Bateman byggði tvíhyggju sína á traustum, einföldum forsendum, sem virtust skýra margt í mannkynssögunni og festust fljótt í sessi. Síðar var bent á að lífverur af kvísl mannættar þróuðu með sér uppeldishætti sem einkenndust af því að móðirin var aldrei ein. Áhyggjur af afkomu afkvæma hvíldu ekki á herðum mæðranna einna. Náin og flókin samvinna föður og móður í uppeldinu hafði mikla þróunarfræðilega þýðingu, þörun varð mikilvæg og kynlífíð snerist ekki aðeins um getnað. Þessar staðreyndir og endurteknar tilraunir að hætti Batemans settu spurningar við kynjakenningar sem einblíndu á „náttúruval“ kynfrumna karla og kvenna. Líffræðin hefur enga skoðun á því hvað sé usli, en tveggja-flokka kerfið stangast á við allt sem við vitum um þróun og lifnaðarhætti *Homo sapiens* og samræmist ekki nútíma kröfum um mannréttindi.

#### ÞAKKIR

Ég þakka Margréti Rósu Jochumsdóttur, ritstýru, Helgu Kress, Helga Bernódussyni og Merði Árnasyni fyrir afar gagnlegar ábendingar.

## HEIMILDIR

1. Eiríkur Rögnvaldsson 2019. Kynusli. Á vefsvæði höfundar hjá HÍ, slóð (skoðað 25.6. 2025): <https://uni.hi.is/eirikur/2019/10/18/kynusli/>
2. Hinsegin frá Ö til A, slóð (skoðað 25.6.2025): <https://otila.is>
3. Hagstofa Íslands 2025, 12. mars. Íbúar landsins voru 389.444 í byrjun ársins. Frétt á vefsetri Hagstofu Íslands, slóð (skoðað 25.6. 2025): <https://hagstofa.is/utgafur/frettasafn/mannfjoldi/mannfjoldinn-1-januar-2025/>
4. Fausto-Sterling, A. 1993, 12. mars. How Many Sexes Are There? The New York Times. A, 29., slóð: <https://nyti.ms/29dOkrx>
5. Marks, J. 2024. Understanding Human Diversity. Cambridge University Press, Cambridge. Rafbók, aðgangur um slóðina: <https://doi.org/10.1017/9781009534314> (Sjá 7. kafla).
6. Helga Kress 1996. Fyrir dyrum fósturu: Greinar um konur og kynferði í íslenskum fornþókmenntum. Háskóli Íslands, Rannsóknarstofa í kvennafræðum, Reykjavík. 244 bls.
7. Helga Kress 1993. Máttugar meyjar: Íslensk fornþókmenntasaga. Háskólaútgáfan, Reykjavík. 231 bls.
8. Ortner, S.B. 1996. Making Gender: The Politics and Erotics of Culture. Beacon, New York. 261 bls.
9. Davies, S.D. 2007. Challenging Gender Norms: Five Genders among Bugis in Indonesia. Thomson, Belmont.
10. Pengelly, M. 2025, 21. janúar. Trump rolls back trans and gender-identity rights and takes aim at DEI. The Guardian.
11. Uglá Stefanía Kristjónudóttir Jónsdóttir 2025, 21. apríl. Þegar líf fólks er smættað í lagalega skilgreiningu. Heimildin.
12. Martin, E. 1991. The egg and the sperm: How science has constructed a romance based on stereotypical male-female roles. Signs 16(3). 485–501.
13. Fausto-Sterling, A. 2020. Sexing the Body: Gender Politics and the Construction of Sexuality. Basic Books, New York. 608 bls. (Tilv. bls. ix).
14. Ingold, T. og Gísli Pálsson (ritst.) 2013. Biosocial Becomings: Integrating Social and Biological Anthropology. Cambridge University Press, Cambridge.
15. Bateman's Sexual Selection: Another Darwinian Pillar Falls 2012, 18. júní. Evolution News, 2012. Slóð (skoðað 26.6. 2025): [https://evolution-news.org/2012/06/batemans\\_sexual/](https://evolution-news.org/2012/06/batemans_sexual/)
16. Fuentes, A. 2025. Sex is a Spectrum: The Biological Limits of the Binary. Princeton University Press, Princeton. 216 bls. (Tilv. bls. 42, 43, 48 og 50).
17. Rúnar Helgi Vignisson 2024. Þú ringlaði karlmaður: Tilraun til kerfis-uppfærslu. Græna húsið. Garðabær. 243 bls.
18. Gísli Pálsson 2013. Örkin hans Nóa: Nim Chimpsky og við hin. Bls. 129–148 í: Chomsky: Mál, sál og samfélag (ritstj. Höskuldur Þráinsson og Matthew Whelpton). Háskólaútgáfan, Reykjavík.
19. Haraway, D. 2008. When Species Meet. University of Minnesota Press, Minneapolis. 360 bls.
20. von Uexküll, J. 2010/1934. A Foray into the Worlds of Animals and Humans with a Theory of Meaning. Þýð. J.D. O'Neil. University of Minnesota Press, Minneapolis. 248 bls. (þ. Streifzügedurch die Umwelten von Tieren und Menschen: Ein Bilderbuch unsichtbarer Welten)

## HÖFUNDUR

Gísli Pálsson, sem er fyrrverandi prófessor í mannfæði við Háskóla Íslands, lauk doktorsprófi frá Manchester-háskóla árið 1982. Hann hefur einnig starfað við Óslóarháskóla og verið gistingufrófessor víða erlendis. Hann er höfundur bókarinnar *Hans Jónatan: Maðurinn sem stal sjálfum sér* sem þýdd hefur verið á ensku, frönsku og dönsku. Mörg verka hans fjalla um umhverfismál, m.a. *Fuglinn sem gat ekki flogið* (ensk útgáfa *The Last of Its Kind: The Search for the Great Auk and the Discovery of Extinction* (Princeton University Press, 2024), og *The Human Age: How We Created the Anthropocene Epoch and Caused the Climate Crisis* (Welbeck, 2020).

[gipalsson@gmail.com](mailto:gipalsson@gmail.com)



# ÚTGEFENDUR / PUBLISHERS

**Náttúrufræðingurinn** er tímarit Hins íslenska náttúrufræðifélags (HÍN) og Náttúruminjasafns Íslands (NMSÍ). Um er að ræða alþýðlegt fræðslurit þar sem birtar eru greinar um náttúrufræði, jafnt fræðilegar greinar í bland við almennan fróðleik. Margar greinar í ritinu fjalla um rannsóknaniðurstöður á íslenskri náttúru sem eru hvergi birtar annars staðar.

***Náttúrufræðingurinn** is a journal published by the Icelandic Natural History Society (HÍN) and the Icelandic Museum of Natural History (IMNH). It is a popular science publication featuring articles on natural history, combining scholarly contributions with accessible general knowledge. Many of the articles present research findings on Icelandic nature that are not published elsewhere.*

Hið íslenska  
náttúrufræðifélag  
Stofnað 1889



Hið íslenska náttúrufræðifélag (HÍN) var stofnað árið 1889 í þeim tilgangi að efla íslensk náttúruvísindi, glæða áhuga og auka þekkingu manna á öllu sem snertir náttúrufræði. Innganga í félagið er öllum heimil. Með því að gerast félagi HÍN verður þú sjálfkrafa áskrifandi að Náttúrufræðingnum.

Einstaklingsárgjald 6.700 kr.

Hjónaárgjald er 7.500 kr.

Nemendaárgjald 4.600 kr.

Bygggarðar 12, 170 Seltjarnarnes, Iceland – [www.hin.is](http://www.hin.is) / [hin@hin.is](mailto:hin@hin.is)

The Icelandic  
Natural History  
Society

*The Icelandic Natural History Society (HÍN) was founded in 1889 with the aim of promoting natural sciences in Iceland, fostering interest in, and increasing knowledge of all aspects of natural history. Membership is open to everyone. By becoming a member of HÍN, you automatically receive a subscription to Náttúrufræðingurinn.*

*Annual membership fees:*

*Individual membership: ISK 6,700*

*Couple membership: ISK 7,500*

*Student membership ISK 4.600*

Náttúruminjasafn Íslands



Náttúruminjasafn Íslands er eign íslenska ríkisins, höfuðsafn á sviði náttúrufræða og heyrir undir menningar-, nýsköpunar- og háskólaráðuneytið. Náttúruminjasafnið er fræðslu- og vísindastofnun, ætlað að gegna miðlægu hlutverki við miðlun þekkingar og upplýsinga um náttúrufræðileg efni og vera ráðgefandi gagnvart öðrum söfnum landsins sem hafa með náttúruna að gera. Stofnunin byggir starfsemi sína á rannsóknum og gagnaöflun á eigin vegum og í samstarfi við aðra, og á miðlun þekkingar og upplýsinga með staf- og rafrænni útgáfu, ráðgjöf, safnfræðslu og sýningahaldi.

Bygggarðar 12, 170 Seltjarnarnes, Iceland – [www.nmsi.is](http://www.nmsi.is) / [nmsi@nmsi.is](mailto:nmsi@nmsi.is)

The Icelandic Museum of Natural History

*The Icelandic Museum of Natural History is owned by the Icelandic state and serves as the central museum for natural history. It operates under the Ministry of Culture, Innovation and Higher Education. The museum is a research and educational institution, intended to play a central role in the dissemination of knowledge and information on natural history and to act in an advisory capacity to other museums in Iceland that work with natural heritage. Its activities are based on independent research and data collection, as well as collaboration with others, and on the communication of knowledge and information through printed and digital publications, advisory services, lectures, museum education and exhibitions.*

ISSN 0028-0550



9 770028 055009