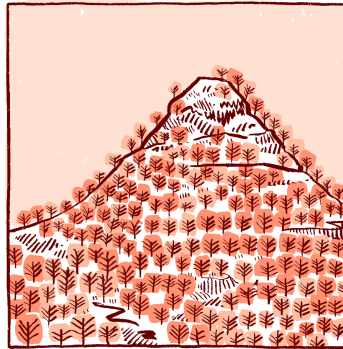


KAFLI

4

LÍFRÍKI LANDS OG LANDNÝTING



Efnisyfirlit kafla

4.1	Breytingar á lífríki	105
4.1.1	Gróðurfar	105
4.1.2	Dýralíf	106
4.1.3	Framandi ágengar tegundir	114
4.1.4	Stýrðar loftslagsrannsóknir á náttúrulegum landvistkerfum	115
	Sérgrein 4A: Náttúruleg vistkerfi og mótvægisáðgerðir	117
4.2	Ræktun á landi	118
4.2.1	Hefðbundinn landbúnaður	118
	Sérgrein 4B: Ræktunarskilyrði í dag og í framtíðinni	121
4.2.2	Garðyrkja	123
4.2.3	Viðbrögð landbúnaðar og garðyrkju við loftslagsbreytingum	123
4.2.4	Skógrækt og landgræðsla	124
4.3	Kolefnishringrás Íslands og mótvægisáðgerðir tengdar landi	128
4.3.1	Kolefnishringrás Íslands	128
4.3.2	Mótvægisáðgerðir tengdar landi	130
4.3.3	Ný þekking á kolefnisforða ofanjarðar	131
4.4	Áhrif loftslagsbreytinga í ferskvatni	132
4.4.1	Vöktun og rannsóknir á lífríki ferskvatns	132
4.4.2	Líffræðilegur fjölbreytileiki - Bleiklax í Norður-Atlantshafi	135
4.4.3	Hlýnun Þingvallavatns - samspil bleikju og urriða	137
4.4.4	Áframhaldandi þróun í stofnstærð laxfiska	142
4.4.5	Nýrnasýking (PKD) – áhyggjuefni hlýnunar	144

Samantekt

1. Ábendingar úr fyrri skýrslum vísindanefndar, um að áhrif loftslagsbreytinga á íslenska náttúru verði ekki umflúin, hafa komið fram. Áhrif loftslagsbreytinga á náttúrufar á Íslandi eru auðsæ og víðfeðm og niðurstöður benda til að þau aukist stöðugt.
2. Loftslagsbreytingar hafa haft talsverð áhrif á útbreiðslu tegunda. Hlýnandi loftslag hefur til dæmis átt þátt í að gera innfluttum skordýrategundum það kleift að ná hér fótfestu og leitt til breytinga á útbreiðslu innlendra tegunda.
3. Hlýnandi loftslag getur haft neikvæð áhrif á tegundir sem hafa aðlagast ákveðnum skilyrðum og eru því viðkvæmar fyrir umhverfisbreytingum.
4. Hlýnandi loftslag mun líklega valda auknum breytingum á gróðurfari landsins eftir miðja öldina, bæði hvað varðar innlendar tegundir og aðfluttar til landbúnaðar, garðræktar og skógræktar.
5. Líklegt er að hlýnunin muni auðvelda fleiri aðfluttum tegundum að dreifast út fyrir ræktunarsvæði sín og nánast er öruggt að einhverjar þeirra reynist ágengar í náttúru landsins. Þróun í annarri landnýtingu, svo sem beit búsmala, mun einnig hafa mikil áhif á þessa þróun.
6. Mikilvægt að hugað sé að skipulagi skógræktarsvæða og að við mat á nýjum svæðum sé tekið tillit til nágrannasvæða þeirra, líffræðilegrar fjölbreytni og möguleika á að aðfluttar tegundir geti dreifst út fyrir ætlað skógræktarsvæði.
7. Horfur eru á að skilyrði fyrir vaðfugla fari versnandi víða hérlendis á komandi áratugum. Þar koma meðal annars við sögu gróðurbreytingar vegna hlýnandi loftslags ásamt áformum um stórauðna ræktun, skóga og orkuplantna, sem mótvægisáðgerð gegn loftslagsbreytingum. Slíkt getur falið í sér umfangsmikið búsvæðatap fyrir vaðfugla. Aukin endurheimt votlendis gæti þó komið vaðfuglum til góða.
8. Auknar öfgar í veðri geta haft neikvæð áhrif á lífslíkur tegunda yfir álagstíma og geta í sumum tilfellum verið meiri áhrifavaldur en breytingar til lengri tíma. Á Íslandi eru til dæmis vísbendingar um neikvæð áhrif veðuröfga á viðkomu rjúpu og fálka.
9. Mikil fjölgun í stofni tófu á undanförunum áratugum hefur verið tengd við hlýnandi loftslag, en á síðastliðnum árum hafa komið fram vísbendingar um minnkandi viðkomu hjá tegundinni á ákveðnum svæðum. Hana má mögulega má rekja til loftlagsdrifinna breytinga á fæðustofnum hennar.
10. Víða erlendis hefur átt sér stað fækkun í hreindýrastofnum sem talin er tengjast loftslagsbreytingum. Neikvæðra áhrifa gætir ekki hjá íslenska hreindýrastofninum, sem er enn sem komið er góð, en lítill erfðabreytileiki gerir það að verkum að hann gæti átt erfitt með að bregðast við umhverfisbreytingum.
11. Fjórar stórar rannsóknir, þar sem hitabreytingum í náttúrulegum kerfum er stýrt, gefa til kynna að áhrif hlýnunar á lífríki mismunandi gróðurlenda og straumvatns geti orðið veruleg ef hlýnun heldur áfram, auk þess sem úrkomubreytingar hafa reynst umtalsverðar.
12. Vísbendingar eru um að hlýnun sjávar eigi þátt í því að hnúðlaxi hefur fjölgað í Norður-Atlantshafi. Til að mynda hefur orðið töluverð aukning í veiði á hnúðlaxi á Íslandi, og enn meira í Noregi þar sem hann er farinn að valda verulegum vandræðum.
13. Ársmeðalhiti Þingvallavatns hefur hækkað um 0,15 °C á áratug. Langtíma vöktun og rannsóknir hafa sýnt breytingar á stofnstærð og lífeðlisfræði bleikjuafbrigða í kjölfar

hlýnunar vatnsins. Stofnstærð murtu hefur hrunið og vaxtarhraði ungvíðis allra fjögurra afbrigða tekið breytingum. Á sama tíma hefur stofnstærð urriða vaxið meðan magn sviflægra þörungna og krabbadýra hefur minnkað.

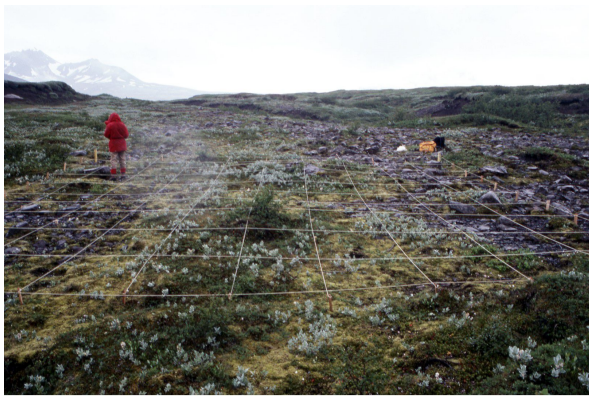
14. Stofnstærðir bleikju eru á undanhaldi í flestum landshlutum á sama tíma og stofnar urriða eru í uppsveiflu og laxastofnar haldast nokkuð jafnir. Sams konar þróun í stofnstærðum þessar þriggja tegunda er að finna í Norður-Noregi. Hlýnun er talin vera líklegur áhrifaþáttur þar sem bleikja er kuldakær tegund og lifir við lægra kjörhitastig en hinar tvær tegundirnar.
15. Smittíðni nýrnasýkingar (PKD) í fiskum hefur aukist á undanförunum árum, bæði í vötnum á láglandi og hálandi og dæmi eru um allt að 97% smittíðni í sumum vötnum. Sýkingin getur valdið afföllum hjá laxfiskum en nær sér ekki á strík nema vatnshiti hafi náð 12-15 °C í einn til þrjá mánuði. Hækkandi vatnshiti í kjölfar hlýnunar loftslags getur því haft töluvert neikvæð áhrif á afkomu laxfiska.
16. Losun gróðurhúsalofttegunda vegna landnotkunar er hlutfallslega mikil af heildarlosun og því mikilvægt að tölur um kolefnisbúskap vistkerfa séu vel undirbyggðar með vönduðum rannsóknum og vöktun.
17. Frekari rannsóknir skortir um losun frá landi og vegna breytinga á landnotkun. Þekking á kolefnisforða íslensks jarðvegs er brotakennd og þarf átak til að bæta þekkingargrunninn.
18. Nautgriparækt (og mjólkurframleiðsla) er loftslagsháð búgrein þar sem hún byggir á hágæða innlendri fóðurframleiðslu. Sauðfjárrækt og hrossarækt eru hinsvegar ekki eins næmar fyrir loftslagsbreytingum, né heldur svína- og kjúklingarækt á meðan innflutningur kjarnfóðurs raskast ekki.
19. Ýmsar umhverfisaðstæður landbúnaðar munu breytast verulega á komandi áratugum. Til að skilja betur hvernig þær munu eiga sér stað er mikilvægt að hermilkön séu lögð að íslenskum aðstæðum og fyrir mismunandi búgreinar.
20. Ekki hefur farið fram almenn úttekt á núverandi og væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á landbúnað, garðyrkju, skógrækt og landgræðslu síðan snemma á þessari öld. Né heldur fjallað skipulega um aðlögun að komandi loftslagsbreytingum innan þessara geira, nema þá helst fyrir skógrækt og kornrækt.
21. Jafnvel þó að úrkoma kunní að aukast með hlýnun þá eykst útgufun einnig og meiri úrkomu þarf til að viðhalda sama rakastigi í jarðvegi og áður. Haldi aukning úrkomu ekki í við uppgufun geta áhrif á ræktun orðið neikvæð. Mikil þörf er á að aðlaga hermilkön að íslenskri jarðrækt til að skoða sameiginleg áhrif hitafars og úrkomu betur.
22. Jafnvel þó að markmið Parísarsamningsins, um að halda hnattrænni hlýnun innan 2 °C, náist munu ræktarskilyrði hér verða gjörbreytt í lok aldarinnar frá því sem nú er.
23. Síðustu ár var hitafar slíkt að rækta mátti korn til skepnufóðurs á stórum hluta láglandis en raungerist hlýrri sviðsmyndir 3 verður hægt að rækta það til mannelis á nær öllu ræktarlandi.
24. Yfirlit yfir kolefnishringrás lands og samfélags er uppfært með nýjustu vísindalegu þekkingu í skýrslunni. Árið 2021 var bein losun manna á CO_2 , sem er mikilvægasta gróðurhúsalofttegundin, um 3,5 milljónir tonna og hafði aukist um 4,5% frá 2015. Enn stefnir því í öfuga átt hvað varðar beina losun CO_2 frá samfélaginu og er það talsvert áhyggjuefni.
25. Ný greining á kolefnisforða vistkerfa alls landsins sýnir að náttúruskógar, skógræktarsvæði, tún og akrar, sem aðeins þekja tæplega 4% landsins bera um 50% af ofanjarðarlífsmassa þess. Annað vel gróið land, mýrlendi, graslendi og mólendi, þekja samtals um 32% landsins og bera 39% af ofanjarðarlífsmassanum.

26. Nýir hvatar sem stjórnvöld hafa komið á eftir 2020 til að hvetja einkageirann til þátttöku í verkefnum, sem snúa að mótvægisáðgerðum gegn loftslagsbreytingum, eru smátt og smátt að auka þunga þeirra. Árleg metin kolefnisbinding (og samdráttur losunar vegna endurheimtar votlendis) hefur aukist um 33% frá 2015.

4.1 Breytingar á lífríki

4.1.1 Gróðurfar

Gróður virðist í framför á öllu landinu og heldur því áfram sama þróun og bent var á í síðustu skýrslum (V2008; V2018). Sú þróun þarf ekki að koma á óvart en, líkt og bent hefur verið á áður, er ekki einhlítt að breytingar megi alfarið tengja við loftslagsbreytingar heldur hefur landnýting og breyting á henni einnig áhrif. Þannig er ályktað í nýlegri skýrslu um gróðurbreytingar í Skaftafelli að meginorsök þeirra umtalsverðu breytinga sem urðu frá mælingum 1985–1987 til 2018 sé friðun lands fyrir sauðfjárbreit eftir þunga nýtingu á síðustu öld, þó að hlýnandi veðurfar sé einnig talið hafa áhrif (Borgþór Magnússon o.fl., 2022b).



Mynd 4.1: Gróðurbreytingar í Skaftafelli. Myndir teknar á reit 35 í vestanverðri Skaftafellsheiði. Mynd vinstra megin: árið 1986 (ljósm: Kristbjörn Egilsson, birt með leyfi) og mynd hægra megin: árið 2018 (ljósm. Rannveig Thoroddsen, birt með leyfi). Sjá nánar í (Borgþór Magnússon o.fl., 2022b).

Í V2008 voru birtar niðurstöður mæligagna frá Reykjavík, allt frá 1988 sem sýndu hvernig hvernig frjótími birkis hafði verið að færast fyrr á vorið á tíunda áratugnum og fram yfir aldamót. Passaði það vel við hlýnunina yfir það tímabil. Í nýrri grein voru þessi gögn endurgreind fyrir tímabilið 1988-2021 (Przedpelska-Wasowicz o.fl., 2021). Þar kom í ljós að þessi leitni til fyrri frjótíma hefur ekki haldið áfram eftir 2006, og aðeins eitt ár (2014) sker sig úr með frjótíma sem hófst í seinni hluta apríl, en það er í fyrsta skipti sem frjótími hefst í þeim mánuði síðan að mælingarnar hófust.

Í síðustu skýrslu (V2018) var sagt frá fjarkönnun á gróskustuðli (e. *NDVI*) en gróska jókst umtalsvert í lok síðustu aldar en á fyrsta áratug þessarar aldar dró úr henni á vissum svæðum þótt önnur sýndu enn aukningu. Samsvarandi rannsókn hefur ekki verið gerð síðan síðasta skýrsla kom út en þó hefur verið sýnt fram á að umtalsverður breytileiki er milli ára (Olafsson og Rousta, 2021). Arktískur hluti Íslands miðað við gróðurkort CAFF (CAVM, 2003; CAFF, 2013) er þó vaktadur, líkt og arktíska svæðið allt, af NOAA og samkvæmt síðustu skýrslu hefur gróska aldrei aukist jafnmikið og undanfarin ár (Frost o.fl., 2021).

Líkt og bent hefur verið á í fyrri skýrslum skortir frekari vöktun á breytingum á gróðurfari landsins. Náttúrufræðistofnun Íslands, í samstarfi við náttúrustofur, hefur nýverið hafið vöktun á vistgerðum landsins sem hluta af verkefninu *Vöktun náttúruverndarsvæða* (Náttúrufræði-

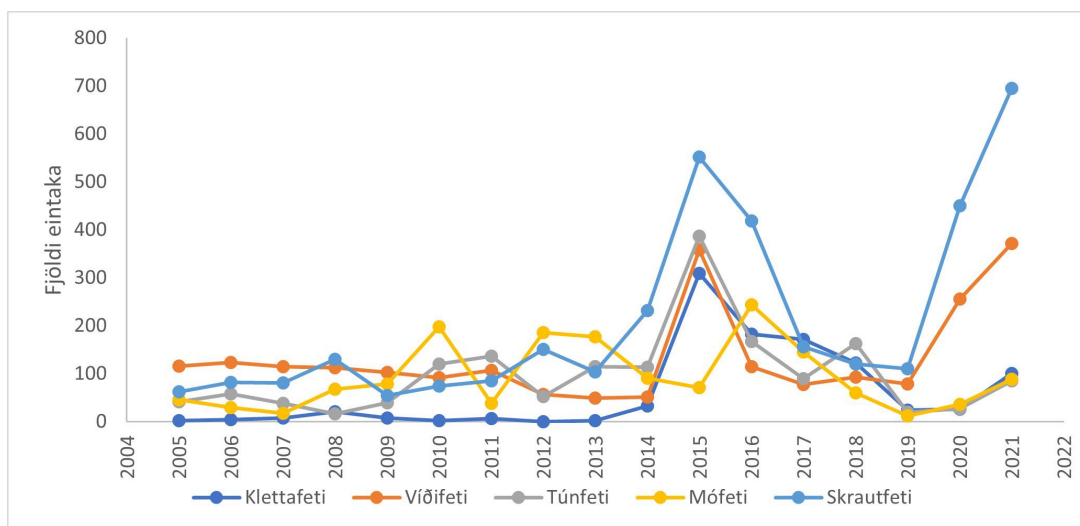
stofnun Íslands, 2023b). Meðal annars er áhersla á vöktun rústamýrarvistar sem viðkvæm er fyrir loftslagsbreytingum. Þannig voru endurteknar mælingar á 20 ára gömlum sniðum í Guðlaugstungum og Orravatsnústum. Fleiri verkefni vakta breytingar á gróðurfari eins og Hagaverkefnið sem var til umfjöllunar í síðustu skýrslu (V2018). Síðan 2008 hefur tindagróður við Öxnadal verið vaktadur innan fjölþjóðlega verkefnisins GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpina Environments*) en verkefnið felur í sér að á fjórum tindum, 540-1200 m yfir sjávarmáli, eru afmarkaðir fastir reitir og voru þeir endurmetnir 2021 en ekki hefur verið gerð grein fyrir niðurstöðum enn. Fylgst hefur verið með framvindu gróðurs á jökulskerjum í Breiðamerkurjökli síðan 1965 og hafa miklar breytingar átt sér stað þó að erfitt geti reynst að greina milli náttúrulegrar framvindu gróðurs og áhrifa loftslagsbreytinga, þótt tilkoma nýrra jökulskerja sé afleiðing hlýnunar.

4.1.2 Dýralíf

Útbreiðsla dýra stjórnast að miklu leyti af veðurfari, m.a. í gegnum búsvæðaval og fæðuframboð en einnig lífeðlisfræðilegar aðlaganir að t.d. hitastigi og raka. Með hlýnandi loftslagi munu einhverjar tegundir geta aðlagast þeim breyttu aðstæðum sem slíkt hefur í för með sér á meðan aðrar munu hörfa með breytingum og mögulegum samdrætti á útbreiðslu þeirra og stofnstærð.

4.1.2.1 Smádýr

Áhrif loftslagsbreytinga á smádýr birtast oft við breytingar á gróðurfari enda lifa flestar tegundir smádýra á gróðri eða öðrum tegundum sem eru háðar gróðri. Hingað berast stöðugt smádýr frá öðrum löndum, t.d. með plöntum, plöntuafurðum og gróðurmold. Þó að færast af þeim innfluttu tegundum sem hér hafa fundist eigi möguleika á að lifa af veturinn, þá hefur færst í aukana að þær nái fóttfestu 2013.

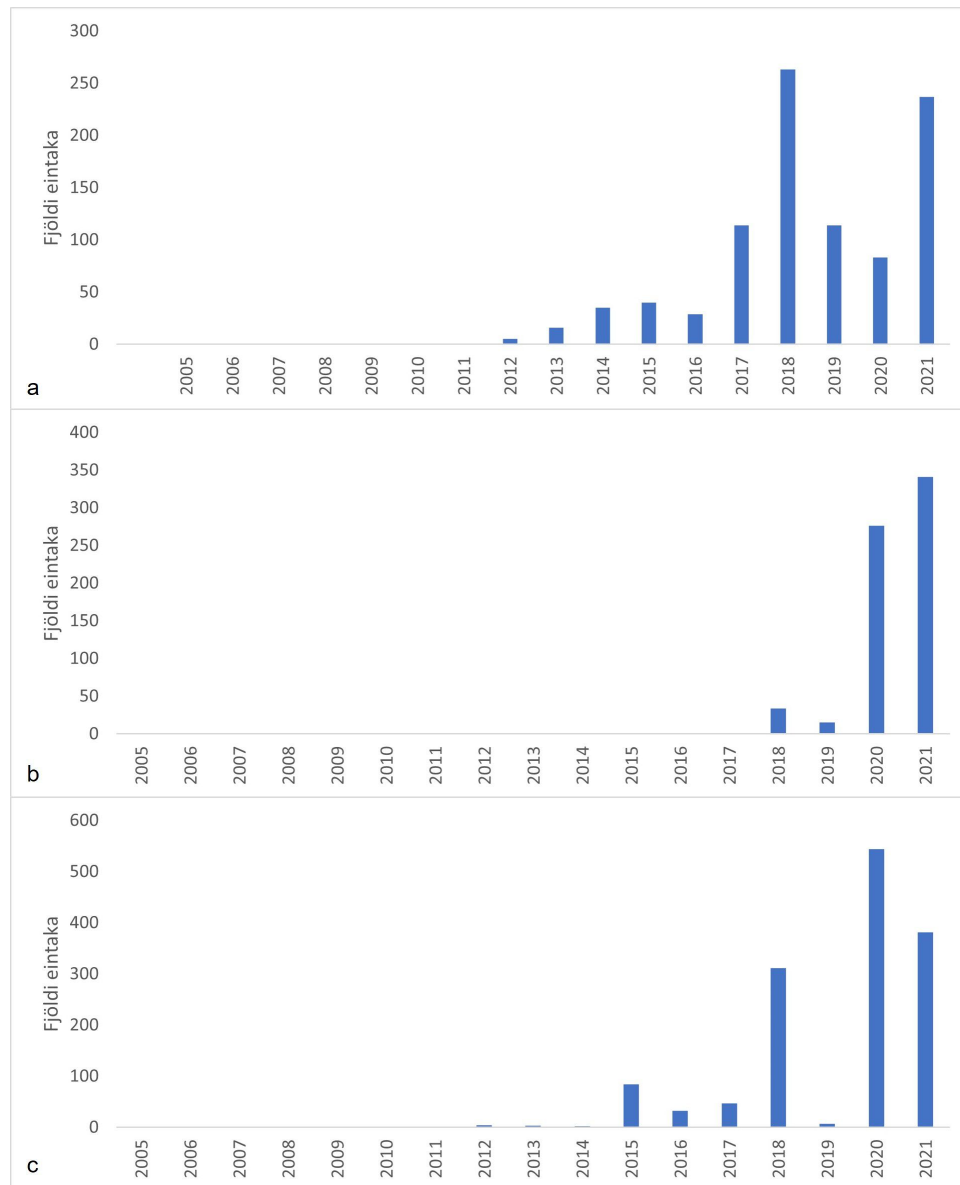


Mynd 4.2: Heildarveiði klettafeta (*Entephria caesiata*), víðifeta (*Hydriomena furcata*), túnfeta (*Xanthorhoe decoloraria*), mófeta (*Eupithecia satyrata*) og skrautfeta (*Dysstroma citrata*) úr ljósgildrum að Mógilsá í Kollafirði frá 2005 - 2021. (ljósm. Matthías S. Alfreðsson, birt með leyfi)

Telja má líklegt að mildari vetur og aukin ræktun á framandi tegundum auðveldi mörgum þeirra að lifa af og finna hentugar fæðuplöntur. Hlýnandi loftslag á síðustu áratugum hefur einnig leitt til breytinga á dreifingu og stofnum gamalgróinna tegunda, m.a. ýmissa skaðvalda á gróðri (sjá nánar í grein 4.2.4.2 og grein Guðmundar Halldórssonar o.fl.(2013)). Náttúrufræðistofnun Íslands hefur staðið fyrir vöktun fiðrilda frá árinu 1995 sjá myndir (Náttúrufræðistofnun Íslands,

2023e, sjá myndir 4.2 og 4.3). Fyrst um sinn voru rannsóknarsvæðin tvö, Tumastaðir í Fljótshlíð og Kvísker í Örfum, en í dag eru, í samstarfi við náttúrustofur landsins og Landbúnaðarháskóla Íslands á Hvanneyri, alls 19 vöktunarstaðir í öllum landshlutum. Notast er við sjálfvirkar ljósgildrur sem laða að náttförlu fiðrildi og fer söfnun fram frá miðjum apríl fram undir miðjan nóvember ár hvert. Fiðrildavöktun er góð leið til að vakta stofnbreytingar innlendra tegunda og til þess að fylgjast með nýjum landnemum og flækingsfiðrildum sem berast til landsins árlega. Fiðrildi henta einnig sem vísir fyrir gróðurfarsbreytingar því þau eru upp til hópa plöntuætur og sumar tegundir eru mjög sérhæfðar í fæðuvali. Úrvinnslu gagna er ekki lokið en breytingar hafa orðið á stofnum nokkurra tegunda (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022). Síðustu ár hefur orðið mikil aukning hjá ýmsum tegundum af fetafiðrildaætt (*Geometridae*) og sama má segja um barrvefara af veffiðrildaætt (*Tortricidae*) en sú tegund fannst fyrst í Hallormsstaðaskógi 1992, því næst í Fljótshlíð árið 1997 og er núna eitt algengasta fiðrildi landsins (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d).

Hingað hafa borist ýmsar tegundir, bæði af sjálfsdáðum en einnig aðrar sem útilokað er að hafi borist á annan hátt en með innflutningi. Nýlega hafa fundist þrjár nýjar tegundir í ljósgildrum á Mógilsá í Kollafirði. Birkikemba (*Heringocrania unimaculella*) er mikill skaðvaldur á birki og fannst tegundin fyrst í Hveragerði 2005. Árið 2012 kemur hún fyrst í gildru á Mógilsá og hefur henni fjölgað hratt síðan þá. Grenivefari (*Epinotia tedella*) er ný tegund sem hefur aðeins fundist á Mógilsá, fyrst árið 2012. Hér er um að ræða tegund sem verpir í rekla grenitrjáa (*Picea*). Birkiglitmölur (*Argyresthia goedartella*) er þriðja tegundin, hún verpir eggjum sínum í brum birkis (*Betula*) og elris (*Alnus*) og fannst fyrst á Mógilsá 2011. Einnig hefur nýlega numið hér land vorflugutegundin *Micropterna sequax*. Hún fannst fyrst á Mógilsá 2008 en hefur síðan fundist á tveimur stöðum til viðbótar, í Kjós og á Hvanneyri (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022; Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d).



Mynd 4.3: Heildarveiði þriggja fiðrildategunda úr ljósgildrum að Mógilsá í Kollafirði a) Birkikemba, b) Grenivefari, c) Birkiglítmölur. (ljósm. Matthías S. Alfredsson, birt með leyfi)

Einnig hefur orðið vart við breytingar hjá gamalgrónum fiðrildategundum á borð við ertuyglu (*Ceramica pisi*) og skógbursta (*Orgyia antiqua*). Lengi vel var ertuygla sjaldgæf tegund á suðurluta landsins en nú hefur henni fjölgað mikið á Suðurlandi og hefur hún verið að útvíkka útbreiðslusvæði sitt til norðurs og má það að öllum líkindum rekja til hlýnandi loftslags og aukinnar útbreiðslu lúpínu (Brynja Hrafnkelsdóttir o.fl., 2019a). Tegundin er mikill skaðvaldur á ýmsum plöntutegundum en lirfurnar kjósa helst tegundir af ertublómaætt. Skógbursti er önnur tegund sem var afar fágæt og fannst helst í Fljótshlíðinni og undir Eyjafjöllum. Nú hefur tegundin breiðst hratt um sveitir Suðurlands og hefur stækkað útbreiðslusvæði sitt til vesturs. Skógbursti er fjölhæfur í fæðuvali og leggst á ýmsar jurtkenndar plöntur á borð við mjadurt (*Filipendula ulmaria*), ljónslappa (*Alchemilla alpina*), kornsúru (*Bistorta vivipara*) sem og trjákenndar plöntur líkt og víði (*Salix*) (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d). Fjöldmörg dæmi eru um breytingar hjá öðrum hópum smádyra á síðustu árum. Lúsmý (*Culicoides reconditus*) blossaði upp í Kjós 2015 og hefur á skömmum tíma dreift sér víða um land. Lyngbobbi (*Arianta arbustorum*) er kuðungasnigill sem fannst fyrst 1995 í Reykjavík og á síðustu árum hefur tegundinni fjölgað gífurlega og, einkum á suðvesturhorni landsins. Varmasmiður (*Carabus*

nemoralis) er stórvaxin bjalla sem líklega hefur borist til landsins með innfluttum garðyrkjuvörum. Árið 1999 birtist hann í Hveragerði og fannst af og til í görðum í Reykjavík. Tegundinni fjölgaði hratt á Suðvesturlandi í kjölfarið og hefur hún aukið verulega landnámsgæði sitt. Nýjasti fundarstaðurinn er Vík í Mýrdal. Asparglytta (*Pteronotaria polaris*) er einnig dæmi um tegund sem hefur borist til landsins á seinni árum, að öllum líkindum með innfluttum plöntum. Tegundin er mikill skaðvaldur á víðitegundum (*Salix*) og öspum (*Populus*) og hefur fjölgað óheyrilega á síðustu árum og dreifingin verið hröð. Akurhumla (*Bombus pratorum*) fannst fyrst 2010 á Eskifirði og var það eini fundarstaðurinn um árabíl.

Heyrst hefur af henni á Reyðarfirði en 2021 var nýr fundarstaður staðfestur á Egilsstöðum. Fíflalús (*Uroleucon taraxaci*) er nýlegur landnemi og eru fyrstu eintök Náttúrufræðistofnunar eru frá 2007. Síðan þá hefur tegundin dreifst um allt land og fjölgað gífurlega. Randakönguló (*Tetragnatha extensa*) var lengi vel staðbundin á nokkrum stöðum á landinu en á síðustu árum hefur tegundin fundist í auknum mæli víða á Suðvestur- og Suðurlandi (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022; Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d). Starfsfólk Náttúrufræðistofnunar og Tilraunastöðvarinnar að Keldum hefur safnað Skógarmítli (*Ixodes ricinus*) síðan 1976. Fjöldi tilfella hefur farið vaxandi upp úr aldamótum (Richter o.fl., 2013) og árið 2015 hófst mark-



Mynd 4.4: Skógarmítill að athafna sig á húð. (ljósm. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

viss vöktun á tegundinni hérlendis (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023c). Í Evrópu hefur orðið fjölgun hjá tegundinni og útbreiðslusvæði hennar til norðurs stækkað (Gray o.fl., 2009). Hingað til lands berast skógarmítlar með farfuglum á vorin og haustin og detta af þeim víða um land. Enn sem komið er hefur landnám skógarmítils ekki verið staðfest hérlendis en komið hefur í ljós að skógarmítill getur lifað af veturinn. Með mildari vetrum, aukinni skógrækt og fjölgun kanína má telja að auknar líkur séu á því að staðbundnir stofnar nái hér fótfestu. Full ástæða er til að fylgjast vel með dreifingu skógarmítils því tegundin getur borið með sér sjúkdómsvaldandi sýkla (Alfreðsson o.fl., 2017).

Fleiri dæmi mætti tína til um breytingar á smádyralífi landsins á seinni árum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022). Ljóst er að töluverðar breytingar eru að verða og hafa orðið hjá mörgum tegundum smádyra, ekki síst í byggð. Margar af þessum tegundum eru skaðvaldar á gróðri og má vænta þess að breytingar á loftslagi kunni að leiða til aukinna áhrifa af völdum þeirra (sjá nánari umfjöllun í grein 4.2.4.2).

4.1.2.2 Fuglar

Varpfuglar á Íslandi eru um 75 og reglulegir far-, sumar- og vetrargestir eru um 20 (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023a). Ísland ber alþjóðlega ábyrgð á fjölda fuglategunda en til ábyrgðartegunda teljast þeir fuglar þar sem um 20% af Evrópustofni viðkomandi tegundar nýtir Ísland til varps eða kemur hér við á ferðum sínum. Þessum hópi tilheyrir m.a. stór hluti sjófuglategunda og megnið af þeim vaðfuglategundum sem hér verpa. Auk geirfuglsins, sem er útdauður á heimsvísu, hafa þrjár fuglategundir orðið útdauðar hér á landi: gráspör, keldusvín og haftyrdill (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2018). Í tilfelli haftyrdils, sem er hánorræn tegund,

Þá tengist útdauði hans hérlendis mögulega hlýnun. Á sama tíma virðist hafa orðið aukning á fjölda tegunda sem nema hér land (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022). Það gæti tengst hlýnun, sérstaklega mildari vetrum, en einnig aukningu á skóglendi (Jóhann Óli Hilmarsson, 2002). Í síðustu skýrslu (V2018) kom fram að vandasamt væri að spá fyrir um áhrif loftslagsbreytinga á íslenska fugla nema með almennum hætti þar sem rannsóknir skortir á vistfræðilegum ferlum og öðrum áhrifaþáttum. Mátti þar nefna gróðurfarsbreytingar og breytta landnotkun sem oft er hægt að rekja til veðurfarsbreytinga, t.d. í landbúnaði og skógrækt. Þrátt fyrir að enn skorti heildrænar rannsóknir á vistfræðilegum ferlum, svo sem á tengslum fuglastofna við fæðustofna, þá hefur þekkingu á áhrifum gróðurfarsbreytinga og breyttri landnotkun á vaðfugla fleygt fram á síðustu árum (sjá yfirlit í Tómas Gunnarsson (2020)). Í fyrri skýrslu var einnig fjallað um rannsóknir á komutíma farfugla en í Evrópu hafa margar tegundir farfugla flýtt komu sinni á varpstöðvar í takt við hlýnandi loftslag og þeim tegundum sem hafa síður flýtt komu sinni fækkar hraðar en hinum. Hjá þeim tegundum sem eru ófærar um að laga sig að breyttum skilyrðum vegna hlýnunar getur myndast misræmi milli vistfræðilegra þátta (*e. ecological mismatch*) (Saino o.fl., 2011). Dæmi um slíkt misræmi milli atburða er tímasetning varps með tilliti til fæðuframboðs. Komutími íslenskra farfugla hefur lítt verið kannaður en gögn frá Uppsveitum Árnassýslu sýna þó að margar tegundir hafi flýtt komu sinni og að þær breytingar tengjast hitastigi (Tómas G. Gunnarsson og Gunnar Tómasson, 2011).

Vaðfuglastofnar á Íslandi eru gríðarstórir sem skýrist af miklu framboði af opnum búsvæðum sem allar tegundirnar, utan hrossagauks, eru háðar. Blikur eru þó á lofti að tekið sé að þrengja að búsvæðum þeirra víða vegna hlýnunar og breyttrar landnotkunar Tómas Gunnarsson (2020). Reglubundin vöktun á vaðfuglum er skammt á veg komin hérlendis en hófst þó á fáeinum stöðum eftir aldamótin síðustu og benda niðurstöður af talningasvæðum á Vestur- og Suðurlandi til þess að þar sé fækkun að eiga sér stað hjá nokkrum tegundum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023f; Lilja Jóhannesdóttir o.fl., án árs). Nýlega var umfang vaðfuglavöktunar stóraukið í tengslum við verkefnið *Vöktun náttúruverndarsvæða* og fara nú talningar fram í öllum landshlutum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023b).



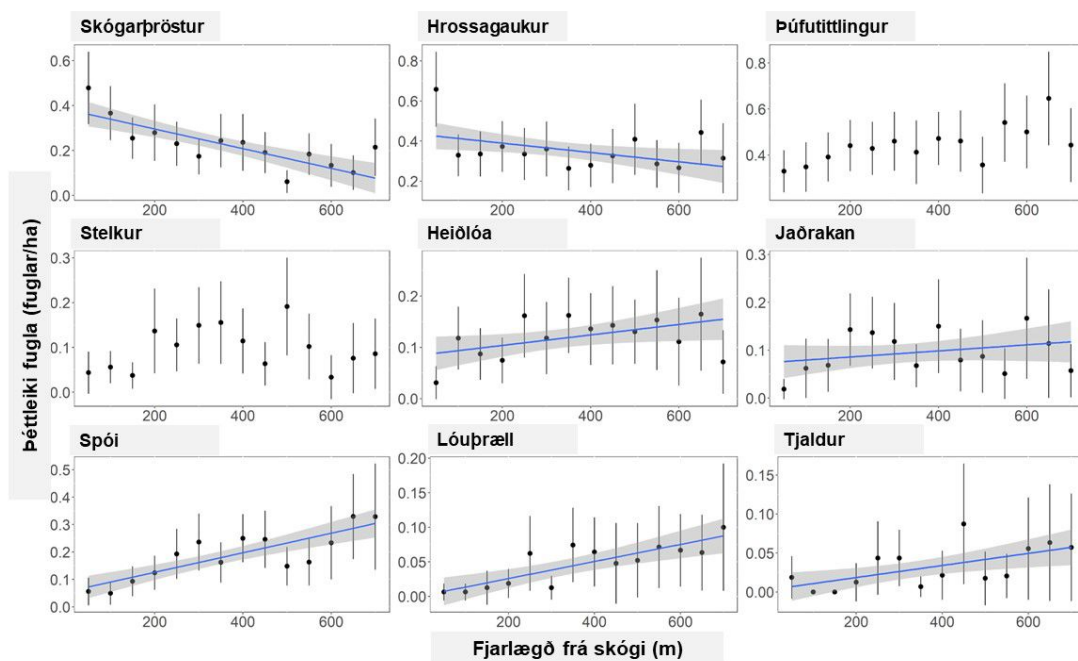
Mynd 4.5: Spói, einn af einkennisfuglum þurrlendis á Íslandi. (Ljós. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

Gróska hefur aukist mikið á Íslandi síðustu áratugi, sem að öllum líkindum má rekja til hækkandi hitastigs en tengist einnig samdrætti í sauðfjárbreit auk átaks í landgræðslu og skógrækt (Raynolds o.fl., 2015). Í nýlegri meistararitgerð voru breytingar á runnagróðri á Suðurlandi skoðaðar og leiddu þær í ljós að afar hröð aukning á runnagróðri hafði átt sér stað milli árána 2001 og 2018. Þessi mikla aukning tengist líklega samverkandi þáttum hlýnunar og minnkandi sauðfjárbeitar. Í sömu rannsókn voru áhrif runnagróðurs á vaðfugla könnuð á árunum 2017-2018. Rannsóknin leiddi í ljós að þéttleiki fjögurra tegunda, þ.e. tjalds, heiðlóu, spóa og stelks, var minni þar sem var áberandi runnagróður.

Enn fremur var sýnt fram á neikvætt samband á milli hæðar runna og þéttleika fyrir þrjár

tegundir: lóupræl, jaðrakan og heiðlóu (Sigurður Björn Alfreðsson, 2018) Vaðfuglar, utan hrossagauks, þrífast ekki í skóglendi (T. Gunnarsson o.fl., 2006) en í nýútkominni grein er sýnt fram á að flestar vaðfuglategundir forðast einnig skógarjaðarinn sem lýsir sér þannig að þéttleiki þeirra er minni nær skóglendi en fjær og gætir þessara áhrifa í töluverðri fjarlægð frá skógum . Fyrir fimm tegundir af sjö, þ.e. heiðlóu, spóa, tjald, lóupræl og jaðrakan, reyndist þéttleikinn innan 200 m frá skógræktarsvæðum vera um helmingur þess sem hann var fjær. Þéttleiki stelks var minnstur innan 150 m frá skógræktarreitum og einungis þéttleiki hrossagauks var meiri næst skógi. Þéttleiki heiðlóu, spóa og hrossagauks var lægri í grennd við hæstu skógana (>10 m á hæð) samanborið við 2-5 m háa skóga. Stærð skógarreita hafði ekki áhrif, þ.e. þéttleiki minnkaði jafnt við litla skógarreiti sem stóra. Skógrækt getur því falið í sér umfangsmikið búsvæðatap fyrir vaðfugla og áætlað að nú þegar hafi búsvæði tugþúsunda vaðfugla tapast undir skógræktarsvæði (Pálsdóttir o.fl., 2022).

Það má því ætla að skilyrði fyrir vaðfugla hafi og muni fara versnandi víða á láglandi og eru áætlanir um stórauðna skógrækt til kolefnisbindingar sem og stórfelld ræktun orkuplantna meðal þeirra þátta sem vaðfuglastofnum stafar ógn af (sjá nánar sérgrein 4A auk Pálsdóttir o.fl. (2022) og Tómas Gunnarsson (2020)). Endurheimt votlendis sem loftslagsaðgerð gæti þó komið vaðfuglum til góða Tómas Gunnarsson (2020).



Mynd 4.6: Þéttleiki mófugla (fuglar á hektara) í vaxandi fjarlægð frá skógum. Þar sem leitnilínan er gráskyggð er sambandið tölfræðilega marktækt. (Aðlagð frá (Pálsdóttir o.fl., 2022)).

Nokkrar rannsóknir hafa tengt lýðfræði fugla við veðurfar og í síðustu skýrslu (V2018) var t.d. fjallað um tengsl varpárangurs við hitastig hjá grágæs (Helgi Guðjónsson o.fl., án árs) og jaðrakan (Tómas Grétar Gunnarsson o.fl., 2017). Rannsóknir hafa einnig sýnt tengsl lýðfræði rjúpu og fálka við veðurfar. Báðar tegundir eru norrænar með útbreiðslu umhverfis pólinn. Fálki er sérhæfður afræningi á rjúpu og eru stofnbreytingar tegundanna tengdar sem lýsir sér þannig að fálkastofninn er í hámarki um tveimur árum eftir hámark rjúpnastofnsins (Ólafur K. Nielsen, 1999; Frédéric og Ó. K. Nielsen, 2018). Fálkar hefja undirbúning varps í mars/apríl en þá hættir kvenfuglinn veiðum og er algjörlega háð karlfuglinum um æti. Á þessum tíma safnar kvenfuglinn forða fyrir varptímamann en karlfuglinn færir henni eingöngu rjúpur (Ólafur K. Nielsen, 1999; Ólafur K. Nielsen, 2003). Veiði karlfuglsins er háð stærð rjúpnastofnsins og tíðarfari, ef kvenfuglinn fær ekki nóg að éta á þessu skeiði verður ekki úr varpi það árið

(Ólafur K. Nielsen, 2011). Rjúpan er lykiltegund í fæðuvef þjurrlandis á Íslandi, auk þess að vera mikilvæg bráð sportveiðimanna. Rjúpnastofninn sveiflast með nokkuð reglubundnum hætti en umskipti hafa orðið á síðustu áratugum. Á sumum svæðum hefur orðið langtímafækkun rjúpna (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2018) en einnig hafa stofnbreytingarnar frá því um aldamót verið mun örari en áður (Jenný Brynjarsdóttir o.fl., 2003; Fuglei o.fl., 2020; Ferrarini, 2022). Rjúpan er flokkuð sem tegund í yfirvofandi hættu á valista fugla (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2018).

Sveiflutíðnin hefur breyst og eru nú um fimm ár á milli toppa á Norðausturlandi en voru áður 10-12 ár (Jenný Brynjarsdóttir o.fl., 2003; Fuglei o.fl., 2020; Ferrarini, 2022). Til eru langar tímaraddir um lifun rjúpna. Sýnt hefur verið fram á marktæk tengsl milli viðkomu rjúpunnar og veðurfarsþátta, þ.e. úrkomu og meðalvindhraða í júlí (yfir unगतímam). Rjúpum vegnar þannig verr ef það er vinda- eða úrkomusamt á þessum tíma og ef þessir þættir fara saman þá magnast áhrifin (Ólafur K Nielsen o.fl., 2004). Frá upphafi mælinga hafa komið nokkur ár þar sem viðkoma hefur verið sérstaklega slök og hefur verið hægt að rekja það til harðra hreta á unगतíma (Gardarsson, 1988; Ólafur K Nielsen o.fl., 2004; Ólafur K Nielsen, 2023). Líkamsástand rjúpu er mælt á haustin en það endurspeglar aðstæður mánuðina á undan og tengist grænkun úthaga að vori. Marktæk tengsl eru milli affalla og líkamsástands, þ.e. afföll ungfugla yfir veturinn og fram á vor eru meiri þegar fuglarnir eru litlir og grannir (Ólafur K. Nielsen og Guðmundur A. Guðmundsson, 2020). Að ofangreindu má sjá að frjósemi fálka tengist rjúpnastofninum og veðurfarsþáttum og að veðurfar hefur einnig áhrif á viðkomu og afföll hjá rjúpum. Auknar veðuröfgar á ákveðnum tímum árs gætu haft áhrif á stofna tegundanna og samspilið þeirra á milli. Umfjöllun um sjófugla er að finna í kafla 5.



Mynd 4.7: Rjúpukarri. (Ljósmynd Erling Ólafsson, birt með leyfi).

4.1.2.3 Spendýr

Fáar tegundir landspendýra lifa villtar á Íslandi og er tófan eina tegundin sem telst upprunaleg hérlendis á meðan aðrar hafa borist hingað fyrir tilstilli mannsins. Tófa eða heimskautarefur er hánorræn refategund sem hefur verið skilgreind sem svokölluð flaggskipstegund (*e. flagship species*) í rannsóknum á áhrifum hlýnunar á lífríki á norðurslóðum (Foden og Stuart, 2009) og býður landfræðileg einangrun og vistfræði tegundarinnar hér landi upp á mikilvægar sam- burðarrannsóknir. Mikill vöxtur var í stofninum á árunum 1980-2008 sem tengdur hefur verið vexti bráðarstofna, sérstaklega heiðagæsar, og hlýnandi loftslagi (Pálsson o.fl., 2016).

Víða á útbreiðslusvæði heimskautarefsins hefur hlýnun haft í för með sér ýmsar ógnir fyrir tegundina og má þar helst nefna aukna samkeppni við rauðref og neikvæð áhrif hlýnunar á læmingjasveiflur (Fuglei og Anker Ims, 2008). Í kjölfar fjölgunarskeiðs tófunnar varð óútskýrð fækkun í íslenska stofninum en hann hefur síðan rétt aftur úr kútnum og virðist stöðugur um þessar mundir (Unnsteinsdóttir, 2021). Á Hornströndum hafa tófur verið friðaðar um árabil. Þar hefur stofninn verið stöðugur en á undanförunum árum hefur þó hlutfall ódala í ábúð lækkað

og gotum fækkað sem getur bent til minnkandi fæðuframboðs (Unnsteinsdóttir, 2021; Ester Rut Unnsteinsdóttir, 2023). Vitað er að mikil hnignun hefur átt sér stað í bjargfuglastofnum, sem er meginfæða refa á vesturhluta landsins, og má líklega rekja hana til áhrifa loftslagsbreytinga á vistkerfi sjávar (sjá kafla 5).



Mynd 4.8: Forvitnir yrðlingar á greni. (Ljósm. Ester Rut Unnsteinsdóttir, birt með leyfi).

vel sem vísitengund loftslagsbreytinga auk þess sem hún er lykiltegund sem fæða fyrir ýmis rándýr. Haustið 2023 munu náttúrustofur víða um land hefja vöktun á hagamúsum undir umsjón Náttúrufræðistofnunar Íslands í tengslum við áður nefnda vöktun náttúruverndarsvæða (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023b). Hreindýr voru flutt til Íslands við lok 18. aldar en náttúruleg heimkynni þeirra eru umhverfis Norðurheimskautið. Hreindýr hafa frá upphafi gengið villt á Íslandi og eru þau bundin við Austurland og ganga í Austfjarðardölum frá Breiðamerkurhlóni norður að Bakkaflóa sem og á hásléttu Austurlands. Íslenska stofninum er stjórnað með veiðum enda eru hér engin rándýr sem leggjast á hreindýr (Skarphéðinn G. Þórisson, 2004).

Veiðar fara fram á öllu Austurlandi nema í Kringilsárrana (Skarphéðinn G. Þórisson o.fl., 2022) og er mikil ásókn í veiðileyfi sem Umhverfisstofnun úthlutar árlega.

Víða erlendis hefur átt sér stað fækkun í stofnum hreindýra sem er talin tengjast loftslagsbreytingum og er því spáð að áframhaldandi hlýnun muni hafa margvíslegar afleiðingar fyrir tegundina. Möguleg áhrif eru þó breytileg eftir staðbundnum aðstæðum og lífsháttum undirtegunda (Mallory og Boyce, 2018) og hér að neðan verða taldir upp helstu þættir sem munu hafa áhrif á íslenska stofninn.

Í sumarhögum getur hækandi hitastig leitt til lengri vaxtartíma plantna sem kann að hafa

Hagamúsin barst til Íslands með mönnum og er hér á útmörkum útbreiðslu sinnar til norðurs og vesturs. Sýnt hefur verið fram á að stofnstærð að hausti stjórnast af veðurfari snemma vetrar árið á undan, þ.e. milt tíðarfar á þeim tíma gerir músunum auðveldara að lifa af veturinn (Unnsteinsdóttir og Hersteinsson, 2009). Hækandi hitastig gæti því hafa leitt til hagstæðari skilyrða fyrir hagamús hér á landi, m.a. með breytingum á gróðurfari en þéttleiki hagamúsa er meiri í laufskógum en á opnum svæðum með lággróðri (Unnsteinsdóttir og Hersteinsson, 2009) og aukið skóg- og kjarrlendi skapa þeim kjöraðstæður. Hagamús hentar



Mynd 4.9: Hreindýr. (Ljósm. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

jákvæð áhrif á líkamsástand og viðkomu hreindýra. Samkeppni við aðrar tegundir (t.d. heiðagæs) í sumarhögum getur aukist, sem og tíðni ýmissa sníkjudýra og sjúkdóma (Mallory og Boyce, 2018; Skarphédinn G Þórisson, 2018). Má þar nefna að skógarmítill (*Ixodes ricinus*) hefur fundist á hreindýri og með hækkandi hita eykst hættan á því að staðbundnir stofnar mítla náí hér fótfestu (Alfredsson o.fl., 2017). Annað dæmi sem mögulega má rekja til hlýnandi loftslags er að árið 2016 varð í fyrsta skipti vart við orfsýkingu sem kom upp á einu veiðisvæðanna og sýkti þar júgur hjá stórum hluta kvendýra (Skarphédinn G. Þórisson og Rán Þórarinsdóttir, 2017). Enn sem komið er hér ekki að finna moskítóflugur eða sníkjuflugur af ættinni Oestridae (svokallaðar brimsur) en þekkt er að álag af þeirra völdum getur haft slæm áhrif á líkamsástand hreindýra og hækkandi hita getur fylgt meira áreiti af völdum þessara skordýra. Að vetri til getur komið til aukinnar tíðni áfrera (*e. rain on snow*) sem takmarka beit og geta leitt til vannæringar og jafnvel sveltis (Mallory og Boyce, 2018; Skarphédinn G Þórisson, 2018). Sem stendur er staða íslenska hreindýrastofnsins góð en ljóst er að erfðabreytileiki stofnsins er lítill (Roed o.fl., 1985) og gæti hann því átt erfitt með að bregðast við umhverfisbreytingum sem fylgja munu hlýnun (Skarphédinn G Þórisson, 2018).

4.1.3 Framandi ágengar tegundir

Með hlýnandi loftslagi breytast aðstæður á landinu og geta þær breytingar bætt lífsskilyrði ýmissa tegunda sem lengstum 20. aldarinnar áttu í erfiðleikum með að ná fótfestu. Líkt og bent var á í fyrri skýrslu (V2018) þá benda rannsóknir til þess að ýmsar framandi tegundir sem þegar hafa orðið ílendar (þ.e. með bólfestu) muni dreifa sér víðar og jafnvel falla í flokk framandi ágengra tegunda. Framandi ágengar (*e. invasive alien*) nefnast þær tegundir sem eru framandi (aðfluttar af manna völdum) í viðkomandi vistkerfi og sýna mikla eða hraða útbreiðsluaukningu af eigin rammleik, valda eða eru líklegar til að valda minnkun líffræðilegrar fjölbreytni, efnahagslegu eða umhverfislegu tjóni eða eru skaðlegar heilsu manna. Meðan Ísland hefur tiltölulega strangar reglur er varða innflutning dýra, einkum með hliðsjón af sjúkdómahættu, þá eru reglur um innflutning plantna mun opnari. Þannig má flytja inn ýmsar garðplöntur í gróðurmold (Landbúnaðarráðuneytið, 1990, með síðari breytingum) að uppfylltum ákveðnum skilyrðum eins og að með fylgi vottorð um heilbrigði plöntunnar. Slíkur flutningur á mold milli landa eykur umtalsvert hættuna á að með þeim berist skaðvaldar og bent hefur verið á að bent á að slíkur innflutningur sé líkleg orsök vargshnigils á Íslandi (Erling Ólafsson, 2022).

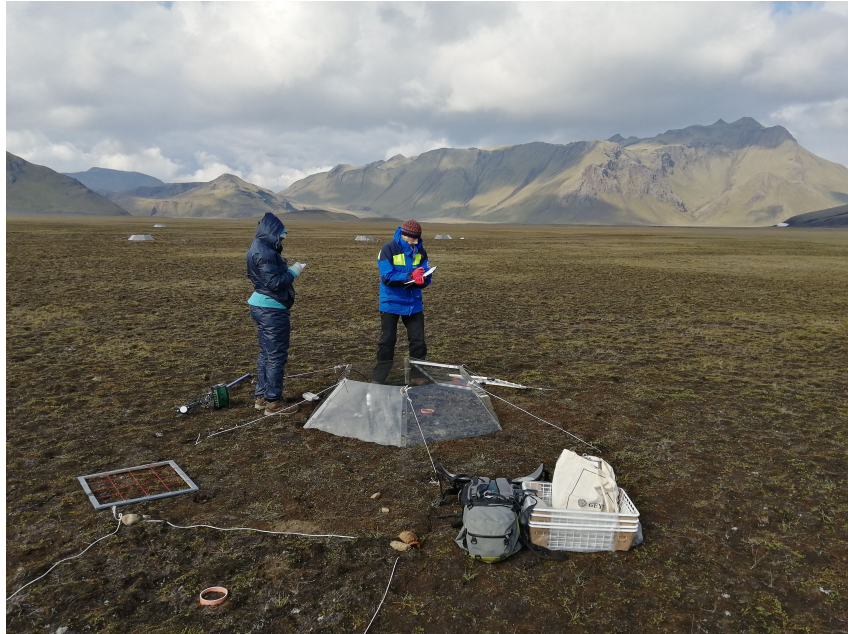
Líklegt er að fjöldi framandi tegunda aukist með hlýnandi loftslagi á norðurhvara líkt og héraendis. Aukin umsvif og ekki síst aukin ferðamannastraumur kalla eftir bættri vöktun á aðflutningi framandi tegunda og enn fremur að metin sé hættan á að framandi tegundir reynist ágengar. Nýverið var gerð rannsókn á framandi plöntutegundum sem borist hafa til arktískra svæða. Af 341 tegundum sem staðfestar voru reyndust 188 þeirra orðnar ílendar og ellefu flokkast sem framandi ágengar (Wasowicz o.fl., 2020). Héraendis finnast nýjar framandi æðplöntutegundir annað slagíð og dreifast sumar þeirra hratt og líklegt að þar sé um framandi ágengar tegundir að ræða. Sem dæmi má nefna stormþul sem dreifist hratt um stendur landsins (Wasowicz og Alm, 2022) en tegundin var upphaflega flutt inn sem skrautplanta í gördum. Annað dæmi um framandi ágenga tegund sem dreifst hefur hratt við Ísland er grjótkrabbi en Náttúrustofa Suðvesturlands hefur fylgst með útbreiðslu hans (Gíslason o.fl., 2021).

Það er einkenni framandi ágengra tegunda að dreifing þeirra er yfirleitt hæg til að byrja með en með tímanum verður fjölgunin veldisvaxandi og er þá í flestum tilfellum of seint að grípa til aðgerða. Nýverið var lagt gróft mat á kostnað af baráttu við framandi ágengar tegundir á Norðurlöndunum (Kourantidou o.fl., 2022) og þar samanlagður kostnaður vegna minks á Íslandi síðan 1960 áætlaður rúmlega 20 milljónir bandaríkjadala (um 2700 milljónir króna á gengi ársins 2022). Því er afar mikilvægt að varúðarreglunni sé beitt og framandi tegundum ekki dreift í íslenskri náttúru nema að vel ígrunduðu máli.

4.1.4 Stýrðar loftslagsrannsóknir á náttúrulegum landvistkerfum

Í fjórum rannsóknaverkefnum hér á landi er líkt eftir loftslagsbreytingum, annað hvort með beinum hætti (ITEX - sjá t.d. G. H. Henry o.fl. (2022)) og CRUST - sjá Salazar o.fl. (2022)) eða þar sem áhrif jarðhita eru nýtt til að rannsaka áhrif hlýnunar (ForHot - sjá Bjarni D. Sigurðsson o.fl. (2016) og Hengladalir - sjá Robinson o.fl. (2018)). Mikið hefur birst af vísindagreinum um þessi verkefni síðan V2018 kom út og hér verður aðeins dregið á nokkrar af helstu niðurstöðum þeirra.

Elst þessara verkefna er ITEX sem notar sexhyrnd opin plastskjól sem hækka lofthita við yfirborð um 1-2 °C. Verkefnið hófst alþjóðlega árið 1990 (G. H. Henry o.fl., 2022) og á Íslandi um 5-6 árum síðar á mósabembum á láglendi á Þingvöllum og á hálendinu á fjalldrapasvæði á Auðkúluheiði (Ingibjörg S Jónsdóttir o.fl., 2005). Síðan ITEX hófst hefur ársmeðalhiti hækkað um það sem nemur hlýnuninni í verkefnum víða á heimskautasvæðum, eða um 1-2 °C, og er því áhugavert að horfa einnig til þeirra breytinga sem hafa átt sér stað í sam-



Mynd 4.10: Unnið við mælingar á svörun jarðvegsskánar við fjögurra ára hlýnun í verkefnum CRUST. Í skjólum, sem eru opin í toppinn (OTC), hækkar sumarihitinn um 1-2 °C. Gróður og jarðvegur er mældur innan og utan skjólanna til að meta áhrif hlýnunar. (Ljósmynd af Alejo Salazar, birt með leyfi).

anburðarreitum án viðbót-
arhlýnunar. Þetta var meðal annars gert fyrir íslensku sam-
anburðargögnin og 156 önnur köld vistkerfi fyrir tímabilið 1980 til 2010 (S. C. Elmendorf o.fl., 2012). Niðurstöður sýndu að gróska jókst almennt hjá öllum vaxtarformum æðplantna og gróðurhæð hækkaði, m.a. vegna aukinnar hlutdeidar runnagróðurs í mörgum norðlægum vistkerfum. Þessar breytingar ríma vel við þær breytingar sem greint er frá að hafi orðið almennt á Íslandi í kaflanum um gróðurfar hér að framan og í V2018. Nýrri rannsókn á áhrifum hlýnunarinnar í plastskjólunum á 117 rannsóknasvæðum ITEX, þ.m.t. á Íslandi, staðfesti þær breytingar sem orðið höfðu á sam-
anburðarsvæðunum og sýndu að þær munu halda áfram með aukinni hlýnun (Bjorkman o.fl., 2018). Hins vegar sýndu þær einnig að framboð vatns í jarðvegi getur haft mikil áhrif, og jafnvel meiri en hlýnunin, á svæðum þar sem vatn er takmarkandi þáttur. Önnur nýleg rannsókn, sem fram fór á Íslandi og Svalbarða, sýndi að langtíma gróðurbreytingar, sem orðið hafa með hlýnuninni hafa einnig stuðlað að meiri niðurbrotsvirkni í jarðvegi og þar með hraðari hringrás næringarefna (Björnsdóttir o.fl., 2022). Það er því mikilvægt að líta til fleiri þátta en hitabreytinga eingöngu þegar áhrifa loftslagsbreytinga í framtíðinni er spáð fyrir íslenskt lífríki. Margar áhugaverðar greinar um þetta rannsóknaverkefni hafa komið út á síðustu árum (Bjorkman o.fl., 2020; Collins o.fl., 2021; Rixen o.fl., 2022).

Nýtt rannsóknaverkefni, CRUST, hófst árið 2018 (sjá mynd 4.10) með sömu aðferðafræði og ITEX um áhrif hlýnunar á hálendisvistkerfi við Landmannahelli í um 600 m h.y.s. þar sem yfirborð er vaxið jarðvegsskán (e. *biocrust*) (Gunnlaugsdóttir, 2022). Samhliða hafa farið fram

rannsóknir á svörun þessa einstaka og áhugaverða vistkerfis við stýrðum umhverfisbreytingum á rannsóknastofu (Salazar o.fl., 2022). Áhugaverðra niðurstaðna er að vænta frá þessu verkefni á næstu árum.

Í rannsóknaverkefninu ForHot hafa frá árinu 2013 verið rannsökuð áhrif mislangrar jarðvegs-hlýnunar á samsetningu og virkni graslendisvistkerfa á láglandi í Ölfusi (Bjarni D. Sigurðsson o.fl., 2016). Alls hafa birst yfir 30 greinar í vísindaritum um þetta verkefni (ForHot, 2022). Helstu niðurstöður sýna að vaxtarferli graslendisgróðurs breytist við hlýnun (Leblans o.fl., 2017). Samfélög jarðvegsgerla og sveppa (Radujkovic o.fl., 2018; Zhang o.fl., 2020; Weedon o.fl., 2023) og smádýra (Thakur o.fl., 2023) breytast og sömuleiðis losun og upptaka metans (CH₄) og nituroxíðs (N₂O) (Maljanen o.fl., 2017). Þó skortir enn á aðrar rannsóknir á íslenskri náttúru til að vita hvort allar þessar breytingar hafa þegar átt sér stað í kjölfar þeirrar hlýnunar sem hér varð eftir 1990. Rannsóknirnar í ForHot sýna jafnframt að kolefnisfordínn í efri hluta graslendisjarðvegs getur tapast hratt vegna aukinnar örveruvirkni í kjölfar hlýnunar (Poeplau o.fl., 2017). Einna áhugaverðustu niðurstöður þessa verkefnis er að til lengri tíma myndast nýtt jafnvægisástand í losun jarðvegs kolefnis frá yfirborðslögum í jarðvegi og að dýpri lög hans eru ekki eins viðkvæm fyrir hlýnun (Verbrigghe o.fl., 2022). Einnig myndast nýtt jafnvægisástand með tímanum í magni og virkni jarðvegsörvera og fleiri vistkerfisþáttum (Walker o.fl., 2018; Walker o.fl., 2020), sem að hluta er drifið áfram af tapi af næringarefnum út úr vistkerfinu þegar vetur hlýna (Marañón-Jiménez o.fl., 2019). Jafnframt sýna rannsóknirnar að ef hlýnunin verður meiri en sem nemur tvöföldum ársmeðalhita á síðustu öld geta afleiðingarnar fyrir starfsemi jarðvegs, örvera, dýralífs og gróðurs orðið mjög miklar (Radujkovic o.fl., 2018; Walker o.fl., 2020; Weedon o.fl., 2023).

Að lokum skal getið rannsóknarinnar í Hengladölum á Helligheiði sem er á hálendisbrúninni í um 350-420 m h.y.s. Þessi rannsókn hefur einkum beinst að því hvernig heitur berggrunnur, sem hefur hitað upp læki á svæðinu, hefur haft áhrif á lífríki í ferskvatni á þessu svæði (sjá umfjöllun í grein 4.4.1). Á seinni árum hafa einnig hafa komið út nokkrar vísindagreinar um áhrif jarðvegshlýnunar á smádýralíf og gróður á þurrlendi í þessum hálendisvistkerfum. Niðurstöður sýna að úr fræmyndun skordýrafrævaðrar plöntutegundar dró þegar blómgunin varð fyrr að vori vegna hlýnunar, líklega vegna þess að frjóberar voru þá ekki til staðar í eins miklu magni (Valdés o.fl., 2022). Hins vegar leiddi hlýnunin til aukins vaxtar og hlutdeildar æðplantna í gróðurfarinu á kostnað mosa og til aukinnar skordýrabeitar sem lagðist misþungt á mismunandi plöntutegundir (Robinson o.fl., 2018) (Warner o.fl., 2021). Huga þarf vel að slíkum afleiddum áhrifum af hlýnun (aukinni beit og breytingum á æxlunarárangri) þegar spár eru gerðar um áhrif umhverfisbreytinga á gróðurfur framtíðar, þar sem slíkir áhrifaþættir eru líklegir til að tempra vaxtarsvörun gróðurs og ekki síður að hafa áhrif á tegundasamsetningu vistkerfa í framtíðinni.

4A Náttúrleg vistkerfi og mótvægisáðgerðir

Starri Heiðmarsson

Sem viðbrögð við loftslagsbreytingum hefur verið bent á ýmsar leiðir til að vinna gegn aukningu koldíoxíðs í andrúmsloftinu, ýmist með því að draga úr losun eða auka bindingu. Sumar áðgerðirnar fela í sér endurheimt breyttra vistkerfa með það að markmiði að náttúrulegir ferlar, sem ýmist hamla losun eða auka bindingu, eflist. Þar má nefna endurheimt gróðurlenda á þurrlandi með landgræðslu eða skógrækt til að auka bindingu, sem og endurheimt votlendis til að draga úr losun sem verður við framræslu. Aðrar áðgerðir geta valdið umtalsverðum breytingum á núverandi vistkerfum þannig að þau skerðast og rýrna eða breytast að samsetningu og virkni og ný vistkerfi hafa jafnvel komið í þeirra stað. Allajafna er um landnotkunaráðgerðir að ræða, þar sem verið er að taka land undir nýja notkun í nafni loftslagsáðgerða, t.d. vegna nýtingar á grænni orku eins og vatnsafla, jarðvarma eða vindorku, nýtingu auðlinda fyrir tæknilausnir, s.s. málma fyrir orkuskipti, þéttingu byggðar, byggingu samgönguinnviða og þegar náttúruleg gróðurlendi eru tekin undir ræktun í landbúnaði eða skógrækt með framandi tegundum.

Bent hefur verið á mikilvæg tengsl milli loftslagsbreytinga og hnignunar líffræðilegrar fjölbreytni á heimsvísu. Annars vegar eru loftslagsbreytingar einn aðalorsakavaldur hnignunar líffræðilegrar fjölbreytni þar sem þær valda örum breytingum á umhverfi og veðurfari sem viðkvæm vistkerfi þola illa. Þar má nefna áhrif vegna súrnunar sjávar, þurrka, skógarelda, flóða, sjúkdóma, breytinga á útbreiðslu tegunda o.fl. Hins vegar geta mótvægisáðgerðir, sem ætlað er að draga úr loftslagsbreytingum, haft neikvæð áhrif á líffræðilega fjölbreytni. Birtingarmynd þeirra áhrifa felst einkum í því að stuðla að eyðingu búsvæða og/eða auka útbreiðslu framandi ágengra tegunda en búsvæðaeiðing og framandi ágengar tegundir eru meðal stærstu áhrifaþátta sem valda hnignun líffræðilegrar fjölbreytni.

IPCC og IPBES (*e. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) héldu sameiginlegan vinnufund árið 2019 um þetta fjölþátta samspil loftslagsbreytinga og hnignun líffræðilegrar fjölbreytni og í tengdri skýrslu sem kom út 2021 er áréttað að meta verði mótvægisáðgerðir gegn loftslagsbreytingum út frá áhrifum þeirra á líffræðilega fjölbreytni en ekki einungis ætlaðri bindingu koldíoxíðs (Pörtner o.fl., 2021). Þessu ákalli var fylgt eftir á fimmtánda fundi aðildarþjóða Samnings Sameinuðu þjóðanna um líffræðilega fjölbreytni (CBD COP-15) sem haldinn var í desember 2022 í Kanada. Þar var samþykkt Rammasamkomulag um verndun líffræðilegrar fjölbreytni til ársins 2030 (*e. Global Biodiversity Framework*) og fjallaði eitt af meginmarkmiðunum um samspil áðgerða samningsins við áðgerðir loftslagsmála. Þar kemur m.a. fram að það sé grundvallaratriði að komið verði í veg fyrir að loftslagsáðgerðir hafi neikvæð áhrif á líffræðilega fjölbreytni.

Skógrækt hefur verið nýtt sem leið til bindingar kolefnis en minni athygli hefur verið beint að þeim breytingum sem skógrækt getur valdið á þeim vistkerfum sem fyrir eru. Þannig samþykkti fastanefnd Bernarsamningsins, sem við Íslendingar eigum aðild að, nýlega tilmæli er vara við notkun framandi ágengra trjátegunda við kolefnisbindingu (Standing Committee, 2022). Meðal tilmæla þeirra var að hafðar væru til viðmiðunar tíu gullnar reglur fyrir kolefnisbindingu með endurheimt skóglendis (Di Sacco o.fl., 2021). Hérlandis hefur verið bent á að áhætta fylgi notkun vissra framandi trjátegunda eins og stafafuru sem nú þegar er flokkuð sem ágeng framandi tegund á Nýja-Sjálandi (New Zealand Plant Conservation Network, 2023) og í Noregi (Elven o.fl., 2018) en íslenskar rannsóknir benda til að stafafura sé líkleg til að flokkast sem ágeng framandi tegund hérlandis (Wasowicz o.fl., 2022). Í síðustu skýrslu (V2018) var bent á að framandi ágengar tegundir séu líklegri til að valda breytingum á íslenskum vistkerfum með loftslagsbreytingum (Wasowicz o.fl., 2013).

Í áðurnefndri skýrslu IPBES var áréttað að greinarmun þarf að gera á friðun náttúrulegra skóga og endurheimtar þeirra og síðan nytjaskógrækt með aðfluttum tegundunum. Í þessu samhengi má einnig benda á þann staðbundna erfðafræðilega mun sem íslenskir birkiskógar sýna (Pálsson o.fl., 2022; Thórsson o.fl., 2010) sem ætti að vera hvatning til að nýta staðbundna stofna við endurheimt birkiskóga.

Fjallað er um framandi og ágengar tegundir í grein 4.1.3 og rétt er að ítreka þá niðurstöðu að eðlilegt megi teljast að varúðarreglan sé höfð í huga þegar ákvarðanir eru teknar um dreifingu aðfluttra tegunda sem mótvægi við loftslagsbreytingar og þess gætt að mótvægisáðgerðirnar orsaki ekki hnignun líffræðilegrar fjölbreytni.

4.2 Ræktun á landi

4.2.1 Hefðbundinn landbúnaður

Segja má að hinn hefðbundni íslenski landbúnaður, þar sem byggt var á dýrahaldi sem komst af með lágmarksuppskeru af vetrarfóðri hafi verið aðlögun að kólnandi veðurfari og veðurfarssveiflum fyrri alda. Sauðfjárræktin, sem enn er undirstöðuatvinnuvegur í mörgum dreifðum byggðum, náði sögulegu hámarki í fjölda sauðfjár árið 1978. Árið 2021 var sauðfjástofninn einungis 43% af því sem mest varð (Hagstofa Íslands, 2022) og enn hallar undan í þessari undirstöðubúgrein (Jóhannes Sveinbjörnsson og Daði Már Kristófersson, 2021). Þessi samdráttur hefur verið drifinn áfram af markaðsaðstæðum en ekki áhrifum loftslagsbreytinga eða aðlögunar að þeim. Svipaða sögu má segja um hrossarækt hérlendis sem getur almennt komist af með lágmarksfóðrun að vetri og áhrif loftslagsbreytinga því takmörkuð á hana. Á Grænlandi, þar sem sauðfjárrækt hefur farið fram með fé af íslenskum uppruna í um 100 ár, hafa aðstæður til slíks búskapar hins vegar verið nær loftslagsmörkum sínum og áhrif hlýnunar frá köldu árunum milli 1960 og 1990 verið greinilegri (Westergaard-Nielsen o.fl., 2015). Til dæmis hefur nú hafist kartöflu- og sauðfjárrækt við Nuukfjörð þar sem Vestribyggð norrænna manna var staðsett á hlýskeyði miðalda (mynd 4.11) og þar skapast á ný umhverfisáðstæður sem gætu staðið undir mun meiri þróun í landbúnaði, eins og nýlega hefur verið sýnt fram á með hjálp hermílikana (Westergaard-Nielsen o.fl., 2015).

Bein áhrif loftslagsbreytinga á bæði sauðfjárrækt og hrossarækt eru einkum falin í „ótímabærum“ hauststormum með mikilli ofankomu eða óvenjusterkum vetrarstormum. Slíkir hauststormar hafa valdið afföllum í sauðfjárræktinni, eins og til dæmis gerðist á norðanverðu landinu í september 2012 (mynd 4.12) og mikill vetrarstormur í desember 2019 olli talsverðum hrossadauða á norðanverðu landinu (Soffía Helga Valsdóttir, 2022). Svona atburðir munu ekki hverfa í nánustu framtíð samkvæmt reikningum byggðum um á losunarsviðsmyndum.



Mynd 4.11: Bóndinn Angutimmarik Hansen býr á eina sauðfjábýlinu við Nuukfjörð, bænum Neriunaq, þar sem hann hefur einnig nýlega hafið kartöflurækt. (Ljósmynd. Bjarni Diðrik Sigurðsson, birt með leyfi).

Þetta má sjá á mynd 3.5 og í töflu 3.3 sem sýna að í 5% tilvika á tímabilinu 2046-2055 komu fram ár sem voru kaldari en meðaltal árána 1986-2015 fyrir allar sviðsmyndir nema þá heitustu. Jafnvel má ætla að svona vandamál gætu aukist þegar tíðarfar hlýnar mest að hausti og vetri (sjá mynd 3.9) sem mun gera það líklegra að búsmali sé utanhúss síðla hausts og að vetrarlagi.



Mynd 4.12: Gímur sem grafin hafði verið upp úr snjóskafli borin í skjól. (Ljós. Vikublaðið 11. sept 2012, birt með leyfi).

hafa nokkrir kaldari vetur á síðasta áratug, með svallalögum sem lágu lengi á tónum á láglendi norðanlands og austan, valdið talsverðum bú sífjum þar (Guðmundur H. Gunnarsson, 2021). Framreikningar á ársmeðalhita, að gefnum forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda, hjálpa lítið til að meta kalhættu í tónum, þar skiptir árstíðarsveiflan í hlýnun meginmáli. Hvort niðurstöður kafa 3 um vetrarhita boða breytta tíma hvað varðar svellkal veltur á því hvaða losunarsviðsmynd gengur eftir. Mynd 3.9 sýnir þó að jafnvel í köldustu losunarsviðsmyndinni (SSP1-2.6) hækkar vetrarhiti um 1,5 °C að jafnaði í lok aldarinnar sem gerir það ólíklegra að svallalög verði langlíf á tónum á láglendi. Hins vegar sýna þá 5-20% loftslagslíkananna að enn geti komið kaldari vetur en urðu að meðaltali 1986-2015. Gangi SSP3-7.0 losunarsviðsmynd eftir mun vandamálið í vetrarköldustu innsveitum norðan og austanlands væntanlega nánast hverfa á næstu áratugum og í lok aldarinnar mun vetrarhitinn hafa hækkað um 3,5 °C að jafnaði og spönnin fyrir köldustu líkönin nær ekki lengur meðalhita árána 1986-2015 (mynd 3.9). Kalhætta getur þó haldist lengur á láglendi ef bændur taka að rækta meira af túngrösum með minna vetrarþol.

Rannsóknir hafa sýnt að heyfengur í túnraekt jókst að jafnaði um 610-770 kg þurrefnis á ha, eftir grastegundum, fyrir hverja gráðu sem vetrar- og vorhiti hækkaði (Guðni Þorvaldsson og Hólmgeir Björnsson, 1990), að talið er m.a. vegna meiri losunar næringarefna þegar jarðvegur frýs ekki að vetri og er hlýrri fram á sumar. Þess má geta í þessu sambandi að jarðvegshiti á 50 og 100 cm dýpi hefur hækkað um 0,4 °C á áratug síðan 1980 á Hveravöllum á Kili (Guðrún Nína Petersen og Derya Berber, 2018) og almennt hefur gróska aukist í úthaga á Íslandi á sama tímabili (V2018). Fleira en hitafar hefur þó áhrif á túnsprettu og hafa rannsóknir sýnt að lengd vaxtartíma, sólarstundir og framboð vatns í jarðvegi eru allt mikilvægir þættir við íslenskar aðstæður (Guðni Thorvaldsson o.fl., 2004). Hvernig heyfengur á hektara þróast í hlýnandi veðurfarum framtíðar verður væntanlega fremur fall af fjölda slátta sem lengri vaxtartími leyfir eða með breytingum á tegundum eða yrkjum grasa sem rækta má við breytt veðurfar (Solberg o.fl., 2016). Hins vegar geta einnig nýir umhverfisþættir orðið takmarkandi fyrir uppskeru túngrasa (V2018). Á hlýjustu árunum í kringum 2010 urðu talsverðir vorþurrkar á vestanverðu landinu

Mjólkurframleiðsla og nautgriparækt hefur hins vegar alltaf verið háð öruggri og góðri fódurframleiðslu og því ætíð verið mjög loftslagsháð búgrein. Það er einkum í kringum nautgriparæktina sem t.d. kornræktin er að þróast á Íslandi.

Kalskemmdir á tónum vegna svallalaga að vetri voru löngum eitt helsta vandamálið í fódurframleiðslu hefðbundna landbúnaðarins en samfara hlýnandi vetrarveðri síðustu 35 árin ber á landsvísu mun minna á þessu vandamáli en áður (V2018). Þó

sem ollu vandamálu í tún- og kornrækt þar sem ræktunin fer fram í sendnum jarðvegi (Þórdís A Kristjánsdóttir, 2013), svo mjög að nokkrir bændur fjárfestu í búnaði til vökvunar á akurlendi. Einnig má benda á mikla þurrka á Austurlandi sumarið 2021 sem ollu vandamálu í ræktun (Björn Þór Björnsson, 2021; Rúnar Snær Reynisson, 2021). Ef niðurstöður fyrir sviðsmýndir SSP2-4.5 og SSP3-7.0 eru skoðaðar á mynd 3.4 má vænta þess að að ársúrcoma aukist lítillega með hlýnandi veðurfari, eða allt að 3% í lok aldarinnar fyrir hlýrri sviðsmýndina. Hins vegar er líklegt að breytileiki í úrkomu verði áfram mikill og til dæmis má sjá í töflu 3.5 að á tímabilinu 2046–2050 sýna 25% loftslagslíkana að ársúrcoma gæti orðið um 2,4% minni en hún var á árunum 1986–2015. Ef veðurfar hlýnar eykst útgufun og meiri úrkomu þarf til að viðhalda sama rakastigi í jarðvegi og áður, þannig að áhrif á ræktun geta orðið neikvæð ef úrkomuaukningin er ekki næg. Í nýrri bók um íslenskan jarðveg er slík aukin þurrkáhætta einmitt tekin upp sem líklegust neikvæð áhrif loftslagsbreytinga á ræktun nytjajurta hérlendis (Þorsteinn Guðmundsson, 2018). Mikil þörf er á að laga hermílikön að íslenskri jarðrækt til að skoða sameiginleg áhrif hitafars og úrkomu betur.

Ýmsar nytjategundir eru á mörkum þess að geta vaxið hérlendis og því þarf að endurskoða umtalsvert af ræktunartilraunum sem fram fóru á köldu árunum 1960–1990 (V2008, V2018). Tegundir, sem áður höfðu verið nánast afskrifaðar, sýna nú að þær þrífast með ágætum þar sem nærveður er hagstæðast. Mesta vandamálið hér fyrir margar norðlægar fjölærar nytjajurtir í jarðrækt og matvælaframleiðslu er hins vegar ekki kalt veðurfar, heldur fremur hversu umhleypingasamir veturnir eru og með miklum hitasveiflum.



Mynd 4.13: Kornakur (bygg) í Vallanesi á Fljótsdalshéraði. (Ljósmynd af Bjarni Diðrik Sigurðsson, birt með leyfi).

Þetta veldur því að mörgum slíkum fjölærum tegundum hættir til að vakna of snemma úr vetrardvala að vori og vaxa of lengi fram á haustið og hlýnandi veðurfar næstu áratuga mun trauðla breyta þessu vegna þeirra miklu sveiflna í hitafari sem einkenna veðurfarið hérlendis (Solberg o.fl., 2016). Það eru einkum sumareinærar tegundir sem munu geta nýtt sér hlýnandi veðurfar, svo sem korn (bygg; þarf >1100 gráðudaga til að nýttast sem skepnufóður og 1200 til að ná fullum kornþroska; mynd 4.13), hafrar og einær nepja (>1400 gráðudaga), einær repja og sumarhveiti (þurfa >1600 gráðudaga) sem munu aukast í ræktun hérlendis á næstu áratugum.

Líklegt er að loftslagsbreytingar og aukin eftirspurn eftir fljótandi lífelfsneyti muni hafa jákvæð áhrif á ræktunarmöguleika ýmissa orkuplantna á Íslandi. Í sérgrein 4B er einmitt fjallað um hvernig líklegt er að ræktunarsvæði m.a. vetrarrepju og nepju muni breytast út öldina vegna hlýnunar. Það geta einnig falist tækifæri fyrir landbúnaðinn að nýta alls kyns ónýttan lífmassa til framleiðslu lífolíu. Gerð hefur verið greining á möguleikum og landrými til aukinnar lífmassa- og orkuplöntuframleiðslu á S- og NA-landi (Hólmgeir Björnsson, 2007). Að hluta til má koma slíku fyrir á landbúnaðarlandi sem fallið hefur úr ræktun, en það eru um 7000 ha frá 1984. Meginhluta lífmassans þyrfti samt að afla á landi sem er ræktað sérstaklega til þess.

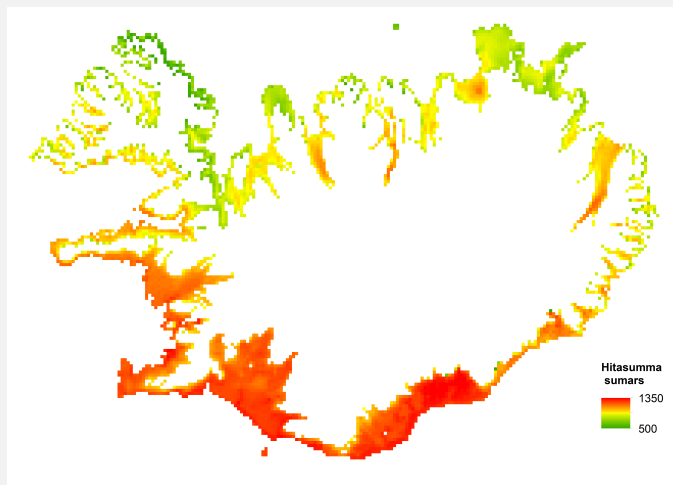
Hlýrri vor og lengri vaxtartími fram á haustið hafa sannarlega nú þegar aukið möguleikana á að rækta margar tegundir í jarð- og garðrækt hér á landi. Í þeirri bylgju nýsköpunar sem nú gengur yfir samfélagið er nú unnið að verkefnum þar sem prófuð er ræktun ýmissa nytjajurta, svo sem á iðnaðarhampi (Vilmundur Hansen og Sigurður Jóhannesson, 2021; Þóroddur Sveinsson, 2022), olíunepju og repju (Sunna Skeggjadóttir o.fl., 2022a), höfrum (Sunna Skeggjadóttir o.fl., 2022b), hunangsberjum (Steinunn Gardarsdóttir o.fl., 2022), vetrarrúgi, og vor- og vetrarhveiti (Þóroddur Sveinsson, 2022), til að nefna nokkrar.

4B Ræktunarskilyrði í dag og í framtíðinni

Bjarni Diðrik Sigurðsson og Halldór Björnsson

Á mynd 4.14 sést gróft mat á meðalræktunarskilyrðum á láglendi landsins (<200 m y.s.) á tímabilinu 1986-2015, metin með gögnum frá Carra endurgreiningunni (Schyberg o.fl., 2020). Landsmeðaltalið á þessu tímabili var 1050 gráðudagar ($^{\circ}\text{C} \times \text{dag}$ fyrir vaxtartímann 15. maí til 15. september). Að meðaltali var lægri hiti á rúmlega helmingi láglendis Íslands en þarf til að korn mætti rækta til fódurs á þessu tímabili. Hins vegar hlýnaði umtalsvert á seinni hluta þessa tímabils (mynd 4.15) og ræktunarskilyrði fyrir t.d. kornrækt bötunduð að sama skapi (V2018). Á hlýjustu svæðunum voru meðalræktunarskilyrði allt að 1300-1350 gráðudagar 1986-2015, sem þýðir að oftar en ekki mátti rækta korn til fulls þroska (>1200 gráðudagar). Hlýjustu svæðin eru á landinu sunnan- og vestanverðu, en þrengri dalir á norðan- og austanverðu landinu koma ekki eins skýrt fram á mynd 4.14 og vænta mætti þar sem margir reiknireitir Carra sem sýndir eru á myndinni eru þar samsettir, bæði dalbotnum og hlíðum fjalla. Einnig er mikilvægt að taka fram hér að hitafar gefur einfaldaða mynd af ræktunarskilyrðum og aðrir þættir, svo sem úrkoma, vindálag og fjöldi sólríkra daga, geta einnig skýrt breytileika milli svæða (Páll Bergþórsson, 1996; Guðni Thorvaldsson o.fl., 2004).

Á mynd 4.15 má sjá líklega mánaðarlega þróun á daggráðum (gróflega áætluðum ræktunarskilyrðum) alls láglendis landsins frá 1986 til 2100 samkvæmt fjórum sviðsmyndum (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SPP3-7.0 og SPP4-8.5) og með 25 líkönum. Kassarit eru sýnd fyrir meðaltöl áratuganna 2046–2055 og 2091–2100. Niðurstöður sýna að fjöldi gráðudaga eykst að jafnaði úr 1050 á láglendi Íslands í 1172, 1192, 1269 og 1269 í sviðsmyndunum fjórum árið 2050, eða um 12%, 14%, 21% og 21%. Það þýðir að í stað þess að rækta megi korn til skepnufódurs á ríflega helmingi landsins má rækta það til fulls kornþroska til manneldis á um helmingi þess í þremur hlýjari sviðsmyndunum. Samsvarandi meðaltal fyrir 2095 gefur að jafnaði 1186, 1281, 1436 og 1436 gráðudaga, eða um 13%, 22%, 37% og 37% hækkun frá meðalræktunaraðstæðum sem voru 1986-2015, og þá er hægt að rækta t.d. hafra til fulls þroska á um helmingi láglendis að jafnaði í tveimur hæstu sviðsmyndunum. Eins og mynd 4.14 sýnir þá eru hlýjustu sveitir landsins með um 250-300 fleiri daggráður en landsmeðaltalið, sem þýðir að á þeim svæðum verða ræktunarskilyrði orðin gjörbreytt frá því sem nú er, jafnvel þó að tveggja gráðu markmiði Parísarsamningsins verði náð.



Mynd 4.14: Hitasumma sumars frá 15. maí til 15. september á tímabilinu 1986 - 2015. Einingar eru $^{\circ}\text{C} \times \text{dag}$. Byggt á ICRA-greiningunni. Meðaltal fyrir landið og tímabilið er $1050^{\circ}\text{C} \times \text{dag}$.



Mynd 4.15: Breytingar á hitasummum í sviðsmyndunum fjórum. Þær eru reiknaðar fyrir vaxtartímann 15. maí til 15. september og einingin er $^{\circ}\text{C} \times \text{dag}$. Gert er ráð fyrir að á viðmiðunartíma sé summan $1050^{\circ}\text{C} \times \text{dag}$.

4.2.2 Garðyrkja

Ekkert almennt yfirlit hefur enn verið unnið um núverandi loftslagsáhrif á garðyrkju utanhúss frá útkomu V2018. Eftirfarandi eru örfáar nýjar viðbætur við það sem þar kom fram.

Í garðyrkjunni hafa orðið miklar breytingar eftir að tók að hlýna upp úr 1990 sem má rekja til breytinga á veðurfari. Einnig hafa orðið miklar sveiflur í matjurtaækt utanhúss á sama tíma, en þær kunna að hafa verið drifnar af breytingum á markaðsaðstæðum frekar en sveiflum í veðurfari. Þó skortir rannsóknir á því (V2018). Ræktun á vorblómstrandi aldintrjám var lengi á mörkum hins mögulega á Íslandi (mynd 4.16). Segja má að fyrsti vísir að slíkri ræktun hafi hafist á hlýjustu árunum milli 1930 og 1950, en öll sú ræktun þurrkaðist út á kalda tímabilinu milli 1960 og 1990, en hófst svo á ný um síðustu aldamót. Í innlendri rannsókn kom fram sterk jákvæð fylgni milli ársmeðalhita einstakra ára og fjölda ritaðra fréttu um eplarækt hérlendis (Hraundís Guðmundsdóttir, 2013). Nokkrir umhleypingasamir vetur og vor á síðasta áratug, m.a. 2023, hafa þó valdið skakkaföllum á ýmsum tegundum fjölærs garðagróðurs. Slíkur breytileiki í veðurfari síðla vetrar og að vori er og verður áfram takmarkandi þáttur fyrir þríf margra garðtegunda hér.

Eins og fram kom í V2018 hafa hlýnuninni síðustu 30 árin einnig fylgt talsverðar áskoranir í garðyrkjugeiranum. Áður voru sumarblóm til dæmis einungis gróðursett einu sinni að sumri í skrautbed, en nú þarf að endurnýja þau allt að tvisvar sinnum vegna lengri og hlýrri vaxtartíma. Illgresissamkeppni hefur einnig aukist mikið í frjósömu landi sem kallar á stórauðna umhirðuþörf í garðyrkju hérlendis. Einnig hefur aukin gróska og hlýindi valdið því að ýmis meindýr og plöntusjúkdómar hafa sótt í sig veðrið frá því sem var á köldu árunum milli 1960 og 1990 (V2018).

Enn er langt í land þegar kemur að rannsóknum og spám um áhrif loftslagsbreytinga á garðyrkju og ræktun matvæla og annarra nytjajurta utanhúss hérlendis og hvers konar aðlögunar sé þörf.

4.2.3 Viðbrögð landbúnaðar og garðyrkju við loftslagsbreytingum

Frá því að V2018 kom út hefur meðvitund og áhugi landbúnaðar- og garðyrkjugeirans á loftslags- og sjálfbærnimarkmiðum tvímælalaust aukist stórlega. Þannig hafa tvö stærstu búgreinasamböndin, sauðfjár- og nautgriparæktar, látið vinna úttekt á loftslagsáhrifum og greiningu á því hvernig mögulega má draga úr þeim (Björgvin Brynjarsson o.fl., 2020; Sigrún Hallsdóttir og Stefán Gíslason, 2017; ANR, 2020). Þessi vinna hefur fengið marga bændur til að horfa á ýmsa þætti í rekstri bóa sinna með nýjum augum, en jafnframt skapað mikla og gagnlega umræðu, jafnt í fræðasamfélaginu sem og meðal bænda, um stöðu þekkingar á kolefnishringrás landsins og áhrif landnýtingar á hana (sjá t.d. (Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson, 2020; Þóroddur Sveinsson o.fl., 2022; Ólafur Arnalds, 2023). Hluti af auknum áhuga á sjálfbærni er einnig nýleg vinna um fæðuöryggi landsins (Erla Sturludóttir o.fl., 2021) og eflingu kornræktar hérlendis (Egill Gautason o.fl., 2023). Hins vegar hefur ekki farið fram almenn úttekt á núverandi og væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á íslenskan landbúnað síðan á árunum 2004-2007 (Bjarni E. Guðleifsson, 2004; Haraldur Ólafsson o.fl., 2007), ef undan er skilið almennt yfirlit fyrir jarðrækt og plöntukynbætur á norðurslóðum sem kom út árið 2016 (Solberg o.fl., 2016). Einnig vantar greiningu á því hvernig opinber loftslagsmarkmið munu hafa áhrif á landbúnað og garðyrkju hérlendis.

Til að auka skilning á mögulegum afleiðingum loftslagsbreytinga á landbúnað á komandi áratugum er mikilvægt að laga hermilíkön (*e. process based simulation models*) að íslenskum aðstæðum og nýta til þess fyrirbyggjandi loftslagsspár (sjá mynd 3.16) til að herma hvaða áhrif þær munu hafa á mismunandi búgreinar. Enn sem komið er hefur slíkt einungis verið unnið að hluta fyrir skógrækt (Bergh o.fl., 2003).

4.2.4 Skógrækt og landgræðsla

4.2.4.1 Skógrækt

Eins og farið var nokkuð ítarlega yfir í V2008 og V2018 eru bæði innlendar og innfluttar trjátegundir hér nálægt norðurmörkum útbreiðslu sinnar og svara því nokkuð sterkt hækkandi hitafari í vexti sínum og útbreiðslumöguleikum, ef aðrir takmarkandi þættir eins og búfjárbeit leyfa. Landsskógaúttekt hófst á Íslandi á 8. áratugnum og eftir 2001 hefur slík úttekt farið fram reglulega, bæði á ræktuðum skógum og á náttúrulega birkiskóginum (Arnór Snorrason og Bjarki Þór Kjartansson, 2004). Samkvæmt þeim hefur skóglendi, bæði náttúrulegt og ræktað, náð 2% af heildarflatarmáli landsins eða um 4% af láglandi undir 400 m y.s. (A. Snorrason, 2020). Þar af eru náttúrulegir skógar og kjarrlendi 3% láglandis, en ræktaðir skógar (skv. skógaskilgreiningu FAO), sem ná a.m.k. 5 m hæð fullvaxnir, þekja nú 1% láglandis, eða um 51 þúsund hektara.



Mynd 4.16: Epli í garði Jóns Guðmundssonar á Akranesi.
Ljós. Jón Þórir Guðmundsson, birt með leyfi

birkis á seinni árum utan girðinga. Er það betri veðurfarsaðstæður sem valda því að fræframleiðsla birkis eykst og þar með líkur á að einhverjar fræplöntur komist upp, eða er það aðallega vegna fækkunar búsmala í högum á sama tíma? Það að birkið hefur tekið mikið við sér vegna þeirra loftslagsbreytinga sem hafa orðið eftir 1990 er hins vegar ekki vafi (A. Snorrason, 2022a). Enn er þó skipulögð skógrækt meginástæðan fyrir því að flatarmál skóglendis eykst hérlendis. Árleg sjálfsáning birkiskóga var um 40 ha á árabílinu 1990-2020, miðað við um 1000 ha árlega nýgróðursetningu ræktaðra skóga (A. Snorrason, 2020). Nýjasta spá um nýskógrækt og náttúrulega útbreiðslu birkis gerir ráð fyrir að þekja allra skóga og kjarrs gæti aukist í 2,8% af heildarflatarmáli landsins árið 2040, eða í um 5,5% af láglandi landsins (A. Snorrason, 2022a).

Á undanförunum misserum hefur talsverð umræða verið um sjálfsáningu innfluttra trjátegunda utan við skipulögð skógræktarsvæði (Sjá einnig box: Náttúruleg vistkerfi og mótvægisáðgerðir) og hvort hún ógni öðru lífríki. Íslensk skógarúttekt (ÍSÚ) hóf árið 2022 sérstaka úttekt á því á landsvísu og það ár var þetta mælt sérstaklega á 89 flötum í jaðri skógræktarsvæða, völdum af tilviljun um allt land (A. Snorrason, 2022b). Þar kom í ljós að sjálfsáning út fyrir kortlögð skógræktarsvæði fannst í 8% tilfella og þar af voru 7% með innlendum tegundum. Þessari úttekt verður haldið áfram og þá fást betri tölulegar upplýsingar um tíðni sjálfsáningar innfluttra trjátegunda á landsvísu, en fyrri úttektir hafa einkum beinst að einum og einum völdum rannsóknastað þar sem sjálfsáningar hefur orðið vart (Eggertsson o.fl., 2022; Brynjólfur Brynjólfsson, 2023).

Skóglendisþekja upp á 2% er að minnsta kosti tvöföldun frá því að flatarmál skóglendis hér varð minnst á fyrsta þriðjungi síðustu aldar. Ástæðurnar fyrir þessari aukningu eru fyrst og fremst ákvarðanir stjórnvalda og einkaaðila um stjórnun landnýtingar. Á landsvísu hafa náttúrulegir birkiskógar aukið útbreiðslu sína með sjálfsáningu um 11% frá 1989 (Arnór Snorrason o.fl., 2016; A. Snorrason, 2020), og nú sést slík nýliðun birkis bæði í beitarsvæðum landi (t.d. Behrend, 2019; Borgþór Magnússon o.fl., 2022a) og einnig í landi þar sem einhver beit búsmala er stunduð (t.d. Friðþór Sófus Sigurmundsson o.fl., 2012; Óskarsdóttir o.fl., 2022). Ekki er að fullu ljóst af hverju mun meira ber á sjálfsáningu

4.2.4.2 Meindýr og plöntusjúkdómar

Eins og fram kemur í grein 4.1.2.1 hefur nýjum tegundum skordýra, sem leggjast á tré og runna, tekið að fjölga mikið með hlýnandi veðurfari, eftir að fjöldi þeirra stóð nánast í stað á köldu árunum milli 1960 og 1990 (Halldórsson o.fl., 2013b). Þessi þróun hefur haldið áfram og árið 2018 var vitað um 29 tegundir skordýra/liðfætla sem höfðu borist hingað frá þarsíðustu aldamótum en þremur nýjum meindýrategundum hafði tekist að eyða (sjá 4.19). Um þetta var fjallað í nýlegri rannsókn (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019b) sem (mynd 4.19) er fengin úr.

„Mikið landnám skógarmeindýra á undanförunum þremur áratugum er áhyggju-efni, einkum þar sem þar á meðal eru tegundir sem þegar hafa valdið verulegu tjóni í skóg- og garðrækt og aðrar sem full ástæða er til að óttast að verði vaxandi vandamál. Hlýnandi loftslag, aukinn innflutningur á ýmsum varningi og mikil fjölgun ferðamanna eykur hættu á að landnám meindýra fari enn vaxandi og gæti haft veruleg áhrif á skógrækt, landgræðslu og landbúnað hér á landi, að ónefndri hættunni sem íslenska birkivistkerfið gæti stadið frammi fyrir.“ bls. 37.

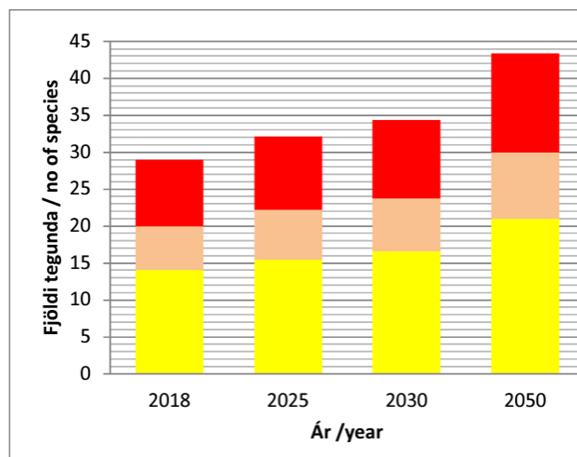
Í sömu samantekt er spáð að fjöldi meindýra á trjám og runnum geti aukist um tæplega 50% til ársins 2050 miðað við áframhaldandi hlýnun og ferðamannastraum (mynd 4.18). Í V2018 kom fram að jákvæð áhrif loftslagsbreytinga á vöxt og útbreiðslu skóga hafi hingað til gert meira en að vega áhrif þessara skaðvalda upp. Guðmundur Halldórsson o.fl. (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019a) benda hins vegar á að áhrif margra þeirra skordýrategunda sem nýlega hafa borist til landsins séu ekki að fullu komin fram og einnig benda þeir á nýleg erlend dæmi þess að loftslagsbreytingar hafi aukið útbreiðslu skaðvalda sem aftur hefur leitt til skógareyðingar á margfalt stærri svæðum en allir skógar Íslands þekja.

Nýjasta dæmið um slíkar loftslagstengdar hamfarir er yfirstandandi faraldur barkarbjallna í Svíþjóð sem hófst eftir fordæmalaus þurrka sem urðu þar sumarið 2018 og áætlað er að hafi valdið afföllum á rauðgreni sem nam 24% af ársvexti þess í allri Mið- og Suður-Svíþjóð á árinu 2021 (Schroeder og Kärverno, 2022). Einnig má nefna söguleg dæmi frá Íslandi um ákveðnar trjátegundir eins og skógarfuru, sem hafa nánast þurrkast út hér í kjölfar slíkra faraldra innfluttra meindýra (Heiðarsson o.fl., 2020).

Það er því full ástæða að hafa varann á hvað þetta varðar og mikilvægt að ræktendur geri sér grein fyrir þessari hættu og leiti leiða til að bregðast við henni. Heiðarsson o.fl. (2020) telja mikilvægt að greina helstu áhættuþætti á innflutningi nýrra skaðvalda til að geta dregið úr líkum þess að þeir nemi hér land og gera viðbragðsáætlanir til að útrýma nýjum skaðvöldum á fyrstu stigum landnáms. Guðmundur Halldórsson o.fl. (2019b) nefna dæmi um að slíkt hafi tekist í þremur tilfellum hingað til (mynd 4.19), sem sýnir að það er raunhæf aðgerð.

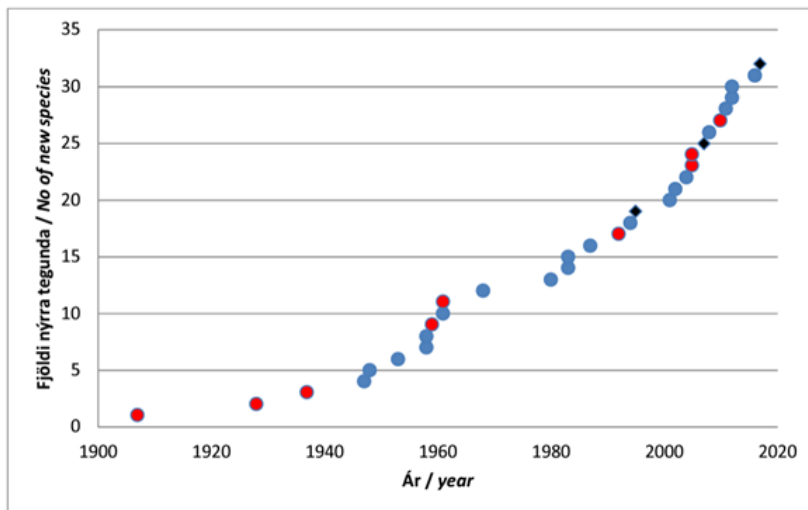


Mynd 4.17: Birkipéla er blaðvesputegund sem fannst hér fyrst árið 2016 og hefur breiðst hratt út um landið. Lirfa hennar holar innan birkiblöð eftir mitt sumar. Birkikemba er lítil fiðrildategund með lirfu sem veldur mjög líkum skemmdum á birki snemmsumars, en sú tegund fannst hér fyrst árið 2005. (Ljósmynd. Brynja Hrafnkelsdóttir, birt með leyfi).



Mynd 4.18: Ætluð fjölgun nýrra skógarmeindýra fram til ársins 2050. Gult sýnir tegundir sem valda litlu eða engu tjóni, gulbrúnt tegundir sem valda verulegu tjóni og rautt tegundir sem valda miklu tjóni og trjádauda. (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019b, birt með leyfi).

Af þeim tegundum skaðvalda sem nýlega eru komnar til landsins má nefna tvær sem leggjast á birki (Hrafnkelsdóttir og Oddsdóttir, 2019). Það eru birkikemba (*Heringocrania unimaculella*) og birkipéla (*Scolioneura betuleti*), en báðar hafa lirfustig sem lifir innan í laufblöðum birkis og étur blöðin innan frá og dregur þannig úr vaxtarþrótti birkisins (mynd 4.17). Birkikemban fannst hér fyrst árið 2005 en birkipélan árið 2016 og báðar þessar tegundir hafa breiðst hratt um landið. Lirfa birkikembunnar veldur skemmdum snemmsumar og reynslan hefur sýnt að trén jafna sig nokkuð vel eftir faraldra hennar einnar. Lirfur birkipélunnar klekjast hins vegar síðar að sumrinu og valda skemmdum eftir mitt sumar. Enn ríkir óvissa um hver munu verða langtímaáhrif þessara nýju skaðvalda þar sem báðar tegundir verða landlægar og faraldur beggja tegunda verður á sama ári, en það er áhyggjuefni þar sem birki er lykiltegund í íslenskum vistkerfum.



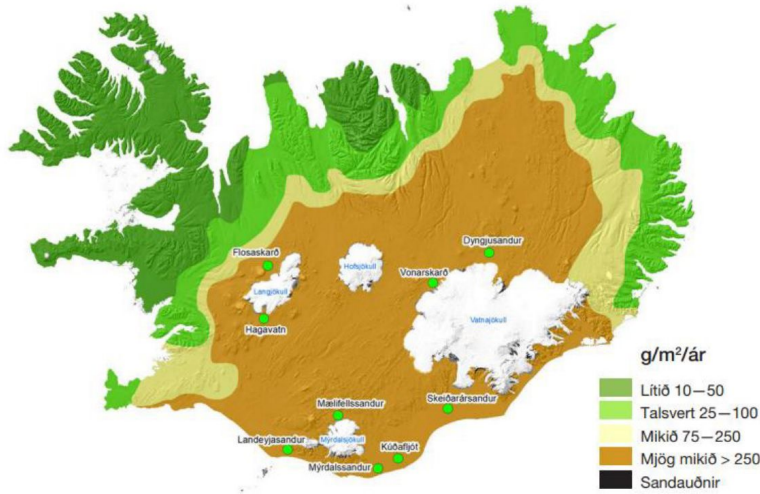
Mynd 4.19: Ný meindýr á trjám og runnum á Íslandi frá 1900. Rauð tákn eru tegundir sem valda miklu tjóni. Blá tákn eru tegundir sem valda töluverðu eða litlu tjóni. Svört tákn eru tegundir sem hafa numið land en hefur tekist að útrýma. (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019b, birt með leyfi).

4.2.4.3 Landgræðsla

Sameinuðu þjóðirnar hafa útnefnt þennan áratug (2021-2030) „Áratug endurheimtar vistkerfa“ (*e. UN Decade on Restoration*) sem ætti að efla slíkt starf á Íslandi enn frekar. Frá því að V2018 kom út hóf Landgræðslan nýtt og umfangsmikið vöktunarverkefni á gróðri og jarðvegi á Íslandi, GróLind, sem mun samanstanda af ríflega 1000 vöktunarreitum þegar uppsetningu verður lokið með áherslu á að tengja mæligögn við fjarkönnun og skráningu landeigenda sjálfra um ástand lands í um smáforrit. Samhliða vöktuninni fara fram mælingar á sauðfjárbreit og kortlagning beitilanda í samstarfi við bændur (Marteinsdóttir o.fl., 2021). Þetta, og önnur ný vöktunarverkefni á öðrum stofnunum, munu nýtast vel til að fylgjast með breytingum á gróðri og jarðvegi af völdum loftslagsbreytinga í framtíðinni.

Ýmsar nýjar rannsóknir á áhrifum beitar búsmala á gróðurfar hafa einnig verið unnar á síðustu árum (t.d. Marteinsdóttir o.fl., 2017; Baldvinsdóttir o.fl., 2020) og nú standa yfir rannsóknir á því hvernig samspil búsmala og villtra beitardýra getur haft áhrif á gróðurfar (Barrio o.fl., 2022; Boulanger-Lapointe o.fl., 2022) og á kolefnisforða jarðvegs (Anna Guðrún Þórhallsdóttir, pers. uppl.). Aukinn skilningur á áhrifum beitar gerir okkur kleift að skilja betur áhrif loftslagsbreytinga, þar sem báðir þessir þættir hafa samtímis umtalsverð áhrif á náttúruna, ýmist samvirk eða gagnvirk. Stofnar villtra beitardýra, bæði spendýra og skordýra, stjórnast einnig að hluta af veðurfarsaðstæðum og því skýra loftslagsbreytingar stundum sveiflur í náttúrulegu beitarálagi. Gott dæmi um það er aukin útbreiðsla innlendu fiðrildategundarinnar ertuyglu á síðustu þremur áratugum, en faraldrar hennar geta haft talsverð áhrif á lifun og æxlunarárangur vissra plöntutegunda (Brynja Hrafnkelsdóttir o.fl., 2019b). Einnig er hafin vinna við notkun hermílkana til að skilja betur langtímaáhrif beitar og annarrar landnýtingar (Barrio o.fl., 2018; Mulloy o.fl., 2021). Þörf er á frekar rannsóknum á því.

Umtalsverðar rannsóknir hafa farið fram á síðustu árum á áhrifum uppblásturs á áfok ryks í ólíkum landshlutum, en alls berast árlega um 30-40 milljón tonn af ryki upp í andrúmsloftið frá auðnum Íslands (Ólafur Arnalds o.fl., 2016; Ólafur Arnalds o.fl., 2019a; Ólafur Arnalds o.fl., 2019b; Meinander o.fl., 2022). Slíkt áfok leiðir ekki bara til jarðvegsþykknunar þar sem það lendir, heldur hefur margvísleg önnur áhrif á bæði samfélag manna (loftgæði og öryggi) og á náttúruna. Sem dæmi hefur verið sýnt fram á að varppéttleiki bæði votlendis- og landfugla hérlendis, hefur jákvætt samband við áfokið (T. G. Gunnarsson o.fl., 2015). Eins og sést á mynd 4.20 er upptök áfoks hérlendis einkum að finna á eldvirka beltinu, einkum á sandauðnum við hopandi jökla eða frá hlaupfarvegum stórra jökuláa. Loftslagsbreytingar munu væntanlega auka áfok hérlendis vegna aukinnar jökulbráðunar og áframhaldandi jökulhopunar, aukinnar tíðni stórviðra, þegar jörð er auð og vegna hlýnandi veðurfars (AMAP, 2021). Áhrif áfoksins á bráðnun jökla hérlendis eru mælanleg (A. Gunnarsson o.fl., 2021) og ná langt út fyrir



Mynd 4.20: Dreifing áfoks á Íslandi mælt í $g/m^2/á$. Grænu punktarnir sýna mikilvirkustu uppblásturssvæðin. Endurgert eftir korti frá 2010 (Ólafur Arnalds, 2010; Ólafur Arnalds o.fl., 2019b).

landfugla hérlendis, hefur jákvætt samband við áfokið (T. G. Gunnarsson o.fl., 2015). Eins og sést á mynd 4.20 er upptök áfoks hérlendis einkum að finna á eldvirka beltinu, einkum á sandauðnum við hopandi jökla eða frá hlaupfarvegum stórra jökuláa. Loftslagsbreytingar munu væntanlega auka áfok hérlendis vegna aukinnar jökulbráðunar og áframhaldandi jökulhopunar, aukinnar tíðni stórviðra, þegar jörð er auð og vegna hlýnandi veðurfars (AMAP, 2021). Áhrif áfoksins á bráðnun jökla hérlendis eru mælanleg (A. Gunnarsson o.fl., 2021) og ná langt út fyrir

Ísland, eða allt að 1000 km, og þar með á t.d. bráðnunarhraða Grænlandsjökuls (Boy o.fl., 2019; Meinander o.fl., 2022).

4.3 Kolefnishringrás Íslands og mótvægisáðgerðir tengdar landi

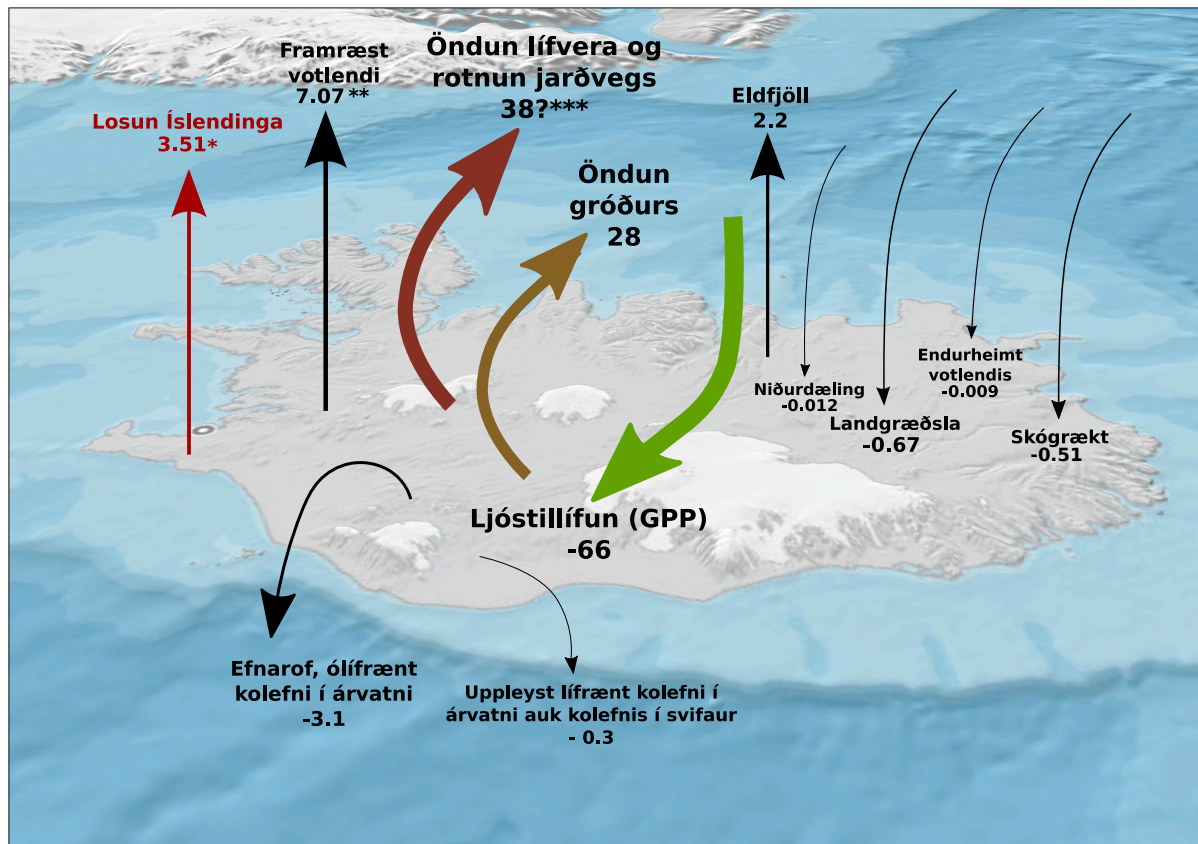
4.3.1 Kolefnishringrás Íslands

Árið 2012 kom út bók um kolefnishringrás Íslands og sýndi hún í fyrsta sinn stöðu þekkingar á ýmsum lífrænum og ólífrænum ferlum sem tengjast hringrásinni (Sigurður Reynir Gíslason, 2012), líkt og IPCC gerir fyrir jörðina alla (IPCC Working Group I, 2021). Í V2018 voru þessar upplýsingar uppfærðar með nýrri stöðu þekkingar á þeim tíma. Mynd 4.21 sýnir aðra uppfærslu á kolefnishringrásinni.

Stærsta talan í kolefnishringrás Íslands er árleg náttúruleg upptaka CO_2 úr andrúmslofti með ljóstillifun gróðurs (GPP; samtals um 66 milljón tonn CO_2 ; mynd 4.21) og það á einnig við kolefnishringrás landmassa jarðar í heild (IPCC Working Group I, 2021). Matið á GPP Íslands byggist á gervilnattamælingum á blaðgrænustuðli (e. *NDVI*) og grófri flokkun á gróðurlendum þess (Kardjilov, 2008; Sigurður Reynir Gíslason, 2012). Næststærstu tölurnar eru árleg losun CO_2 frá landi sem skiptist í öndun gróðurs (28 milljónir tonna CO_2 ; e. *autotrophic respiration*), öndun lífvera og rotnun jarðvegs (e. *heterotrophic respiration*). Hér er árleg öndun lífvera og rotnun gróflega áætluð 38 milljónir tonna CO_2 og forsendan er að magnið í náttúrulegu CO_2 hringrásinni inn og út er þá það sama ef vistkerfi landsins væru í „langtímajafnvægi“, eða 66 milljónir tonna af CO_2 . Það þýðir að þetta mat á losun nær ekki til t.d. aukinnar losunar vegna framræslu lands eða landhnignunar. Það er einkum þessi síðasti þáttur (öndun/rotnun/tap jarðvegs) sem mikil óvissa ríkir um hver staðan er nákvæmlega núna og mikilvægt er að efla rannsóknir á (Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon, 2019; VSÓ, 2021) Í nýrri bók um íslenskan jarðveg (Ólafur Arnalds, 2023) er tap CO_2 vegna landhnignunar, sem hefur orðið hér frá landnámi, gróflega áætlað um 1300 milljón tonn CO_2 , eða um 1,3 milljónir tonna CO_2 á ári síðustu 1000 árin. Hins vegar skortir meiri rannsóknir á því hvernig jöfnuður CO_2 er á slíku þurrlandi í dag og hvaða áhrif núverandi landnýting, svo sem beit búsmala (Ross o.fl., 2016), hefur á hann.

Af öðrum þáttum vegur áætluð losun frá framræstu votlendi þyngst, eða um 7,1 milljónir tonna CO_2 árlega (mynd 4.21). Þetta mat hefur lækkað um 17% frá V2018, aðallega vegna þess að landhalli var tekinn inn í kortlagningu á framræstu landi sem leiddi til minnkunar á kortlögðu flatarmáli þess (Jóhann Þórrsson, pers. uppl.). Ennþá eru almennir losunarstuðlar IPCC fyrir Norður-Evrópu (5,7 og 7,9 tonn CO_2 /ha/ári fyrir framræst graslandi og akurlendi) notaðir til að meta þessa losun sem mögulega getur valdið skekkju við okkar aðstæður. Rannsóknir á breytingu á kolefnisforða jarðvegs í framræstu landi (Sunna Áskelsdóttir, 2012; Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, 2017; Þóroddur Sveinsson o.fl., 2022; Ólafur Arnalds, 2023) og beinar mælingar á árlegum jöfnuði CO_2 flæðis (Brynhildur Bjarnadóttir o.fl., 2021) eru enn ekki nægilega margar til að hægt sé að miða slíka landsstuðla fyrir allt framræst gras- eða akurlendi landsins út frá þeim. Því er mikilvægt að slíkar rannsóknir og vöktun verði aukin (Þorsteinn Guðmundsson, 2018; Ólafur Arnalds, 2023; Loftslagsráð, 2023). Jafnvel þó að það komi í ljós að losun frá framræstu akurlendi væri hér helmingi minni á ferkílómetra en nú er áætlað með almennum losunarstuðlum IPCC þá væri hún eftir sem áður stór hluti af heildar-kolefnislosun landsins. Langtímatilraunir Landbúnaðarháskóla Íslands benda til að kolefnisforði jarðvegs breytist lítið við túnrækt á þurrlandi (Sunna Áskelsdóttir, 2012) eða geti jafnvel aukist umtalsvert við ákveðnar aðstæður (sandrækt) (Þorsteinn Guðmundsson o.fl., 2018), en önnur akurræktun, þar sem tíðari jarðvinnslu er beitt en almennt er gert í túnræktinni, hefur ekki verið mikið rannsökuð hér enn.

Eins og Loftslagsráð hefur nýlega bent á (Loftslagsráð, 2023) þá er losun GHG vegna landnotkunar hlutfallslega mikil hér á landi og því mikilvægt að tölur um kolefnisbúskap vistkerfa séu vel undirbyggðar með vönduðum rannsóknum og vöktun (VSÓ, 2021). Einnig bendir ráðið



Mynd 4.21: Einfölduð mynd af kolefnishringrás Íslands sem er nú uppfærð frá því að hún kom út í V2018. Tölur standa fyrir flæði kolefnis í milljónum tonna CO₂ á ári. Jákvæðar tölur sýna losun frá landi út í andrúmsloft en neikvæðar sýna upptöku CO₂ úr andrúmslofti. Tölur um CO₂ losun Íslendinga, losun frá framræstu votlendi og upptöku með skógrækt, landgræðslu, endurheimt votlendis og niðurdælingu í berg eru fyrir árið 2021 (Carbfix og Mannvit, 2022; Keller o.fl., 2023) en tölur fyrir losun frá eldfjöllum, árlega heildarkolefnisupptöku gróðurs (GPP), árlega öndun gróðurs og jarðvegs (losun frá landi), efnarof og flutning kolefnis með árvatni eru áætlaðar fyrir árið 2006 (Sigurður Reynir Gíslason, 2012). Jöfnuður allra þessara ferla er um 8 milljón tonn CO₂ nettó-losun á hverju ári frá Íslandi. Athugið að þessar tölur taka ekki til annarra gróðurhúsalofttegunda (GHL), svo sem metans, og því ekki sambærilegar við svokölluð jafngildistonn GHL sem oft eru notuð um losunartölur. Þó að losun metans sé nokkuð vel þekkt á landsvísi þá sýna nýjar rannsóknir að náttúruleg metanbinding á sér einnig stað í þurrlendi héraðs (Maljanen o.fl., 2017), en óvissa ríkir enn um stærðargráðuna á landsvísi.

(*)Bein losun CO₂ út í andrúmsloftið af mannavöldum vegna orku, iðnaðar og efnatöknar, úrgangs og landbúnaðar. Aðrar gróðurhúsalofttegundir eru ekki meðtaldar né losun vegna landnýtingar (t.d. framræsla votlendis). Að auki er alþjóðlegt flug og sigling flutningaskipa ekki talið með.

(**) Losun CO₂ úr framræstu votlendi, sem annaðhvort hefur verið breytt í ræktað land eða er flokkað sem almennt graslandi, var áætlað út frá kortlögðu flatarmáli með losunarstuðlum IPCC fyrir N-Evrópu (Keller o.fl., 2023).

(***) Hvað kolefnisjöfnuð Íslands varðar er mest óvissa í „losun frá landi“. Að hluta skarast jöfnuðurinn við það magn CO₂ sem áætlað er að losni árlega frá framræstu votlendi.

á að losun vegna landnotkunar hefur ekki fallið undir skuldbindingar Íslands í loftslagsmálum hingað til og hefur því ekki verið látin sæta bindandi markmiðum um raunsamdrátt í nettólosun, en það muni breytast frá og með árinu 2026.

Árleg áætluð jarðfræðileg losun CO_2 frá möttlinum undir Íslandi er óbreytt frá V2018, eða um 2,2 milljónir tonna árlega að jafnaði (mynd 4.21 (Sigurður Reynir Gíslason, 2012)). Barry et al. 2014 mátu þetta flæði með þremur ólíkum aðferðum og fengu 0,1 til 10,1 milljónir tonna CO_2 á ári, sem sýnir óvissuna sem er á þessari losun. Jarðfræðileg binding með efnarofi (efnaveðrun) í jarðvegi og bergi landsins, sem að mestu berst til hafs með árvatni, er einnig óbreytt frá V2018, eða um 3,2 milljónir tonna CO_2 á ári. Það sama má segja um flutning lífræns kolefnis í árvatni og svifaur, 0,3 milljónir tonna CO_2 á ári (Sigurður Reynir Gíslason, 2012).

Árið 2021 var bein losun manna á CO_2 um 3,5 milljónir tonna (mynd 4.21) og hafði aukist um 4,5% frá 2015 (sjá V2018). Þetta er talsvert áhyggjuefni þar sem markmið Íslands, innan loftslagsmarkmiða Evrópusambandsins, er að ná 29% samdrætti í losun GHG frá árinu 2005 (Keller o.fl., 2023). Það enn og tíminn er orðinn mjög knappur til aðgerða eins og Loftslagsráð hefur nýlega bent á (Loftslagsráð, 2023).

4.3.2 Mótvægisáðgerðir tengdar landi

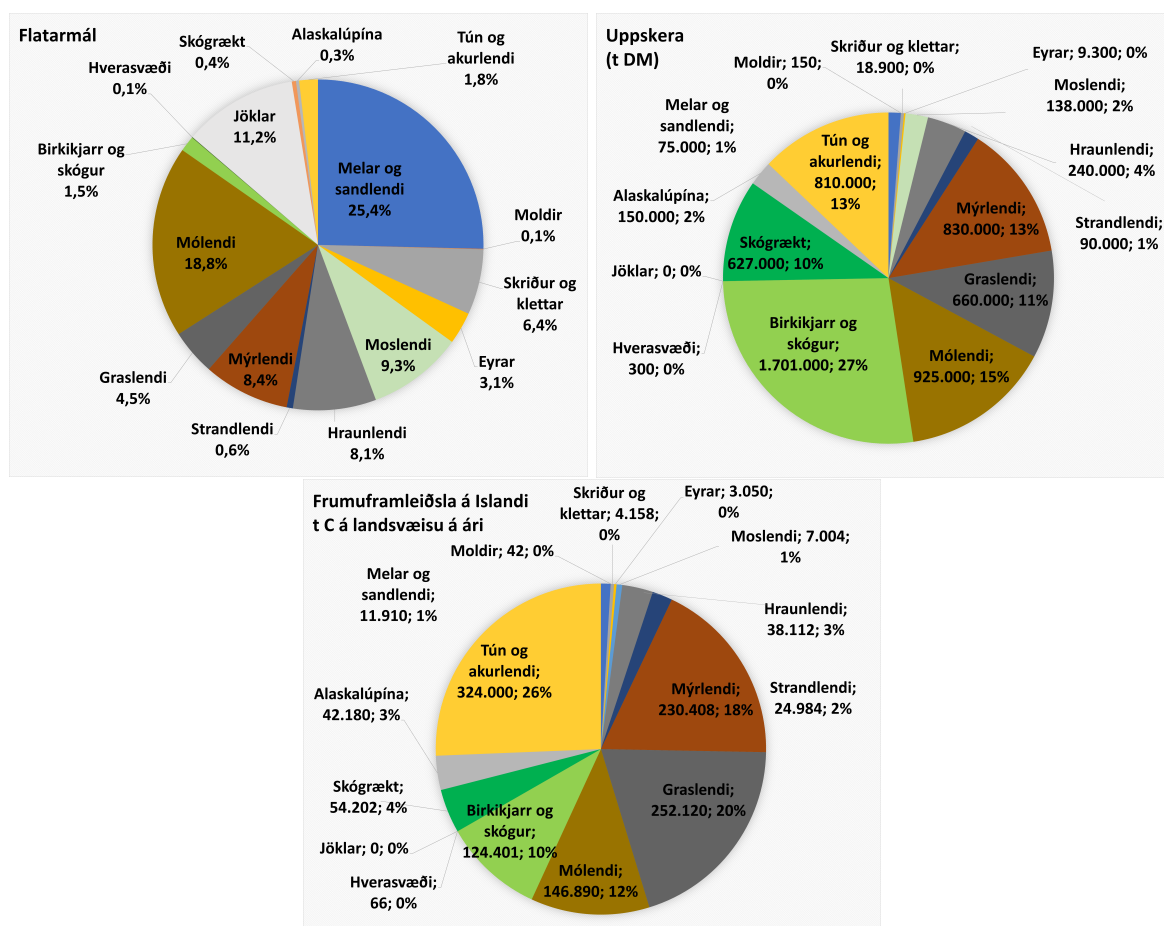
Skipta má þeim mótvægisáðgerðum sem hér eru ræddar í tvo hópa. Annars vegar áðgerðir til að taka upp kolefni úr andrúmslofti og binda það og hins vegar áðgerðir sem draga úr losun frá landi. Áðgerðir í fyrri hópnum binda kolefni til mislangs tíma. Binding í bergi (Snæbjörnsdóttir o.fl., 2020) er varanleg en það fer eftir aðstæðum og aðferðum hvort binding með skógrækt eða landgræðslu er til áratuga eða árhundraða og er nokkur vísindaleg umræða um það hvernig best er að reikna slíka bindingu til lengri tíma (sjá t.d. Parisa o.fl., 2022; Ruseva o.fl., 2020). Áðgerðir til að draga úr losun frá landi, t.d. með endurheimt votlendis, eru í sjálfu sér ekki binding (heldur forðun losunar) en áhrifin geta verið til langs tíma. Til að bera áðgerðir saman má meðhöndla samdrátt í losun á ári og bindingu á ári á sama hátt. Þótt þarna sé um eðlisólíkar áðgerðir að ræða eiga landgræðsla, skógrækt og endurheimt votlendis það sameiginlegt að þeim geta einnig fylgt umtalsverð jákvæð hliðaráhrif.

Á móti beinni losun CO_2 og losun vegna framræslu lands, sem samtals var metin 10,6 milljón tonn CO_2 árið 2021 (mynd 4.21), má telja fjórar gerðir mótvægisáðgerða til að binda kolefni eða draga úr losun þess sem samtals tóku upp 1,2 milljónir tonna CO_2 á því ári (um 11% af samanlagðri CO_2 losun). Hlutdeild mismunandi bindileiða árið 2021 var 65%, 43%, 1% og <1% vegna landgræðslu, skógræktar, niðurdælingar á innlendu CO_2 og endurheimtar votlendis. Þessar tölur byggjast á (Keller o.fl., 2023; Carbfix og Mannvit, 2022), nema hvað samdráttur í losun CO_2 vegna endurheimts votlendis (1180 ha) var metinn með losunarstuðlum IPCC miðað við að það hefði áfram verið framræst graslendi (5,7 tonn CO_2 /ha/ári). Árleg metin kolefnisbinding (eða samdráttur losunar vegna endurheimtar) hefur aukist um 33% frá 2015 (sjá V2018). Þessi aukning er bæði vegna meiri mótvægisáðgerða á síðustu árum en einnig að hluta vegna aldursháðrar aukningar í bindihraða skóga sem er tekinn út á landsvísu á fimm ára fresti (A. Snorrason, 2020; A. Snorrason, 2022a).

Nýir hvatar sem stjórnvöld hafa komið á eftir 2020 til að hvetja einkageirann til þátttöku í verkefnum sem snúa að mótvægisáðgerðum gegn loftslagsbreytingum (Alþingi, 2020), svo og stóraukinn áhugi, bæði innlendra og erlendra fyrirtækja og annarra einkaaðila, á að kosta slík verkefni, eru smátt og smátt að auka þunga þeirra.

4.3.3 Ný þekking á kolefnisforða ofanjarðar

Þegar vistgerðaflokkun Íslands var gefin út af Náttúrufræðistofun Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl., 2017) þá varð mögulegt að áætla gróflga magn standandi lífamassa gróðurs á öllu landinu og þar með kolefnisforða ofanjarðar (Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon, 2019). Eins og sjá má á mynd 4.22 þá þekja náttúruskógar, skógræktarsvæði og tún aðeins 3,7% landsins en á þessum vistgerðum standa um 50% af ofanjarðarlífmassa landsins. Annað vel gróið land, mýrlendi, mólendi og graslendi, þekja samtals um 32% landsins og bera 39% af ofanjarðarlífmassanum. Þar sem standandi lífmassi í skógum samanstendur af uppsöfnuðum vexti margra ára, meðan önnur, svo sem graslendi eða tún, fella allan ofnjarðarlífmassa sinn á hverju hausti, þá gefur þetta ekki rétta mynd af hlutfallslegu mikilvægi þessara vistgerða í árlegri kolefnisupptöku í lífmassa. Þegar tillit hefur verið tekið til þessa fæst ofanjarðarframleiðni (e. *Aboveground Net Primary Production* eða ANPP) og þar sést að árlegur ofanjarðarvöxtur í náttúru Íslands er metinn um 1,3 milljónir tonna C, sem svarar til um 4,8 milljóna tonna CO₂. Þetta er 7% af áætlaðri heildarframleiðni (GPP) landsins (Kardjilov, 2008), sem er í nokkuð góðu samræmi við þær tvær mælingar sem farið hafa fram hérlandis á ANPP:GPP hlutfalli í íslenskum vistkerfum (Brynhildur Bjarnadóttir o.fl., 2009; Brynhildur Bjarnadóttir o.fl., 2021).



Mynd 4.22: **Efst til vinstri:** Hlutfallslegt flatarmál 14 megingerða vistlendis landsins (samtals 98.510 km²). **Efst til hægri:** Standandi lífmassi ofanjarðar í gróðri (tonn þurrefnis; alls 6,3 milljónir tonna). **Neðst:** Ofanjarðarframleiðni (tonn C/ári; alls 1,26 milljónir tonna C). (Heimild Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon (2019)).

Það stingur í augun á mynd 4.22, þegar hlutdeild í ANPP er skoðuð, að tún og akurlendi sem aðeins þekja 1,8% landsins, hafa lagmesta árlega nettóframleiðni ofanjarðar, eða 26% af heildar-nettó-framleiðni landsins. Þetta þýðir þó ekki að þessi vistgerð hafi mikla kolefnisbindingu

til lengri tíma litið þar sem allur þessi lífmassi er annaðhvort hirtur eða sölnar og fellur til jarðar og rotnar á hverju hausti. Kolefnisbinding vistkerfa felst í langtímabreytingu á standandi kolefnisforða ofanjarðar eða í jarðvegi, sem er ekki það sama og árleg kolefnisupptaka (GPP) eða nettó-ofanjarðarframleiðni (ANPP). Mikill misskilningur virðist vera meðal margra aðila um hvernig kolefnisbinding vistkerfa er reiknuð og hvernig hún er frábrugðin t.d. GPP eða ANPP. Taka má mörg dæmi um slíkt í nýlegum skrifum á samfélagsmiðlum og í fjölmiðlum hérlendis. Slíkt er að valda óþarfa ruglingi í huga almennings og hagaðila.

4.4 Áhrif loftslagsbreytinga í ferskvatni

4.4.1 Vöktun og rannsóknir á lífríki ferskvatns

Loftslagsbreytingar hafa haft víðtæk áhrif á lífríki í fersku vatni. Þannig eru mörg dæmi um áberandi og stöðuga þróun sem sýnir bein áhrif á útbreiðslu, svipgerð, lífeðlisfræði og lífssögu, ásamt því að hafa almennt áhrif á lífslíkur tegunda yfir álagstíma. Þessi áhrif má einnig rekja til aukinnar tíðni alvarlegra skammtímaveðuröfga (s.s. hitabylgja, þurrka og flóða) á undanförunum árum sem getur fjölgað slíkum álagstímum og lengt þá.

Skammtímaveðuröfgar geta í sumum tilfellum verið meiri áhrifavaldar en meðalbreytingar til lengri tíma litið (sjá t.d. ágríp fyrir stefnumótendur í IPCC, 2022).

Loftslagsbreytingar geta einnig ýtt undir annars konar óbein og neikvæð áhrif, eins og aukna samkeppni milli innlendra og aðfluttra tegunda, eða milli afbrigða innan tegunda, ýkt neikvæð áhrif manngerðra áhrifaþátta, eins og hindrana (s.s. stíflumannvirkja) sem koma í veg fyrir far tegunda, aukið tíðni sjúkdóma, minnkað þol gagnvart sjúkdómum, flýtt fyrir landnámi ágengra tegunda og fjölgað tilfellum ofauðgunar (*e. eutrophication*) með aukinni ákomu næringarefna (IPCC, 2022; Reid o.fl., 2019). Þessi loftslagstengdu áhrif eru þegar farin að sjást í vistkerfum íslenskra ferskvatna.

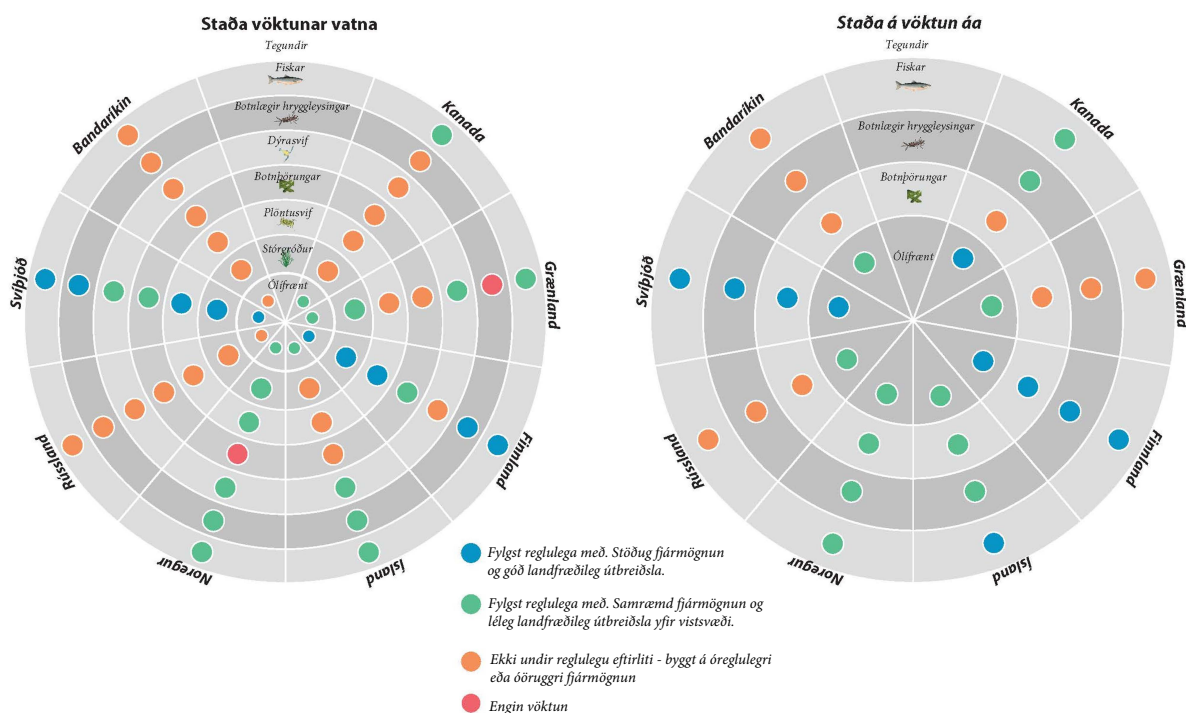
Vöktun á þáttum sem tengjast loftslagsbreytingum verður sífellt mikilvægari því þekking á áhrifum þeirra er lykilforsenda fyrir skynsamlega nýtingu tegunda og verndun fjölbreytileika, ásamt því að aðlögun með mótvægiságerðum verður markvissari ef hún er byggð á þekkingu um hugsanleg viðbrögð náttúrulegra stofna við slíkum breytingum (Pörtner o.fl., 2021). Með langtímavöktun á lífríki fæst mikilvæg þekking í formi gagna um þær lífræðilegu breytingar sem hafa orðið samhliða breytingum á loftslagi. Á Íslandi sinna nokkrir mismunandi aðilar rannsóknum og vöktun á lífríki í ferskvatni með ólíkum áherslum, en vöktun má skilgreina sem kerfisbundnar end-



Mynd 4.23: Vatnssýni tekið úr Krossá á Skarðsströnd í tengslum við vöktun vegna Vöktunaráætlunar vatnaáætlunar 2022-2027 (Ljósmynd Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi)

urteknar mælingar. Vöktun á ferskvatni á Íslandi er að mestu leyti framkvæmd af opinberum rannsóknastofnunum og háskólum en einnig af sjálfstæðum rannsóknaraðilum. Í nýlegri skýrslu sem gerð var í tengslum við vinnu CBMP (e. *Circumpolar Biodiversity Monitoring Program*) vinnuhóps Norðurskautsráðsins um verndun lífríkis á Norðurskautinu (e. *Conservation of Arctic Flora and Fauna, CAFF*) má finna úttekt á stöðu rannsókna og vöktunar á vistkerfisþáttum í bæði ám og vötnum, í aðildarríkjunum átta sem eiga sæti í Norðurskautsráðinu (CAFF, 2019).

Meginniðurstöðurnar voru þær að öll aðildarríkin hafa góð gögn til að stuðla að grunnþekkingu á stöðu líffræðilegrar fjölbreytni. Eingöngu tvö lönd, Finnland og Svíþjóð, voru með nægjanlega landfræðilega dreifingu. Fá lönd voru með nógu langa tímaröð gagna til að fá góða þekkingu á núverandi stöðu og afleiðingum hugsanlegra breytinga á líffræðilegri fjölbreytni í ferskvatni (mynd 4.24). Í vinnu CAFF hefur verið lögð áhersla á ákveðna lykilþætti og að mælingar séu gerðar með samræmdum hætti til að auðvelda samanburð á milli svæða og landa.



Mynd 4.24: Staða vöktunar í ám (hægri mynd) og vötnum (vinstri mynd) í þeim átta löndum sem eiga sæti í Norðurskautsráðinu. Skoðað var staða vöktunar út frá mismunandi hópum lífvera sem og út frá ólífrænum þáttum í vistkerfinu. Mynd íslenskuð úr CAFF 2019

Í úttektinni var bent á að gögn fyrir Ísland kæmu aðallega úr þremur áttum, (1) úr skammtíma-verkefnum eins og mati á umhverfisáhrifum, (2) úr langtíma-verkefnum sem tengjast rannsóknum á svæðum þar sem framleiðni og/eða fjölbreytileiki er mikill og (3) úr vöktunum á ám og/eða vötnum þar sem nýttjar á fiski eru stundaðar með veiðum. Hluti af verkum CBMP vinnuhópsins var að taka saman yfirlit (e. *metadata*) yfir þau gögn sem safnað hefur verið hér á landi og eru birt eða aðgengileg á annan hátt. Ennfremur var bent á að þrátt fyrir að vöktunarverkefni á Íslandi væru að stórum hluta fjármögnuð af opinberum aðilum væri ekki til staðar neinn miðlægur gagnagrunnur. Skortur á opnum gagnagrunni er endurómun á einni af þeim fimm tillögum til úrbóta sem verkefnahópur Vísinda- og tækniráðs um rannsóknarinnviði og vöktun lagði til í skýrslu þar sem kortlagning og framtíðarsýn vöktunar á Íslandi var gerð skil (Vísinda- og Tækniráð, 2017). Lagði vinnuhópurinn til að unnið yrði að opnum aðgangi að opinberum gögnum. Taldi hópurinn að með því að gera fleirum kleift að nálgast gögn sem safnað er fyrir opinbert fé mætti auka til muna hagnýtingu þeirra til stenfnumótunar, eftirlits, rannsókna og nýsköpunar og efla þannig ávinning ríkisins af vöktun.

Nýlega var tekið mikilvægt skref til að samræma og auka vöktun á ferskvatnslífríki með vöktunaráætlun vatnatilskipunar. Vatnatilskipun var innleidd árið 2011 með samþykkt laga um stjórn vatnamála í samræmi við vatnatilskipun Evrópusambandsins (*e. Water Framework Directive of the European Union*). Í kjölfarið var vöktunaráætlun stjórnvalda í vatnamálum (Vatnaáætlun Íslands 2022-2027) sett fram árið 2022 og var ætlað að gilda í fimm ár (Umhverfisstofnun, 2022). Í fyrrnefndri úttekt CBMP-vinnuhóps um stöðu rannsókna og vöktunar var tekið fram að innleiðing vatnatilskipunar myndi bæta vöktun og auka við landfræðilega útbreiðslu gagna fyrir Ísland og bæta þannig við mikilvægri þekkingu á lífríki ferskvatns (CAFF, 2019). Vöktun vatnatilskipunar nær yfir grunnvatn og alla flokka yfirborðsvatns, þ.e. straumvötn, stöðuvötn, árosavatn og strandsjó. Vöktunin snýr að tilteknum vistfræðilegum mælibreytum, svo sem varðandi algengustu lífverur, vatnsmagn, straumhraða, efnainnihald og grunnvatnsstöðu. Umhverfisstofnun stýrir vöktuninni og Hafrannsóknastofnun, Veðurstofa Íslands og Náttúrufræðistofnun Íslands munu annast faglega ráðgjöf vegna framkvæmdarinnar. Þessi vöktun mun ekki eingöngu gagnast stjórnvöldum við verndun vatns og vistkerfa þess og stuðla að sjálfbærri nýtingu vatnsauðlinda heldur einnig skila mikilvægri þekkingu með mælingum á breytingum sem verða vegna náttúrulegra og manngerðra áhrifaþátta.

Samhliða vöktun á lífríki ferskvatns þarf stýrðar rannsóknir til að svara spurningum um hvaða umhverfisþættir það eru sem hugsanlega valda þeim breytingum sem verða við hlýnun jarðar. Slíkar upplýsingar gætu komið að gagni við að spá fyrir um aðlögun lífvera að breyttu umhverfi. Þetta er einkum mikilvægt vegna þess að þær sviðsmyndir sem ræddar voru í kafla 3 benda til þess að líkur séu á að fram komi áður óþekkt umhverfisskilyrði fyrir lífverur á Íslandi. Sem dæmi um slíka stýrða rannsókn á lífríki ferskvatns er fjölbjóðlegt samstarfsverkefni á misheitum lækjum í Hengladölum árin 2004-2008 (EURO-LIMPACS). Þar var markmiðið meðal annars að meta áhrif hlýnunar með samanburði á lífríki í lækjum með mismunandi hitastig. Auk þess voru stýrðar rannsóknir gerðar með því að hita vatn í köldum læk og skoða samtímis áhrif vatnshita og næringarefna. Fjallað var um verkefnið í síðustu skýrslu vísindanefndarinnar (V2018) en með rannsókninni fengust mikilvægar upplýsingar um áhrif hlýnunar á marga mismunandi vistkerfisþætti frá frumframleiðni og lífmassa þörungna, þéttleika, fjölbreytileika og lífsferla hryggleysingja, upp í stofnstærð fiska (sjá samantekt O’Gorman o.fl. (2012)).

Frá síðustu skýrslu vísindanefndarinnar hafa birst nýjar vísindagreinar þar sem tilraunauppsetningin í Hengladölum hefur verið höfð sem fyrirmynd. Þannig sýndu Nyquist og fleiri 2021 fram á að langlífi fullorðinna rykmýsfluga af ættkvíslinni *Diamesa* (kulmý) breytist eftir því við hvaða hitastig þær alast upp. Þannig lifðu fullorðnar flugur, sem klekjast út við 6 °C, í 13-32 daga, meðan rykmýsflugur sem klöktust út við 20 °C lifðu aðeins í 1-5 daga. Tegundir innan *Diamesa*-ættkvíslarinnar eru kuldakærar og getur hlýnun þannig haft töluverð neikvæð áhrif á lífsferil þeirra. Nelson og fleiri 2020 sýndu hins vegar fram á að viðbrögð tegunda við hlýnun geta verið misjöfn og það jafnvel þó að um mjög skyldar tegundir sé að ræða. Tilraunir þeirra í Hengladölum leiddu í ljós að hlýnun um 3,8 °C hafði neikvæð áhrif á fjölda, lífmassa og vöxt tveggja tegunda bitmýs (*Prosimulium ursinum* og *Simulium vernum*) á meðan að önnur bitmýstegund (*Simulium vittatum*) jókst í fjölda og lífmassa, ásamt því að fjöldi kynslóða náði að vera fleiri en eitt yfir árið í upphituum tilraunalækjum samanborið við eitt klak í viðmiðunarlækjum. Enn fremur hafa vísindagreinar, sem byggjast á rannsóknum í Hengladölum, leitt í ljós að viðbrögð við hlýnun geta verið afar ólík eftir vistkerfum. Þannig eru t.d. kaldir lækir oftast með fjölbreyttari og fjölliðari samfélög hryggleysingja á meðan samfélög í heitari lækjum eru einsleitari og oftast einkennast samfélögin af tegundum sem aðlagðar eru miklum hita og finnast ekki víða (Woodward o.fl., 2010). Vísbendingar eru um að samfélög af fyrri gerðinni séu viðkvæmari gagnvart hlýnun en þau vistkerfi sem eru einfaldari að samsetningu (Nelson o.fl., 2020b).

Ekki er alltaf einhlýtt að tegundum fækki í kjölfar áhrifa hlýnunar. Líkt og fjallað var um í kaflanum 2.4 hér að framan hafa jöklar á Íslandi skroppið saman um 19% af hámarksflatarmáli, auk þess sem nokkrir smáir jöklar hafa horfið alveg. Í rannsókn, sem gerð var á tæplega 500

sýnum sem safnað var á árunum 1978-2013 frá tíu mismunandi svæðum í Bandaríkjunum, Nýja Sjálandi og Evrópu, þar á meðal Íslandi, voru breytingar á samfélagi hryggleysingja skoðaðar í jökulám í kjölfar þess að jöklar rýrna (L. E. Brown o.fl., 2018). Rannsókn Brown o.fl. 2018 náði yfir 1,23 milljón hryggleysingja þvert yfir níu líffræðilega mismunandi svæði í þeim þremur heimsálfum sem safnað var. Eftir að hafa gert grein fyrir kerfis- og svæðisbundnum áhrifum breiddargráðu kom í ljós að sömu ferlar mótuðu virkni fjölbreytileika hryggleysingja í ám á heimsvísu. Greiningar bentu til þess að fjölbreytileiki innan vistkerfa hryggleysingja jókst eftir því sem jökulþekja minnkaði.

Mikilvægt er að rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga taki mið af þessum breytileika sem finnst milli tegunda og umhverfisaðstæðna. Nýlegar rannsóknir á samsetningu samfélaga hryggleysingja í 49 mismunandi lindum á Íslandi benda til þess að fjölbreytileiki og samsetning samfélaga hryggleysingja í lindarvatni ráðist, líkt og í Hengladölum, að miklu leyti af hitastigi. Ákveðnar, sérhæfðar tegundir finnast í heitum uppsprettum meðan lífríki kaldra linda einkennast af tegundum sem hafa víðari dreifingu. Í sömu rannsókn kom auk þess fram að fjölbreytileiki tegunda fór eftir því hvar söfnun á hryggleysingjum fór fram. Þannig var jákvæð fylgni á milli fjölbreytni og hitastigs í yfirborði linda, meðan þetta samband var neikvætt þegar safnað var nálægt uppsprettu lindarvatnsins (Kreiling o.fl., 2022). Niðurstöðurnar benda til þess að huga þurfi vel að söfnunaraðferð við mælingar á tegundafjölbreytni, einkum á svæðum og hjá tegundum þar sem ætla má að breytileiki sé háður umhverfisaðstæðum.

4.4.2 Líffræðilegur fjölbreytileiki - Bleiklax í Norður-Atlantshafi

Fjöldi tegundahópa í ferskvatni á Íslandi er almennt lítill samanborið við nálæg lönd. Meginástæða þess er landfræðileg einangrun ásamt því að tiltölulega stutt er frá síðustu ísöld, um 10.000 ár. Ísland býr hins vegar yfir töluverðum fjölbreytileika þegar kemur að búsvæðum sem mótast meðal annars af jarðskorpuhreyfingum og eldvirki. Þessi fjölbreytileiki, samhliða ólíkum skilyrðum samanborið við meginlandið, svo sem vegna lítillar samkeppni milli tegunda, hefur leitt af sér fjölbreytni svipgerða innan tegunda, ólíkra stofna og mismunandi afbrigða. Sífelld fleiri vísbendingar eru um að erfðafræðilegar breytingar séu að eiga sér stað hjá tegundum sem verða fyrir áhrifum umhverfisbreytinga enda þrýstingur á tegundir að aðlagast breyttum aðstæðum. Í sumum tilfellum gerast breytingarnar í umhverfi tegunda hraðar en svo að þær nái að aðlagast og getur það haft talsvert neikvæð áhrif á líffræðilegan fjölbreytileika þar sem afbrigði eða erfðaeiginleikar tegunda geta tapast vegna breyttra umhverfisskilyrða. Sumar tegundir eru lagðar að þröngum, sérhæfðum umhverfisskilyrðum, svo sem hvað varðar búsvæði, æxlun eða fæðu, meðan aðrar tegundir geta lifað við breytilegri skilyrði og geta auðveldlega breytt fæðuvali eða fært sig úr óhagstæðum skilyrðum yfir á betri.

Oft eru það tegundir sem lifa við sérhæfð skilyrði sem eru viðkvæmari fyrir umhverfisbreytingum. Þannig hefur útrýming stofna, sem hægt er að tengja við loftslagsbreytingar, verið meiri á hitabeltissvæðum (55 %) en á tempruðum svæðum (39 %), meiri í ferskvatni (74 %) en í sjó (51 %) og á landi (46 %) og einnig meiri hjá dýrategundum (50 %) en plöntum (39 %) (IPCC, 2022; Reid o.fl., 2019). Af þessum ástæðum getur breytileiki innan tegunda leikið lykilhlutverk í aðlögunarhæfni þeirra og mikilvægt að slíkur breytileiki sé einnig varðveittur, enda mögulegt að það geti ráðið úrslitum varðandi viðkomu tegunda til frambúðar. Líkt og fjallað var um hér að framan (sjá umfjöllun í kafla 4.1.3 og sérgrein 4A) hafa aðildarþjóðir samnings Sameinuðu þjóðanna um líffræðilega fjölbreytni (CBD COP-15) samþykkt mikilvægt ákvæði um verndun líffræðilegrar fjölbreytni til ársins 2030 (e. *Global Biodiversity Framework*) og því ljóst að mikil áhersla verður lögð á þennan málaflökk á komandi árum.

Tegundafjöldi fiska í ferskvatni er minni á Íslandi en á meginlandi Evrópu og í Ameríku, þannig eru eingöngu sjö tegundir fiska sem finnast í ferskvatni á Íslandi en eru til dæmis 29 á Írlandi og 42 í Noregi. Tvær af þessum sjö tegundum fiska eru nýlegir landnemar, annars vegar flundra (*Platichthys flesus*) sem er talin hafa komið til landsins frá Færeyjum og hins vegar hnúðlax (*Oncorhynchus gorboscha*) sem fannst fyrst á Íslandi árið 1960 en hefur síðustu ár

margfaldast í ám á Norður-Atlantshafi. Á Íslandi hefur veiddum hnúðlögum fjölgað undanfarin ár, frá níu árið 2015 yfir í 339 sumarið 2021. Í nýlegri rannsókn Hafrannsóknastofnunar í samstarfi við erlenda sérfræðinga var í fyrsta skipti staðfest að hnúðlax hefur hrygnt í nokkrum ám sumarið 2021 (Skóra o.fl., 2023). Í vísindaveiðum í maí 2022 fundust meðal annars um 570 hnúðlaxagönguseiði í Botnsá í Hvalfirði og voru þau á leið til sjávar. Gönguseiði hnúðlaxa eru smávakin eða eingöngu um 3,2 cm og um eitt gramm, en til samanburðar er algengt að gönguseiði Atlanshafslaxa séu um 11-15 cm þegar þau ganga til sjávar (mynd 4.25). Umrædd hnúðlaxaseiði í Botnsá eiga uppruna sinn úr hrygningu sumarið 2021, en þau ganga öll til sjávar á fæðuslóð skömmu eftir að þau klekjast út. Hnúðlaxarnir ljúka tveggja ára lífsferli sínum með því að ganga til baka upp í árnar til hrygningar eftir að hafa dvalið eitt ár í sjó. Stofn hnúðlaxa sem hrygnir á sléttum ártölum er talsvert minni í Norður-Atlantshafi en sá stofn sem hrygnir á oddatöluártölum og því má búast við að hnúðlaxar séu einkum að veiðast annað hvert ár.



Mynd 4.25: Hnúðlax (*Oncorhynchus gorbusha*) er nýr landnemi í íslenskum ám. Fyrst varð vart við hann 1960 en honum hefur fjölgað undanfarin ár. Á efri mynd til vinstri sést hængur synda gegnum teljara sem staðsettur var í Langá á Mýrum sumarið 2021. Á neðri mynd til vinstri er gönguseiði sem veiddist á leið til sjávar í Botnsá í Hvalfirði í gildrur (fyke-net) sem settar voru upp til að rannsaka hnúðlaxagöngur. Gildrurnar eru sýndar á myndinni til hægri

Nýlegar rannsóknir á útbreiðslu tegunda sýna að um helmingur þeirra hafi aukið útbreiðslu ýmist til norðurs eða í meiri hæð yfir sjávarmáli þar sem hitastig er nær því sem tegundirnar hafa áður aðlagast (IPCC, 2022). Margar tegundir, sem eru aðlagðar lífi í fersku vatni, geta átt erfitt með að færa sig úr stað og samkvæmt mælingum hafa stofnar ferskvatnstegunda minnkað töluvert meira en tegunda í sjó, eða á landi (Jeppesen o.fl., 2012). Hnúðlax er, ólíkt þessu mynstri, að auka útbreiðslu sína frá Barentshafi til suðurs eftir Norður-Atlantshafi allt frá Norður-Noregi suður til áa í Þýskalandi og Frakklandi (ICES, 2022). Ástæðan fyrir því að hnúðlaxar, ólíkt flestum tegundum, leita suður í kjölfar hækkanði hitastigs er að tegundin er aðflutt frá Kyrrhafsströnd Rússlands til Hvítahafs við norðvesturströnd Rússlands þar sem hún náði að aðlagast. Vísbendingar eru um að hækkanði sjávarhiti í Norður-Atlantshafi og Barentshafi, ásamt minni hafís á norðlægum slóðum, eigi þátt í stækkanði stofni hnúðlaxa á þessum norðlægu slóðum (VKM o.fl., 2020; Diaz-Pauli o.fl., 2022). Loftslagsbreytingar voru einnig nefndar sem líkleg ástæða fyrir mikilli fjölgun hnúðlaxa í þeirra náttúrulegu heimkynnum við Kyrrhaf á síðari hluta 20. aldar. Sú mikla aukning sem varð á hnúðlaxi í Kyrrahafi er talin

hafa haft neikvæð áhrif á aðrar tegundir laxa og á stofna sjófugla vegna beinnar samkeppni um fæðu. Til að mynda var hægt að sjá marktæk áhrif á varpárangur og klaktíma hjá tegundum eins og ritu (*Rissa tridactyla*) og heiðmáfum (*Larus glaucescens*) á þann hátt að tegundunum vegnaði betur á sléttum árum miðað við oddatöluárin sem er í öfugum takti við aukna stofnstærð hnúðlaxa (Springer og Vliet, 2014). Það er því rík ástæða til að fylgjast vel með þessari miklu aukningu hnúðlaxa sem er að eiga sér stað í Norður-Atlantshafi. Tegundin er framandi og enn er ekki ljóst hvort hún verður ágeng og þá hvaða afleiðingar það getur haft í för með sér varðandi áhrif á vistkerfið.

Í meistararitgerð Hjörleifs Finnssonar 2021 við Háskólasetur Vestfjarða voru skoðuð stjórnunarleg viðbrögð við skyndilegri fjölgun hnúðlaxa á Íslandi. Niðurstöðurnar bentu til að viðbrögðin hafi takmarkast við skráningu á veiði og móttöku sýna sem bárust frá veiðimönnum. Engar rannsóknir eða ferlar voru virkjaðir og þekking því takmörkuð á grunnþáttum í vistfræði hnúðlaxa og engar áætlanir til um kerfisbundna vöktun. Einnig benti Hjörleifur á að engar áætlanir, verkferlar eða skipulega samhæfðar aðferðir liggja fyrir sem viðbragð við komu framandi tegunda og hvort flokka skuli þær sem ágengar. Mikilvægt er að auka rannsóknir á hnúðlaxi, bæði í ferskvatni og sjó, til að öðlast nauðsynlega þekkingu til að bregðast við með viðeigandi mótþægisaðgerðum, sé þess kostur. Þetta á einnig almennt við um nýjar framandi tegundir sem geta orðið ágengar og, ef ekkert er að gert, orðið ógn við líffræðilega fjölbreytni. Rannsókn Hjörleifs veitir innsýn í vandamál stjórnunar á framandi og ágengum tegundum á Íslandi og í henni eru settar fram tillögur um lausnir á þeim (Hjörleifur Finnsson, 2021).

4.4.3 Hlýnun Þingvallavatns - samspil bleikju og urriða

Í nýlegu þemahefti Náttúrufræðingsins, tímariti Hins íslenska náttúrufræðifélags, sem tileinkað er Dr. Pétri M. Jónassyni, eru birtar margar ítarlegar greinar um vöktun og rannsóknir á lífríki Þingvallavatns. Þar kemur meðal annars fram að á árunum 1962–2017 hefur ársmeðalhiti í útfallinu hækkað um 0,15 °C á áratug. Mest er hlýnunin að sumri með 1,3–1,6 °C hækkun á meðalhita hvers mánaðar í júní, júlí og ágúst, en hlýnunin nær einnig til hausts og fram á vetur en í minna mæli (0,7–1,1 °C). Engin mælanleg breyting hefur hins vegar orðið í febrúar, mars og apríl. Breyting hefur orðið á ísalögum þannig að Þingvallavatn leggur bæði sjaldnar og seinna en áður og ís brotnar fyrr upp (Hilmar J. Malmquist o.fl., 2020). Jóhannes Sturlaugsson líffræðingur hjá rannsóknafyrirtækinu Laxfiskum hefur stundað samfellda vöktun á vatnshita í Öxará frá árinu 2003. Einnig vaktaði Jóhannes vatnshita á ýmsum svæðum í Þingvallavatni frá 2003 til þess tíma að vöktun opinberra aðila á vatnshita komust í fastar skorður 2007. Í því sambandi má nefna vöktun á vatnshita árið um kring á mismunandi dýpi í Sandeyjardjúpi frá yfirborði og niður á 100m dýpi, sem var í fyrsta sinn sem samfelldar mælingar á mismunandi dýpi voru framkvæmdar yfir heilt ár í Þingvallavatni (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson o.fl., 2009; Jóhannes Sturlaugsson, án árs) Auk þessa hefur samfelldum hitagögnum verið safnað úr Þingvallavatni frá árinu 2003 fyrir tilstilli notkunar rafeindafiskmerkja sem mæla vatnshita (mælimerki og hljóðsendimerki) í rannsóknum Jóhannesar Sturlaugssonar á atferlisvistfræði urriða og í samskonar rannsóknum hans á atferlisvistfræði bleikju 2018–2020 (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, 2016; Jóhannes Sturlaugsson, 2020; Jóhannes Sturlaugsson, 2023b). Í fyrri skýrslu vísindanefndar var fjallað talsvert um Þingvallavatn og þau áhrif sem þessar breytingar hafa haft á vistkerfi vatnsins (V2018). Þannig hafa mælst breytingar á efnasamsetningu vegna ákomu næringarefna (Eydís Eiríksdóttir og Sigurður Reynir Gíslason, 2020), ásamt því að breytingar hafa komið fram í magni og samsetningu sviflægra þörunga (Gunnar Steinn Jónsson, 2022).

Þegar vatnið hlýnar í maí-júní, hlýnar efsta lagið fyrst. Eðlisþyngdarmunur verður á milli hlýs yfirborðsvatns og kaldara dýpra vatns og það dregur úr blöndun. Á sama tíma er orðinn skortur á næringarefnum í vatninu (nitur) og þörungar hætta að fjölga sér og hverfa, sérstaklega af yfirborðinu. Um sumarið eru sokknir þörungar oft í miklu magni í kaldara og þyngra djúpvatni. Hvassviðri að sumri brýtur upp þetta ástand og veldur blöndun, þar sem sokknir þörungar

og næringarefni ná að berast til efri laga og stuðla tímabundið að nývexti þörungasvifs við yfirborðið. Þegar hitaskilin verða sterk, þannig að vindur nær ekki að hræra upp í vatnssúlunni hverfa næringarefni úr efra laginu og hefur það neikvæð áhrif á vöxt svifþörungum sem gæti haft keðjuverkandi áhrif upp fæðukeðjuna í vatnsbolnum. Líklegt er að slíki hitaskil verði algengari með hlýnandi loftslagi (Finnur Ingimarsson o.fl., 2020) en óvíst er hvaða áhrif það, ásamt áðurnefndri breytingu á ísalögum að vetri og mögulega aukinni ákomu næringarefna, muni hafa á svifvist vatnsins. Auk þess sem hækkun vatnshita á grunnslóð verður meiri getur hátt hitastig þar varað langt fram á haustið.

Viðamiklar rannsóknir voru gerðar á fiski- stofnum Þingvallavatns á árunum 1983-1984 og var byggt á stöðluðum veiðum í öllum búsvæðum. Þessar rannsóknir sýndu að í vatninu var þéttleiki bleikjuafbrigðanna fjögurra; kuðungableikju, dvergbleikju, murtu og sílableikju mjög mikill en urriðinn var í mikilli lægð. Frá þessum tíma hefur verið fylgst með hrygningarstofni murtu með árlegum sýnatökum við Mjóanes, en löng nýtingarhefð var fyrir netaveiðum á murtu, allt frá iðnaðarnýtingu til manneldis á árum áður til nýtingar heimamanna með netaveiðum og stangveiði en stangveiðileyfi eru seld á ákveðnum svæðum í Þingvallavatni. Fyrst byggðist vöktunin á sýnatöku úr afla bænda sem seldur var fyrirtækinu Ora, sem sá um niðursuðu á murtu til útflutnings, en frá því rétt eftir 1990 hefur sýnataka verið gerð á hrygningartíma þar sem veitt er með netum með mismunandi möskvastærð til að fá mat á stærðar- og aldursdreifingu hrygningarstofns murtunar. Fram hefur komið töluverður samdráttur í afla á murtu á hverja sóknareiningu sem gefur vísbendingar um fækkun í hrygningarstofni, auk þess sem breytingar mælast á magni sviflægra þörungum og krabbadýra sem eru ein aðalfæða murtunnar. Mælingar á hrygningarslóð í Mjóanesi haustið 2022 bentu til hruns á kynþroska murtum í Þingvallavatni og áberandi var hve hrognafullar hrygnur voru fáar samanborið við fyrri ár (Haraldur R. Ingvason o.fl., 2021). Vöktunin beinir sjónum að svifvist vatnsins og nær því eingöngu yfir murtuafbrigði bleikjunnar en hin þrjú afbrigðin hafa ekki verið vöktuð með sama hætti og murtan. Þó hafa verið tekin sýni til að áætla þéttleika þeirra árin 1992, 1993, 2001, 2002 og síðast 2020 (Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson, 2021). Þær mælingar sýna að afli á sóknareiningu annarra bleikjuafbrigða hefur minnkað niður í um þriðjung af því sem áður var.

Sumarið 2019 fóru fram rannsóknaveiðar í vatninu og beitt var sömu aðferðum og 1984, þannig að bera mætti saman niðurstöðurnar milli tímabila. Niðurstöður rannsóknaveiðanna sýna að miklar breytingar hafa orðið á silungastofnum í vatninu frá því sem var árið 1984. Þéttleiki urriða hefur vaxið töluvert meðan stofnar murtu, sílableikju og dvergbleikju virðast hafa hrunið. Einnig komu í ljós marktækar breytingar á vaxtarmynstri bleikjuafbrigðanna en árið 2019 var meðallengd kynþroska murtu og sílableikju nokkru meiri en árið 1984 og kynþroska dverg- og kuðungableikjur voru talsvert stærri. Vaxtarhraði ungvíðis hefur þannig aukist hjá öllum afbrigðum, þó mest hjá botnlægu afbrigðunum, dverg- og kuðungableikju (*Horta-Lacueya* og fleiri, í undirbúningi). Hafa þarf í huga að áður hafa komið fram breytingar í stofnstærð og kynþroskastærð murtu í Þingvallavatni. Afli murtu í veiðum til manneldis hrundi á níunda áratug síðustu aldar, frá því að vera um 63 tonn árið 1983 niður í enga veiði árið 1987. Ástæðan var rakin til breytinga í lengdardreifingu kynþroska murtu en á sama tíma og veiðin hrundi minnkaði meðallengd kynþroska hænga úr 18 í 13 cm og kynþroska hrygna úr 19 í 15 cm. Veiðar til manneldis voru þannig að eingöngu voru notuð net með einni möskvastærð (22 mm) og



Mynd 4.26: Bleikja (*Salvelinus alpinus*) hefur verið á undanhaldi í Þingvallavatni og víðar. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, birt með leyfi)

veiddust eingöngu kynþroska fiskar yfir 17,5 cm að lengd þannig að breytingar til lækkunar í meðallengd gerði það að verkum að fiskarnir veiddust ekki í slíkt net (S. S. Snorrason o.fl., 1992).

Í stýrðri rannsókn Tómasar Árnasonar og fleiri 2022 þar sem könnuð voru áhrif mismunandi hitastigs á vaxtarhraða bleikjuungviðis kom í ljós að hærri hiti, frá 7 °C og 10 °C yfir í 12 °C jók vaxtarhraða þannig að eftir 315 daga við 12 °C var meðalþyngd bleikjuseiða 49% meiri en við 7 °C og 19,2% meiri en við 10 °C. Eftir að öllum hópum hafði verið komið fyrir á sama hitastigi (7 °C) og þeim fylgt eftir fram að degi 654, kom í ljós að stærðarröðunin á seiðastiginu snerist við á fullorðinsaldri. Lækkandi sláturþyngd stafaði af því að bleikjan varð fyrr kynþroska eftir því sem hitinn var hærri á seiðastiginu. Þó að ofangreind rannsókn hafi farið fram í eldisumhverfi má leiða að því líkur að hitastig geti hafi sambærileg áhrif á villta bleikju. Í þessu samhengi er einnig vert að benda á að sífellt fleiri rannsóknir sýna neikvætt samband milli hitastigs og hámarksstærðar fiska (sjá t.d. Atkinson og Sibly, 1997; Lavin o.fl., 2022). Því gæti hlýnun leitt til þess að hámarksstærð minnki vegna áhrifa sem leiða til þess að fiskar verði fyrr kynþroska.

Niðurstöður mælinga í Þingvallavatni 2019 sýndu sama mynstur í vaxtarhraða og fékkst með stýrðu rannsókninni en hvað kynþroskaaldur varðar voru niðurstöðurnar tvíþéttar. Þannig mátti merkja að kynþroskaaldur dvergbleikjuhrygna hafi lækkað úr fjórum árum 1984 niður í tvö ár í mælingum árið 2019 en hjá murtunni hafði kynþroska seinkað um heilt ár að jafnaði (*Horta-Lacueya* og fleiri, í undirbúningi). Erfitt getur reynst að átta sig á áhrifum ofangreindra breytinga á meðalhæfni í stofnum bleikjuafbrigðanna, en þéttleikagögn benda til þess að þrjú afbrigðanna eigi mjög undir högg að sækja.

Sem dæmi um hugsanlegt orsakasamhengi má telja líklegt að aukinn vaxtarhraði og meiri stærð við kynþroska geti haft afgerandi áhrif á búsvæðaval dvergbleikju. Hún er löguð að því að nýta glufur milli steina á hörðum hraunbotni sem einkennir grunnslóð (0-8 m dýpi) víðast hvar í Þingvallavatni. Þetta búsvæði sér þessum smáu fiskum fyrir fæðu auk þess að verja þá fyrir afráni. Gögnin frá 2019 benda eindregið til þess að vegna aukinnar stærðar eigi dvergbleikjan miklu minni möguleika á að nýta sér þetta búsvæði og sé frekar berskjölduð fyrir samkeppni við kuðungableikju. Slíkar breytingar geta þannig haft mjög neikvæð áhrif á svona sérhæft afbrigði og raunveruleg hættu er á því að breytileiki innan tegunda geti tapast í kjölfarið.

Á sama tíma og þessar lífeðlisfræðilegu breytingar eru að eiga sér stað sem valda fækkun hjá bleikju í Þingvallavatni þá hefur verið mikill uppgangur í stofnstærð og þéttleika urriða í vatninu ef frá eru skilin síðustu tvö ár. Gleggstu gögnin um fjölgun urriðans á þessari öld eru frá yfirstandandi árlegum talningum Jóhannesar Sturlaugssonar á fjölda hrygningarurriða á riðstöðvum urriðans í Öxará en sú langtímavöktun hófst 2003 (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, án árs). Aðrar rannsóknir benda til sömu þróunar hjá urriðanum, bæði talningar hrygningarurriða á undanfórnum árum í Ölfusvatnsá frá árinu 2015 sem og í Efra-Sogi frá árinu 2006. Þær talningar sýna að fyrir Öxará og Ölfusvatnsá stækkuðu hrygningarstofnar lengst af en minnkuðu síðan töluvert 2021 og 2022. Í Efra-Sogi hefur hrygning verið falið, stóð í stað framan af en hefur minnkað nokkuð undangengin ár. Rannsóknirnar hafa staðfest að á öllum þessum svæðum sé urriðinn að hrygna árum saman, ýmist samfelld eða með hléum og um leið sýnt gagnsemi veida og sleppa fyrirkomulagsins í stangveiði sem stuðlar að endurtekinni hrygningu Þingvallaurriða (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, 2011; Jóhannes Sturlaugsson, 2016). Þessi uppgangur urriða var einnig staðfestur í vísindaveiðum Hafrannsóknastofnunar 2020 þar sem afli urriða á sóknareiningu hafði aukist miðað við sambærilegar mælingar sem gerðar voru 1992-1993 og 2001-2002, en bleikjuafllinn minnkað á sama tíma (Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson, 2021), sem og í nýlegum rannsóknum vísindamanna við Háskóla Íslands og Háskólans á Hólum (*Horta-Lacueya* og fleiri, í undirbúningi).

Urriði er afræningi á smáa bleikju og því má ætla að þessi mikla aukning á stofnstærð hans, samhliða breytingum á ætisframboði, vatnshita og lífeðlisfræði bleikjunnar, hafi aukið niðursveiflu í stofnstærð bleikjuafbrigða. Forsendur eru þó ekki til að leggja mat á það hvert vægi urriðans sé í niðursveiflu bleikjunnar fremur en vægi annarra þekktra þátta sem breyst hafa. Orsakasamhengið á breytingum á hitastigi Þingvallavatns, kynþroskaaldri og meðallengd

bleikju, uppgangi urriða, ásamt breytingum í stofnstærð krabbadýra, er ekki að fullu ljóst og því mikilvægt að halda áfram þeirri vöktun sem hefur verið á vatnshita, næringarefnum, svifþörungum en um leið auka vöktun á öllum fiskistofnum Þingvallavatns, hornsíla, urriða og fjórum afbrigðum bleikju og sem flestra lykilþátta í fæðukeðju þeirra. Einnig þarf að gera átak í að bæta veiðiskráningu afla, bæði í netaveiðum og stangveiði. Samhliða vöktun er aðkallandi að gera rannsóknir á því á hvaða lífsskeiðum bleikju áhrifin koma fram og eftir hvaða lífeðlis- og þroskunarfræðilegu ferlum það gerist.

Þingvallavatn hefur verið vaktað skipulega síðan árið 2007 samkvæmt vöktunaráætlun á vegum Umhverfisstofnunar, Landsvirkjunar, Orkuveitu Reykjavíkur, Þjóðgarðsins á Þingvöllum, Grímsness- og Grafningshrepps og Bláskógabyggðar. Vöktunin er byggð á grundvelli reglugerðar um verndun vatnasviðs og lífríkis Þingvallavatns og hafa framkvæmdaraðilar verið Náttúrufræðistofa Kópavogs og Jarðvísindastofnun Háskólans (síðar Hafrannsóknastofnun). Í nýlegri og endurbættari vöktunaráætlun fyrir Þingvallavatn fyrir árin 2019-2024, sem samin var af Umhverfisstofnun í tengslum við lög um stjórn vatnamála, er bætt við fyrri vöktun þannig að hún nær nú utan um fleiri þætti en áður. Sem dæmi verður bætt við sýnatöku á botnhryggleysingjum, vatnablöntum auk þess sem stundaðar verða rannsóknaveiðar á nokkurra ára fresti á öllum afbrigðum bleikju og urriða. Fyrsta slíka söfnunin, sem framkvæmd var af Hafrannsóknastofnun, fór fram sumarið 2020 og niðurstöðurnar birtar í skýrslu stofnunarinnar (Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson, 2021).

4.4.3.1 Mikilvægi samstarfs vöktunar- og rannsóknaraðila

Auk vöktunar í Þingvallavatni er mikilvægt að stundaðar séu rannsóknir sem geta aukið þekkingu og skilning á þeim breytingum sem eru að eiga sér stað og merkjanlegar eru. Í því ljósi má benda á tvær rannsóknir sem standa yfir í Þingvallavatni. Annars vegar rannsóknir vísindamanna Háskóla Íslands (HÍ) sem hafa síðustu ár verið að rannsaka farhegðun bleikjuafbrigða í Þingvallavatni með hljóðmerkjum sem numin eru af 38 hlustunarduflum sem búið er að koma fyrir í vatninu. Merkin, sem eru sett á bleikjuna, eru einnig með hita- og dýpismælum þannig að hægt er að skoða hvort bleikja haldi sig innan ákveðna hitamarka og þá á hvaða dýpi.



Mynd 4.27: Hrygningarurriðar á riðunum í Öxará. (Ljós. Jóhannes Sturlaugsson, birt með leyfi)

Hinsvegar eru það rannsóknir Jóhannes Sturlaugssonar hjá Laxfiskum á atferlivistfræði Þingvallaurriða sem hann hefur stundað óslitið frá árinu 2003 með notkun rafeindafiskmerkja (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, 2016; Jóhannes Sturlaugsson, 2023b). Í þessum rannsóknum, sem eiga uppruna sinn í forathugun Jóhannesar Sturlaugssonar og Hilmars Malmquist 2011, hafa verið merktir ríflega 170 urriðar en einnig hafa verið rannsakaðar bleikjur af mismunandi afbrigðum sem gefur möguleika á samanburði á atferli urriðans og murtunnar (Jóhannes Sturlaugsson, 2020). Árið 2007 merkti Jóhannes Sturlaugsson fáeinar bleikjur í Hagavík með slíkum merkjum sem höfðu dýptarnema og síðan aftur 2018 víðsvegar í Þingvallavatni þegar merktar voru 18 bleikjur sem voru 20-62 cm langar (murtur; kuðungableikjur og ránbleikjur), en vöktun þeirra gaf, auk landfræðilegra upplýsinga, gögn um bæði fiskdýpi og vatnshita frá gönguleið bleikjanna og stóð sú skráning fram á árið 2020 (Jóhannes Sturlaugsson, 2020). Þær rannsóknir sýndu að bleikjan fór um allt Þingvallavatn þ.m.t. murtan sem fór meðal annars um allra dýpstu

svæði Þingvallavatns (> 100m botndýpi). Hægt er að tengja niðurstöður þessara rannsókna við hitamælingar sem hafa verið gerðar í vatninu (Hilmar J. Malmquist o.fl., 2020).

Merkingar í vatnakerfi Þingvallavatns, hvort heldur er með rafeindfiskmerkjum eða hefðbundnum merkjum, gefa einnig upplýsingar um vaxtarhraða fiska þegar merktir fiskar endurveiðast. Sem dæmi má nefna mikinn árlegan vaxtarhraða hjá urriða í Þingvallavatni, ekki síst síðasta skeiðið áður en hann gengur í kynþroska. Þannig var um 51 cm ókynþroska urriði sem veiddist 22 mánuðum eftir að hafa verið merktur var árið 2007 þá orðin 78 cm (Jóhannes Sturlaugsson, 2023b). Rannsókn Laxfiska og Matís á magni kvikasilfurs og annarra óæskilegra snefilefna í urriða í Þingvallavatni sýndi að sterk fylgni var milli lengdar urriðans og magns kvikasilfurs í honum (Jóhannes Sturlaugsson o.fl., 2009). Lífmögnun er líklegasta ástæðan fyrir háum styrk kvikasilfurs í urriðum úr Þingvallavatni, sem verða venju stórir og gamlir, þar sem styrkur kvikasilfurs eykst eftir því sem ofar dregur í fæðukeðjunni.

Rannsóknir vísindamanna HÍ og Háskólans á Hólum ná einnig yfir það að reyna staðsetja hrygningarstaði laxfiska í Þingvallavatni með aðstoð fjarkönnunar og skoða hitabreytingar sem hrognin verða fyrir á mismunandi hrygningarstöðum. Þannig er unnt að áætla væntanlegan klaktíma, en fyrstu niðurstöður benda til þess að það geti munað allt að 40 dögum á klaktíma milli svæða sem kuðungableikja nýtir til hrygningar (Horta-Lacueva o.fl., 2022). Það er mikilvægt að þekkja vel hrygningartíma og staðsetningu hrygningar og hjálpa mælimerkjarannsóknir, bæði á urriða (Jóhannes Sturlaugsson, 2023b) og bleikju, til við að öðlast slíka þekkingu. Slíkt væri gagnlegt, bæði til að stýra veiðum í Þingvallavatni en einnig til að gera vöktun markvissari. Sem dæmi hafa hrygningarsvæði við Ólafsdrautt verið lokað fyrir veiði frá 15. júlí. Þegar hrygningarsvæði verða betur þekkt verður hægt að stýra veiðum og umferð í kringum svæðin á þann hátt að truflun á hrygningu verði sem minnst. Með hækkandi hitastigi verða kaldar uppsprettur Þingvallavatns enn mikilvægari en áður fyrir bleikjuna en kaldara vatn getur seinkað þroska bleikjuseiða um allt að mánuð og getur verið mikilvægt skjól fyrir bleikjuna samhliða hækkandi vatnshita (Horta-Lacueva o.fl., 2022).

Þessu tengt þá benda nýlegar rannsóknir á hornsílum (*Gasterosteus aculeatus*) í vötnum á Íslandi til þess að staðlaður efnaskiptahraði stofna á hlýjum svæðum sé hægari en stofna í köldu vatni. Hlýnun geti því leitt til þess að breytingar verði í efnaskiptahraða hornsíla til að aðlagast breyttum umhverfisskilyrðum. Höfundar benda þó á að samband erfða og umhverfis geti haft áhrif á slíka þróun þar sem líklegt er að einangraðir stofnar hornsíla, sem lifa í vötnum með einsleitu umhverfi með tilliti til hitastigs, geti sýnt slíka þróun fyrr heldur en stofnar hornsíla sem lifa í vötnum með breytilegu hitastigi og opnu genaflæði milli stofna, líkt og til dæmis er að finna í Mývatni (Pilakouta o.fl., 2020). Enn fremur er greinanlegur munur í atferli hjá stofnum hornsíla á þann hátt að einstaklingar, sem komu úr stofnum í heitum, einangruðum vötnum, voru ekki eins félagslyndir og einstaklingar úr kaldari vötnum. Líkt og með efnaskiptahraðann skiptir máli hversu mikið genaflæði er á milli stofna úr mismunandi umhverfi (Pilakouta o.fl., 2020). Þessar hornsílarannsóknir benda enn fremur á mikilvægi samspils milli erfða (genaflæði milli stofna og afbrigða), umhverfis (kaldar uppsprettur í hlýnandi vatni) og þroskunar (aukinn vaxtarhraði afbrigða) og beina þarf sjónum að öllum þessum þáttum við rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga.

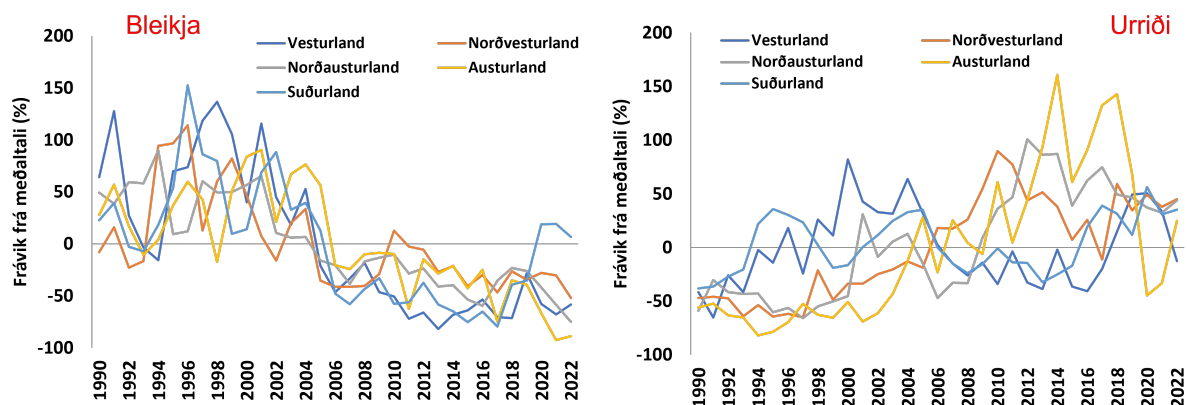
Vísindamenn við HÍ hafa einnig verið í samstarfi við Hafrannsóknastofnun þegar kemur að kortlagningu á skyldleika og stofnbyggingu urriða í Þingvallavatni og annars staðar í vatnakerfi Ölfusár en niðurstöður rannsóknar þeirra voru birtar í nýlegri vísindagrein (Lagunas o.fl., 2023). Í rannsókninni var urriði í fjórum vötnum, þar á meðal í Þingvallavatni, og í tólf ám veiddur og erfðaefni úr 300 fiskum greindur. Niðurstöðurnar varpa ljósi á uppbyggingu stofna urriða á vatnasviðinu. Stofnarnir hafa mótast af landslagsbreytingum í kjölfarið á hörfun ís eftir lok ísaldar og þannig hafa staðbundnir stofnar ofan fossa aðgreinst öðrum stofnum. Sem dæmi eru urriðar í Úfljótsvatni og Þingvallavatni, og aðrennslisám þeirra í Öxará og í Efra-Sogi, erfðafræðilega líkir en talsvert fjær í skyldleika við stofna neðar í vatnakerfinu. Með niðurstöðunum er einnig hægt að meta svokallaða *virka* stofnstærð (þ.e. fjölda fiska sem tímigast í hverri kynslóð) og reyndist

hún vera mjög lítil á flestum stöðum nema í Öxará og í Soginu (Lagunas o.fl., 2023).

Þegar litið er til allra þeirra rannsókna á stofnum urriða og bleikju sem framkvæmdar hafa verið af mörgum mismundandi aðilum þá er augljóst að gagnlegar upplýsingar geta fengist með samanburði á þeim gögnum, ekki síst með samráði varðandi útfærslu á þeim vöktunarverkefnum sem framkvæmd eru á sömu tímabilum. Auka þarf einnig samstarf milli rannsóknaraðila og vöktunaraðila og auka við opið aðgengi að gögnum sem safnað er í vöktunum á vegum opinbera aðila líkt og tillögur verkefnahóps Vísinda- og tækniráðs um rannsóknarinnviði og vöktun lagði til í skýrslu sem fjallað var um hér að framan (Vísinda- og Tækniráð, 2017).

4.4.4 Áframhaldandi þróun í stofnstærð laxfiska

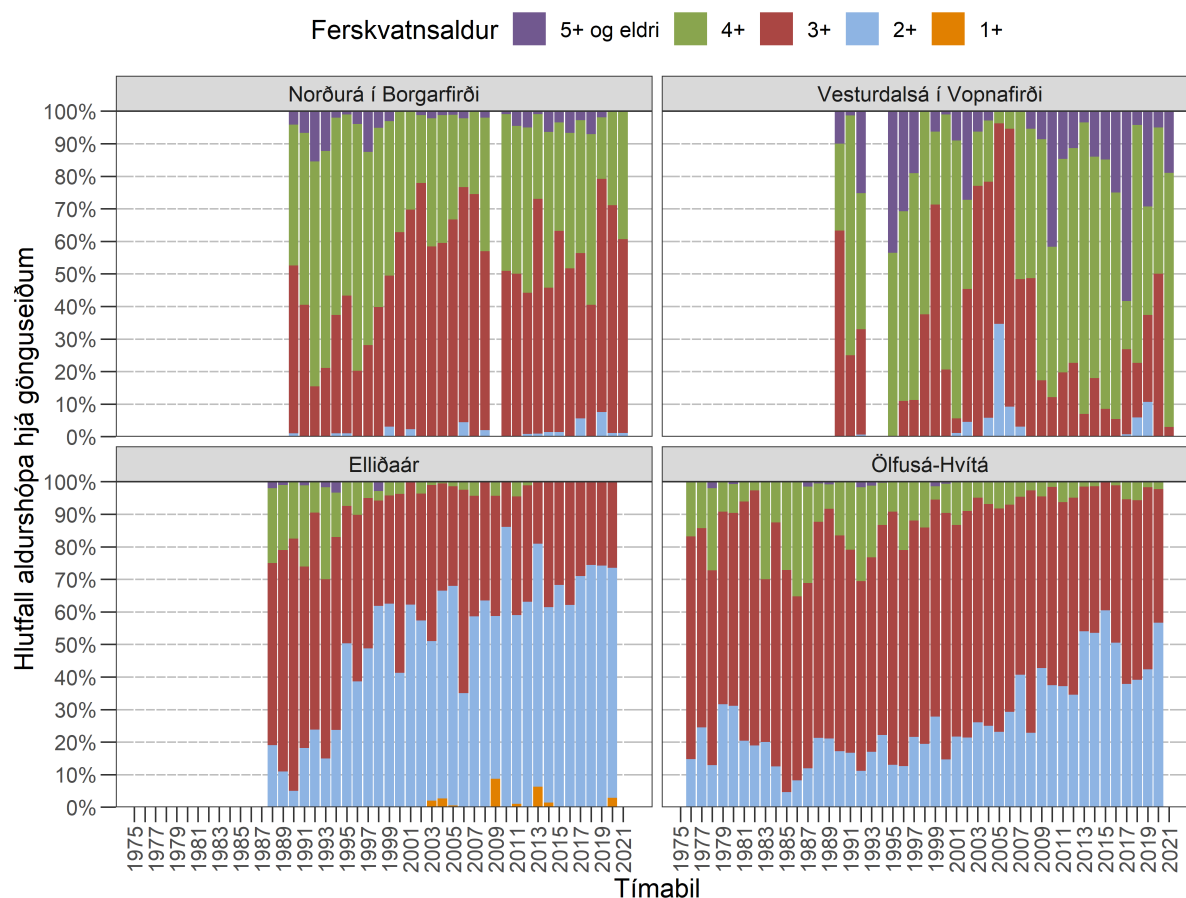
Samhliða niðursveiflu, sem er að greinast hjá bleikju í Þingvallavatni, hefur svipað mynstur verið í veiðitölum á bleikju á öllu landinu, bleikju hefur fækkað en urriða fjölgað (Guðmunda Björg Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson, 2023). Í nýbirttri grein Martin A. Svenning o.fl. 2021, þar sem bornar eru saman veiðitölur á Íslandi og í Norður-Noregi, kemur fram að hlutfallslegar breytingar eru greinanlegar hjá þremur tegundum laxfiska; laxi, bleikju og urriða í ferskvatni í báðum löndunum, en það eru einu svæðin í heiminum sem þessar þrjár tegundir lifa saman. Frá árinu 1993–2018 hafa verið tiltölulega litlar breytingar í heildarveiði á þessum þremur tegundum en hlutfallið hefur breyst þar sem bleikju fækkar töluvert og urriða fjölgar en veiðitölur á laxi standa í stað (mynd 4.28). Einnig má nefna að sú þróun sem sést hefur á hlutfalli bleikju og urriða í veiðitölum, og fjallað hefur verið um í fyrri skýrslum vísindanefndar (V2008-V2018), heldur áfram (Jeppesen o.fl., 2012; Guðmunda Björg Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson, 2023). Í öllum tilfellum eru loftslagsbreytingar nefndar sem mögulegur áhrifavaldur þótt ekki sé hægt að greina orsakasambandið af nákvæmni.



Mynd 4.28: Frávik í meðalveiði milli ára á bleikju og urriða (sjóbirtingi). Byggt á Guðmunda B. Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson (2023)

Þó að hlutfallslegar breytingar í veiði á laxi séu litlar er hægt að greina ákveðna þróun sem svipar til þess sem er að greinast hjá bleikjuafbrigðum í Þingvallavatni. Lífsferill laxins er tvískiptur, hann elst upp sem seiði í ferskvatni þangað til hann hefur náð nægilegri stærð til að geta gengið til sjávar í fæðuleit áður en hann kemur til baka eftir að hafa verið eitt til tvö ár í sjó. Á Íslandi getur það tekið laxaseiði 2-5 ár að ná gönguseiðastærð. Mælingar Hafrannsóknastofnunar í ám á Norðausturlandi sýna að sterk jákvæð tengsl eru milli vaxtarhraða og hitastigs hjá laxaseiðum, sérstaklega á fyrstu vaxtarárum þeirra (Hlynur Bárðarson o.fl., 2018). Hækkun vatnshita getur því stýtt kynslóðatíma og langtímavöktun á aldri gönguseiða laxa og vatnshita í Vesturdalsá í Vopnafirði sýnir sambandi þar sem aldur hækkar á tímum þegar vatnshiti er lágur og lækkar á tímum þegar vatnshiti hækkar. Vöktun á gönguseiðum laxa er aðeins gerð í þremur vatnsföllum á Íslandi; í Vesturdalsá (Hlynur Bárðarson o.fl., 2023), Elliðaám

(Þórólfur Antonsson og Friðþjófur Árnason, 2011; Jóhannes Sturlaugsson, 2023a) og í Kálfá sem er hliðará í Þjórsá (Magnús Jóhannsson og Benóný Jónsson, 2022). Einnig er hægt að greina aldur gönguseiða með því að skoða hreistursýni af fullorðnum fiskum eins og gert hefur verið lengi í Norðurá í Borgarfirði (Ásta Kristín Guðmundsdóttir og Sigurður Már Einarsson, 2022) og í Ölfusár-Hvítár-vatnakerfinu (Magnús Jóhannsson og Hlynur Bárðarson, 2021). Í Vesturdalsá er ekki merkjanleg þróun um lækkun á gönguseiðaldri en þegar skoðuð eru gögn frá öðrum landshlutum kemur í ljós að aldur gönguseiða hefur lækkað undanfarin ár, sem er svipuð þróun og er að greinast í kynþroskaaldri bleikju í Þingvallavatni. Þannig var algengast að laxaseiði þyrftu þrjú ár til að ná gönguseiðastærð í Elliðaám og í Ölfusá-Hvítá en undanfarin tíu ár hefur verið algengara að sjá tveggja ára gönguseiði í Elliðaám og sama hefur sést í Ölfusá-Hvítá. Á sama tímabili hefur algengasti gönguseiðaldur laxa í Norðurá í Borgarfirði breyst úr fjórum árum í þrjú (mynd 4.29).



Mynd 4.29: Ferskvatnsaldur gönguseiða lax í fjórum ám á Íslandi.

Svipaða lækkun á gönguseiðaldri laxaseiða er einnig hægt að greina í ám víða um Norður-Atlantshaf til að mynda í ánni Dee sem rennur um England og Wales þar sem meðalaldur gönguseiða lækkaði úr því að vera um tvö ár að meðaltali fyrir 1980 í að vera um 1,6 ár að meðaltali seinni hluta síðustu aldar (Aprahamian o.fl., 2008). Ekki eru til margar rannsóknir á áhrifum lækkandi aldris gönguseiða laxa en I. J. J. Moffett og fleiri 2006 greindu jákvætt marktækan mun á hrognastærð hjá laxahrygnum sem voru tvö ár að ná göngustærð samanborið við þær hrygnur sem voru eins árs við útgöngu í ánni Bush á Norður-Írlandi. Einnig voru vísbendingar um að klakarángur hefði verið betri í hrognum hrygna sem voru tveggja ára sem gönguseiði. Ekki er hægt að útiloka að aðrir áhrifaþættir en vatnshiti sé að valda lækkun í meðalaldris gönguseiða, svo sem þéttleikaháð áhrif seiða í ánum sem einnig hefur áhrif á vaxtarhraða (Magnús Jóhannsson o.fl., 2015). Ekki er heldur að fullu ljóst hvaða áhrif styttri

kynslóðatími getur haft á stofnstærðir og veiðinýtingu.

4.4.5 Nýrnasýking (PKD) – áhyggjuefni hlýnunar

Nýrnasýking (*e. Proliferative Kidney Disease; PKD*) er orsakabáttur sem veldur afföllum hjá laxfiskum, og tengist beint hækkandi vatnshita á þann hátt að sjúkdómurinn nær sér ekki á strik nema vatnshitinn hafi náð 12-15 °C í 1-3 mánuði (J. A. Brown o.fl., 1991). Fiskar geta verið einkennalausir smitberar við lægra hitastig og þannig getur sýkillinn haldist við í vistkerfinu. Rannsóknir Árna Kristmundssonar og fleiri 2010; 2011 á PKD í vötnum á Íslandi, sem framkvæmd var árið 2009, sýndu mjög háa smittíðni PKD í bleikju, eða 97% í Elliðavatni og 96% í Vífilsstaðavatni, meðan smittíðnin var mun lægri hjá urriða í sömu vötnum. Í Mývatni var smittíðni í bleikju einnig talsvert há (43%), en enginn fiskur sýndi einkenni sjúkdómsins. Nýlega birtu Árni Kristmundsson og samstarfsmenn niðurstöður rannsóknar þar sem skoðaðar voru breytingar á útbreiðslu sníkilsins *Tetracapsuloides bryosalmonae*, sem er orsakavaldur PKD-sýkingar (Kristmundsson o.fl., 2023). Rannsóknin náði yfir 34 vötn þar sem sýni af bæði bleikju og urriða voru tekin, annars vegar á tímabilinu 1994–1998 og hins vegar frá 2009–2017, og skoðað hvort PKD-sýking væri sýnileg og hvort sníkilinn *T. bryosalmonae* væri til staðar. Helstu niðurstöðurnar voru að á fyrra tímabilinu voru fiskar í 43% vatna með sníkilinn og voru það aðallega vötn á láglandi meðan hálendisvötn voru laus við sníkilinn. Af þessum vötnum var hins vegar bara eitt stöðuvatn, Vífilsstaðavatn, þar sem bleikja með PKD-sjúkdómseinkenni fannst. Á síðara tímabilinu var útbreiðslan orðin talsvert meiri með um 89% stöðuvatna þar sem fiskar sýktir af sniklinum fundust og sjúkdómseinkenni PKD greindist í 61% af vötnunum. Árni Kristmundsson o.fl. 2010; 2011; 2023 bentu á að PKD-nýrnasýki á Íslandi væri að öllum líkindum bein afleiðing af hlýnandi loftslagi. Mikil útbreiðsla smitefnisins í íslenskum vötnum væri einnig áhyggjuefni ef enn frekari hlýnun ætti sér stað. Sem dæmi er smittíðni há í Mývatni en vatnshitinn á mörkum þess að sýking geti þrífist. Mývatn er, líkt og Þingvallavatn, mikið rannsakað vatn og vaktad þegar kemur að öllu lífríki vatns. Til að mynda hefur silungur í vatninu verið vaktadur árlega allt frá árinu 1986 (Guðni Guðbergsson, 2021), en veiðar þar hafa alla tíð verið mjög mikilvæg hlunnindi fyrir samfélagið í Mývatnssveit og því til mikils að vinna að hámarka afla. Tvisvar hefur orðið algjört hrun í bleikjustofninum í Mývatni á þeim tíma sem vöktunin hefur staðið yfir, annars vegar árið 1988 og aftur 1997. Það tók bleikjustofninn þó nokkur ár að ná sér á strik eftir fyrra hrunið en segja má að stofninn sé ennþá að vinna sig upp úr hruninu sem varð 1997, þrátt fyrir að dregið hafi úr sókn og á tímabili beitt veiðibanni (Guðni Guðbergsson, 2021). Í nýlegri vísindagrein, þar sem niðurstöður vöktunar á bleikju í Mývatni eru skoðaðar með tilliti til aldurssamsetningar og veiðiálags, kemur í ljós að þrátt fyrir að veiðitakmörkun hafi haft jákvæð áhrif á stærð hrygningarstofns bleikjunnar þá hefur nýliðun, mæld í fjölda afkvæma eftir hvert foreldri, minnkað (Phillips o.fl., 2022). Þær niðurstöður benda í sömu átt og víðar hér á landi að viðkoma hefur minnkað hjá bleikju og að sama skapi hefur stærð þeirra einstaklinga sem ná að dafna aukist.

Heimildir

- Alfredsson, Matthías, Erling Ólafsson, Matthías Eydal, Ester Rut Unnsteinsdóttir, Kayleigh Hansford, William Wint, Neil Alexander og Jolyon M. Medlock (okt. 2017). „Surveillance of *Ixodes ricinus* ticks (Acari: Ixodidae) in Iceland“. Í: *Parasites and Vectors* 10.1, bls. 1–11. DOI: 10.1186/S13071-017-2375-2/FIGURES/5.
- Alþingi (2020). *Lög um breytingu á lögum um tekjuskatt, nr. 90/2003, með síðari breytingum (frádráttur vegna kolefnisjöfnunar)*. Legal Rule or Regulation. URL: <https://www.althingi.is/altext/150/s/1981.html>.
- AMAP (2021). *AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health*. Report. Arctic Monitoring og Assessment Programme (AMAP). URL: <https://www.amap.no/documents/download/6927/inline>.
- ANR (2020). *Loftslagsmál í nautgripærækt*. Tæknileg skýrsla. Atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið.
- Aprahamian, Miran W., Ian C. Davidson og Richard J. Cove (maí 2008). „Life history changes in Atlantic salmon from the River Dee, Wales“. en. Í: *Hydrobiologia* 602.1, bls. 61–78. ISSN: 1573-5117. DOI: 10.1007/s10750-008-9286-3. URL: <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9286-3> (skoðað 19.01.2023).
- Arnór Snorrason og Bjarki Þór Kjartansson (2004). „Íslensk skógarúttekt“. Í: *Skógræktarritið (Icelandic Forestry)* 2004.2, bls. 101–108.
- Arnór Snorrason, Björn Traustason, Bjarki Þór Kjartansson, Lárus Heiðarsson, Rúnar Ísleifsson og Ólafur Eggertsson (2016). „Náttúrulegt birki á Íslandi - Ný úttekt á útbreiðslu þess og ástandi“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 86.3-4, bls. 97–111.
- Atkinson, David og Richard M Sibly (1997). „Why are organisms usually bigger in colder environments? Making sense of a life history puzzle“. Í: *Trends in ecology & evolution* 12.6, bls. 235–239.
- Árnason, Tómas, Heiðís Smáradóttir, Helgi Thorarensen og Agnar Steinarsson (2022). „Effects of Early Thermal Environment on Growth, Age at Maturity, and Sexual Size Dimorphism in Arctic Charr“. Í: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.2, bls. 167. ISSN: 2077-1312. DOI: 10.3390/jmse10020167.
- Árni Kristmundsson, Þórólfur Antonsson og Friðþjófur Árnason (2011). „PKD- nýrnasýki í laxfiskastofnum á Íslandi með áherslu á vatnasvið Elliðaáa -þróun, áhrif og útbreiðsla sjúkdómsins og tengsl við breyttar umhverfisaðstæður“. Í: (VMST/11048), bls. 17. URL: https://www.hafogvatn.is/static/research/files/skra_0074067.pdf (skoðað 11.08.2023).
- Ásta Kristín Guðmundsdóttir og Sigurður Már Einarsson (2022). „Vöktun laxastofna á vatnasvæði Norðurár í Borgarfirði 2021“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir (HV 2022-08)*.
- Baldvinsdóttir, Guðridur, Sigþrúður Jónsdóttir og Bjarni D. Sigurðsson (2020). „Impact of different stocking densities of sheep on establishing stands of *Larix sibirica* in Iceland“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 33.8, bls. 89–101.
- Barrio, Isabel C., Laura Barbero-Palacios, Elina Kaarlejärvi, James D. M. Speed, Starri Heiðmarsson, David S. Hik og Eeva M. Soininen (2022). „What are the effects of herbivore diversity on tundra ecosystems? A systematic review protocol“. Í: *Environmental Evidence* 11.1, bls. 1. DOI: 10.1186/s13750-022-00257-z.
- Barrio, Isabel C., David S. Hik, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Bryndís Marteinsdóttir og Ingibjörg Svala Jónsdóttir (2018). „The sheep in wolf’s clothing? Recognizing threats for land degradation in Iceland using state-and-transition models“. Í: *Land Degradation & Development* 29.6, bls. 1714–1725. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2978>.
- Barry, P. H., D. R. Hilton, E. Füre, S. A. Halldórsson og K. Grönvold (2014). „Carbon isotope and abundance systematics of Icelandic geothermal gases, fluids and subglacial basalts with

- implications for mantle plume-related CO₂ fluxes“. Í: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 134, bls. 74–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.038>.
- Behrend, Anna Mariager (2019). „Natural succession after heavy grazing pressure - A case study of the birch forests of Þórsörk and Goðaland, southern Iceland“. MSc thesis.
- Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson (2021). „Vöktun laxfiska í Þingvallavatni 2020“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (KV 2021-5).
- Bergh, J, M Freeman, B D Sigurdsson, S Kellomäki, K Laitinen, S Niinistö, H Peltola og S Linder (2003). „Modelling the short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries“. Í: *Forest Ecology and Management* 183, bls. 327–340. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00117-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00117-8).
- Bjarni D. Sigurðsson, N. I. W. Leblans, Steven Dauwe, Elín Guðmundsdóttir, Per Gundersen, Gunnihildur E. Gunnarsdóttir, Martin Holmstrup, Krassimira Ilieva-Makulec, Thomas Kätterer, Bryndís Marteinsdóttir, Marja Maljanen, Edda S. Oddsdóttir, Ivika Ostonen, Josep Peñuelas, Christopher Poeplau, Andreas Richter, Páll Sigurðsson, Peter M. Van Bodegom, Hákan Wallander, James Weedon og Ivan Janssens (2016). „Geothermal ecosystems as natural climate change experiments: the ForHot research site in Iceland as a case study“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 29, bls. 53–71.
- Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon (2019). „Kolefnishringrás Íslands“. Í: *Rit Mógilsár* 37, bls. 17–24.
- Bjarni E. Guðleifsson (2004). „Áhrif væntanlegra loftslagsbreytinga á landbúnað á Íslandi“. Í: *Rit Fræðafélags landbúnaðarins* 2004, bls. 17–25.
- Bjorkman, Anne D., Mariana García Criado, Isla H. Myers-Smith, Virve Ravolainen, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Kristine Bakke Westergaard, James P. Lawler, Mora Aronsson, Bruce Bennett, Hans Gardfjell, Starri Heiðmarsson, Laerke Stewart og Signe Normand (2020). „Status and trends in Arctic vegetation: Evidence from experimental warming and long-term monitoring“. Í: *Ambio* 49.3, bls. 678–692. DOI: 10.1007/s13280-019-01161-6.
- Bjorkman, Anne D. o.fl. (2018). „Plant functional trait change across a warming tundra biome“. Í: *Nature* 562.7725, bls. 57–62. DOI: 10.1038/s41586-018-0563-7.
- Björgvin Brynjarsson, Börkur Smári Kristinsson og Eva Yngvadóttir (2020). *Kolefnisspor nautgriparáæktar á Íslandi 2018*. Report. EFLA Verkfræðistofa.
- Björn Þór Björnsson (2021). *Vatnsskortur í Múlaþingi vegna þurrka*. Newspaper Article. URL: <https://austurfrett.is/frettir/vatnsskortur-i-mulathingi-vegna-thurrka>.
- Björnsdóttir, Katrín, Isabel C. Barrio og Ingibjörg S. Jónsdóttir (2022). „Long-term warming manipulations reveal complex decomposition responses across different tundra vegetation types“. Í: *Arctic Science* 8.3, bls. 979–991. DOI: 10.1139/as-2020-0046.
- Borgþór Magnússon, Sigurður H. Magnússon, Kristbjörn Egilsson, Rannveig Thoroddsen, Járngerður Grétarsdóttir, Ingibjörg Eyþórsdóttir og Eyþór Einarsson (nóv. 2022a). *Gróðurbreytingar í Skaftafelli í kjölfar friðunar og hlýnandi veðurfars [Vegetation changes in Skaftafell during 1979–2018]*. Report. Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Borgþór Magnússon, Sigurður H. Magnússon, Kristbjörn Egilsson, Rannveig Thoroddsen, Járngerður Grétarsdóttir, Ingibjörg Eyþórsdóttir og Eyþór Einarsson (2022b). *Gróðurbreytingar í Skaftafelli í kjölfar friðunar og hlýnandi veðurfars*. Tæknileg skýrsla NI-22007. Garðabæ: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Boulanger-Lapointe, Noémie, Kristín Ágústsdóttir, Isabel C. Barrio, Mathilde Defourneaux, Rán Finnsdóttir, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Bryndís Marteinsdóttir, Carl Mitchell, Marteinn Möller, Ólafur Karl Nielsen, Arnór Þórir Sigfússon, Skarphéðinn G. Þórisson og Falk Huettmann (2022). „Herbivore species coexistence in changing rangeland ecosystems: First high resolution national open-source and open-access ensemble models for Iceland“. Í: *Science of The Total Environment* 845, bls. 157140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157140>.

- Boy, M., E. S. Thomson, J. C. Acosta Navarro, O. Arnalds, E. Batchvarova, J. Bäck, F. Berninger, M. Bilde, Z. Brousseau, P. Dagsson-Waldhauserova, D. Castarède, M. Dalirian, G. de Leeuw, M. Dragosics, E. M. Duplissy, J. Duplissy, A. M. L. Ekman, K. Fang, J. C. Gallet, M. Glasius, S. E. Gryning, H. Grythe, H. C. Hansson, M. Hansson, E. Isaksson, T. Iversen, I. Jonsdóttir, V. Kasurinen, A. Kirkevåg, A. Korhola, R. Krejci, J. E. Kristjánsson, H. K. Lappalainen, A. Lauri, M. Leppäranta, H. Lihavainen, R. Makkonen, A. Massling, O. Meinander, E. D. Nilsson, H. Olafsson, J. B. C. Pettersson, N. L. Prisle, I. Riipinen, P. Roldin, M. Ruppel, M. Salter, M. Sand, Ø Seland, H. Seppä, H. Skov, J. Soares, A. Stohl, J. Ström, J. Svensson, E. Swietlicki, K. Tabakova, T. Thorsteinsson, A. Virkkula, G. A. Weyhenmeyer, Y. Wu, P. Zieger og M. Kulmala (2019). „Interactions between the atmosphere, cryosphere, and ecosystems at northern high latitudes“. Í: *Atmos. Chem. Phys.* 19.3, bls. 2015–2061. DOI: 10.5194/acp-19-2015-2019.
- Brown, Joseph A, Jean-Pierre Thonney, Darrin Holwell og W Ross Wilson (1991). „A comparison of the susceptibility of *Salvelinus alpinus* and *Salmo salar* ouananiche to proliferative kidney disease“. Í: *Aquaculture* 96.1, bls. 1–6.
- Brown, Lee E, Kieran Khamis, Martin Wilkes, Phillip Blaen, John E Brittain, Jonathan L Carrivick, Sarah Fell, Nikolai Friberg, Leopold Füreder, Gisli M Gislason, Sarah Hainie, David M Hannah, William H M James, Valeria Lencioni, Jon S Olafsson, Christopher T Robinson, Svein J Saltveit, Craig Thompson og Alexander M Milner (2018). „Functional diversity and community assembly of river invertebrates show globally consistent responses to decreasing glacier cover“. en. Í: bls. 26.
- Brynhildur Bjarnadóttir, Guler Aslan Sungur, Bjarni D. Sigurdsson, Bjarnki T. Kjartansson, Hlynur Oskarsson, Edda S. Oddsdóttir, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir og Andrew Black (2021). „Carbon and water balance of an afforested shallow drained peatland in Iceland“. Í: *Forest Ecology and Management* 482, bls. 118861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118861>.
- Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D. Sigurdsson og Anders Lindroth (2009). „A young afforestation area in Iceland was a moderate sink to CO₂ only a decade after scarification and establishment“. Í: *Biogeosciences* 6, bls. 2895–2906.
- Brynja Hrafnkelsdóttir, Bjarni D Sigurdsson, Edda S Oddsdóttir, Halldor Sverrisson og Gudmundur Halldorsson (maí 2019a). „Winter survival of *Ceramica pisi* (Lepidoptera: Noctuidae) in Iceland.“ Í: *cabdirect.org* B Hrafnkelsdóttir, BD Sigurdsson, ES Oddsdóttir, H Sverrisson, G Halldorsson *Agricultural and Forest Entomology*, 2019 • *cabdirect.org* 21 (2), bls. 219–226. DOI: 10.1111/afe.12323.
- (2019b). „Winter survival of *Ceramica pisi* (Lepidoptera: Noctuidae) in Iceland“. Í: *Agricultural and Forest Entomology* 21, bls. 219–226. DOI: 10.1111/afe.12323.
- Brynjólfur Brynjólfsson (2023). *Sjálfsáin stafafura (Pinus contorta) í Öxnadal og Hörgárdal*. Tæknileg skýrsla. Nýsköpunarsjóður námsmanna.
- CAFF (2013). *Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity*. Tæknileg skýrsla. Akureyri.
- (2019). „State of the Arctic Freshwater Biodiversity: Key Findings and Advice for Monitoring“. Í: .
- Carbfix og Mannvit (2022). *Niðurdæling CO₂ á Hellisheiði. Matsáætlun*. Tæknileg skýrsla. Skipulagsstofnun.
- CAVM (2003). *Circumpolar Arctic Vegetation Map*. Tæknileg skýrsla. (1:7,500,000 scale). Anchorage, Alaska.
- Collins, Courtney G., Sarah C. Elmendorf, Robert D. Hollister, Greg H. R. Henry, Karin Clark, Anne D. Bjorkman, Isla H. Myers-Smith, Janet S. Prevéy, Isabel W. Ashton, Jakob J. Assmann, Juha M. Alatalo, Michele Carbognani, Chelsea Chisholm, Elisabeth J. Cooper, Chiara Forrester, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Kari Klanderud, Christopher W. Kopp, Carolyn Livensperger, Marguerite Mauritz, Jeremy L. May, Ulf Molau, Steven F. Oberbauer, Emily

- Ogburn, Zoe A. Panchen, Alessandro Petraglia, Eric Post, Christian Rixen, Heidi Rodenhizer, Edward A. G. Schuur, Philipp Semenchuk, Jane G. Smith, Heidi Steltzer, Ørjan Totland, Marilyn D. Walker, Jeffrey M. Welker og Katharine N. Suding (2021). „Experimental warming differentially affects vegetative and reproductive phenology of tundra plants“. Í: *Nature Communications* 12.1, bls. 3442. DOI: 10.1038/s41467-021-23841-2.
- Di Sacco, Alice, Kate A. Hardwick, David Blakesley, Pedro H. S. Brancalion, Elinor Breman, Lidio Cecilio Rebola, Susan Chomba, Kingsley Dixon, Steve Elliott, Godfrey Ruyonga, Katrina Shaw, Pete Smith, Rognvald J. Smith og Alexandre Antonelli (2021). „Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits“. Í: *Global Change Biology* 27.6, bls. 1328–1348. DOI: 10.1111/gcb.15498.
- Diaz-Pauli, Beatriz, Henrik H Berntsen, Eva B Thorstad, Eydna í Homrum, Susan Mærsk Lusseau, Vidar Wennevik og Kjell Rong Utne (2022). „Geographic distribution, abundance, diet, and body size of invasive pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) in the Norwegian and Barents Seas, and in Norwegian rivers“. Í: *ICES Journal of Marine Science*, fsac224. ISSN: 1054-3139. DOI: 10.1093/icesjms/fsac224.
- Eggertsson, Ólafur, Delfina Andrea Castiglia og Marco Carrer (2022). „Natural Regeneration of Lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Steinadalur, SE-Iceland“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 35, bls. 27–32.
- Egill Gautason, Helgi Eyleifur Þorvaldsson og Hrannar Smári Hilmarsson (2023). *Bleikir akrar - Aðgerðaáætlun um aukna kornrækt*. Report. Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit_lbhi_nr162_bleikir_akrar.pdf.
- Elmendorf, S. C., G. H. Henry, R. D. Hollister, R. G. Bjork, A. D. Bjorkman, T. V. Callaghan, L. S. Collier, E. J. Cooper, J. H. Cornelissen, T. A. Day, A. M. Fosaa, W. A. Gould, J. Gretarsdottir, J. Harte, L. Hermanutz, D. S. Hik, A. Hofgaard, F. Jarrad, I. S. Jonsdottir, F. Keuper, K. Klanderud, J. A. Klein, S. Koh, G. Kudo, S. I. Lang, V. Loewen, J. L. May, J. Mercado, A. Michelsen, U. Molau, I. H. Myers-Smith, S. F. Oberbauer, S. Pieper, E. Post, C. Rixen, C. H. Robinson, N. M. Schmidt, G. R. Shaver, A. Stenstrom, A. Tolvanen, O. Totland, T. Troxler, C. H. Wahren, P. J. Webber, J. M. Welker og P. A. Wookey (2012). „Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time“. Í: *Ecol Lett* 15.2. 1461-0248 Elmendorf, Sarah C Henry, Gregory H R Hollister, Robert D Bjork, Robert G Bjorkman, Anne D Callaghan, Terry V Collier, Laura Siegwart Cooper, Elisabeth J Cornelissen, Johannes H C Day, Thomas A Fosaa, Anna Maria Gould, William A Gretarsdottir, Jarngerethur Harte, John Hermanutz, Luise Hik, David S Hofgaard, Annika Jarrad, Frith Jonsdottir, Ingibjorg Svala Keuper, Frida Klanderud, Kari Klein, Julia A Koh, Saewan Kudo, Gaku Lang, Simone I Loewen, Val May, Jeremy L Mercado, Joel Michelsen, Anders Molau, Ulf Myers-Smith, Isla H Oberbauer, Steven F Pieper, Sara Post, Eric Rixen, Christian Robinson, Clare H Schmidt, Niels Martin Shaver, Gaius R Stenstrom, Anna Tolvanen, Anne Totland, Orjan Troxler, Tiffany Wahren, Carl-Henrik Webber, Patrick J Welker, Jeffery M Wookey, Philip A Journal Article Research Support, Non-U.S. Gov't Research Support, U.S. Gov't, Non-P.H.S. England *Ecol Lett*. 2012 Feb;15(2):164-75. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01716.x. Epub 2011 Dec 5., bls. 164–75. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01716.x.
- Elven, Reidar, Håvard Hegre, Hans Solstad, Ove Pedersen, Per A. Pedersen, Per A. Åsen og Vigdis Vandvik (2018). *Pinus contorta, vurðering av økologisk risiko*. URL: <https://www.artsdatabanken.no/Fab2018/N/538>.
- Erla Sturludóttir, Guðni Þorvaldsson, Guðrīður Helgadóttir, Ingólfur Guðnason, Jóhannes Sveinbjörnsson, Ólafur Ingi Sigurgeirsson og Þóroddur Sveinsson (2021). *Fæðuöryggi á Íslandi. Skýrsla unnin fyrir atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið*. Report. Landbúnaðarháskóli Íslands Háskólinn á Hólum.
- Erling Ólafsson (2022). *Vargsnigill (Arion vulgaris)*. URL: www.ni.is/is/biota/animalia/mollusca/gastropoda/pulmonata/arionidae/vargsnigill-arion-vulgaris.

- Ester Rut Unnsteinsdóttir (2023). „Íslenski melrakkinn - annar hluti. Takmarkandi og stýrandi áhrifaþættir íslenska refastofnsins, fæða og tímgun“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 93.1-2, bls. 47–58.
- Eydís Eiríksdóttir og Sigurður Reynir Gíslason (2020). „Efnabúskapur Þingvallavatns“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (1), bls. 65–79.
- Ferrarini, Matteo (2022). „Population index for the rock ptarmigan (*Lagopus muta*) in Iceland: analysis of road transect data“. University of Iceland, bls. 1–56.
- Finnur Ingimarsson, Haraldur R. Ingvason, Þóra Hrafnadóttir, Stefán Már Stefánsson og Kristín Harðardóttir (2020). „Vöktun svifdýra í Þingvallavatni 2007-2016“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (1), bls. 23–35.
- Foden, Wendy B. og S. N. Stuart (2009). *Species and climate change : more than just the polar bear*. Tæknileg skýrsla. Gland, Switzerland: IUCN Species Survival Commission (SSC). URL: <https://policycommons.net/artifacts/1375379/species-and-climate-change/1989639/>.
- ForHot (2022). *Publications*. URL: <https://forhot.is/publications/>.
- Frédéric, B. og Ó. K. Nielsen (des. 2018). „Predator-prey feedback in a gyrfalcon-ptarmigan system?“ Í: *Ecology and Evolution* 8 (24), bls. 12425–12434. ISSN: 2045-7758. DOI: 10.1002/ECE3.4563.
- Friðþór Sófus Sigurmundsson, Höskuldur Þorbjarnarson, Guðrún Gísladóttir og Hreinn Óskarsson (2012). „Breytingar á útbreiðslu og þéttleika birkiskóglendis á jörðum í nágrenni Heklu 1987–2012“. Í: *Landabréfið* 26, bls. 27–39.
- Frost, G. V., M. J. Macander, U. S. Bhatt, L. T. Berner, J. W. Bjerke, H. E. Epstein, B. C. Forbes, S. J. Goetz, M. J. Lara, T. Park, G. K. Phoenix, S. P. Serbin, H. Tømmervik, D. A. Walker og D. Yang (2021). *Arctic Report Card 2021: Tundra Greenness*. Tæknileg skýrsla. Global Ocean Monitoring, Observing (GOMO) Program, Office of Oceanic og Atmospheric Research NOAA. DOI: 10.25923/8n78-wp73.
- Fuglei, Eva og Rolf Anker Ims (2008). „Global warming and effects on the arctic fox“. Í: *Science Progress* 91.2, bls. 175–191. DOI: 10.3184/003685008X327468.
- Fuglei, Eva, John André Henden, Chris T. Callahan, Olivier Gilg, Jannik Hansen, Rolf A. Ims, Arkady P. Isaev, Johannes Lang, Carol L. McIntyre, Richard A. Merizon, Oleg Y. Mineev, Yuri N. Mineev, Dave Mossop, Olafur K. Nielsen, Erlend B. Nilsen, Áshild Ønvik Pedersen, Niels Martin Schmidt, Benoît Sittler, Maria Hørnell Willebrand og Kathy Martin (mar. 2020). „Circumpolar status of Arctic ptarmigan: Population dynamics and trends“. Í: *Ambio* 49 (3), bls. 749–761. DOI: 10.1007/S13280-019-01191-0/FIGURES/4.
- Gardarsson, Arnthor (1988). „Cyclic population changes and some related events in Rock Ptarmigan in Iceland“. Í: gefið út af A. T. Bergerud og M. W. Gratson. University of Minnesota Press, bls. 300–329.
- Geir Sigurðsson (2016). „Náttúra, menning og manneðli í vestrænni og kínverskri hugsun“. Í: *Náttúran í ljósaskiptunum: mannvera og náttúra í austrænni og vestrænni hugsun*. Gefið út af Björn Þorsteinsson. Heimspækistofnun, bls. 35–53.
- Gíslason, Sindri, Pálsson Snæbjörn, Jónasson Jónas P., Guls Hermann D., Svavarsson Jörundur og Halldórsson Halldór P. (2021). „Population dynamics of three brachyuran crab species (Decapoda) in Icelandic waters: impact of recent colonization of the Atlantic rock crab (*Cancer irroratus*)“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 78.2, bls. 534–544. DOI: 10.1093/icesjms/fsaa059. URL: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa059>.
- Gray, J. S., H. Dautel, A. Estrada-Peña, O. Kahl og E. Lindgren (2009). „Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe“. Í: *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases* 2009, bls. 1–12. DOI: 10.1155/2009/593232.
- Guðmunda Björg Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson (2023). „Lax- og silungsveiðin 2022“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir (HV 2023-22)*.

- Guðmundur H. Gunnarsson (2021). *Ísáning í tún eftir kal með sérhæfðum ísáningarvélum*. Web Page. URL: <https://bugardur.is/greinar/isaning-i-tun-efrir-kal-med-serhaefdum-isaningarvelum/>.
- Invasive forest pests in Iceland* (2019a). Future Forest Health: NordGen conference. Hótel Örk, 17-18 sept. 2019, bls. 13–15.
- Guðmundur Halldórsson, Brynja Hrafnkelsdóttir og Edda S. Oddsdóttir (2019b). „Loftslagsbreytingar og pöddur framtíðarinnar“. Í: *Rit Mógilsár 37/2019*, bls. 33–38.
- Guðni Guðbergsson (2021). „Silungurinn í Mývatni - Yfirlit yfir rannsóknir og veiðitölur 1986 - 2020“. Í: (HV 2021-30). URL: <https://www.hafogvatn.is/static/research/files/hv2021-30.pdf> (skoðað 11.08.2023).
- Guðni Thorvaldsson, Hólmgeir Björnsson og Jónatan Hermannsson (2004). „The influence of weather on early growth rate of grasses“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 16-17, bls. 65–73. URL: https://ias.is/wp-content/uploads/Icelandic_Agricultural_Sciences_16_17_2004/The-influence-of-weather-on-early.pdf.
- Guðni Þorvaldsson og Hólmgeir Björnsson (1990). „The effects of weather on growth, crude protein and digestibility of some grass species in Iceland [Áhrif veðurþátta á sprettu, hráprótein og meltanleika nokkurra grasa á Íslandi]“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 4, bls. 19–36.
- Guðrún Nína Petersen og Derya Berber (2018). *Jarðvegshitamælingar á Íslandi. Staða núverandi kerfis og framtíðarsýn*. Report. Veðurstofa Íslands. URL: www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2018/VI_2018_009_rs.pdf.
- Gunnar Steinn Jónsson (2022). *Vöktun á svifþörungum í Þingvallavatni 2015 til 2021*. Rorum. URL: https://natkop.kopavogur.is/wp-content/uploads/2023/03/22.1.gsjsvifthor_thing_2015-2021.pdf.pdf (skoðað 11.08.2023).
- Gunnarsson, Andri, Sigurdur M. Gardarsson, Tómas Jóhannesson, Óli G.B. Sveinsson og Finnur Pálsson (feb. 2021). „Annual and inter-annual variability and trends of albedo of Icelandic glaciers“. English. Í: *Cryosphere* 15.2. Publisher Copyright: © 2021 Author(s)., bls. 547–570. DOI: 10.5194/tc-15-547-2021.
- Gunnarsson, Tómas, J. A. Gill, G. F. Appleton, H. Gíslason, A. Gardarsson, A. R. Watkinson og W. J. Sutherland (mar. 2006). „Large-scale habitat associations of birds in lowland Iceland: Implications for conservation“. Í: *Biological Conservation* 128 (2), bls. 265–275. DOI: 10.1016/J.BIOCON.2005.09.034.
- Gunnarsson, Tómas Grétar, Ólafur Arnalds, Graham Appleton, Verónica Méndez og Jennifer A. Gill (2015). „Ecosystem recharge by volcanic dust drives broad-scale variation in bird abundance“. Í: *Ecology and Evolution* 5.12, bls. 2386–2396. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.1523>.
- Gunnhildur E. Gunnarsdóttir (2017). „A novel approach to estimate carbon loss from drained peatlands in Iceland“. M.Sc. Thesis.
- Gunnlaugsdóttir, Eyrún Gyða (2022). „Experimental warming of subarctic biocrust: Temporal responses of soil respiration and plant community“. Thesis. URL: skemman.is/bitstream/1946/42598/1/EyrunG_MSc_2022.pdf.
- Hagstofa Íslands (2022). *Búfé og uppskera*.
- Halldórsson, Guðmundur, Brynja Hrafnkelsdóttir, Bjarni D. Sigurðsson, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson og Erling Ólafsson (2013a). „New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 26, bls. 69–84.
- Halldórsson, Guðmundur, Bjarni D. Sigurðsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson og Erling Ólafsson (2013b). „New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 26, bls. 69–84.

- Haraldur Ólafsson, Áslaug Helgadóttir, Aðalsteinn Sigurgeirsson, Jónatan Hermannsson og Ólafur Rögnvaldsson (2007). „Líkleg þróun veðurfars á Íslandi með tilliti til ræktunar“. Í: *Rit Fræðþingis landbúnaðarins* 4, bls. 29–36.
- Haraldur R. Ingvason, Finnur Ingimarsson og Stefán Már Stefánsson (2021). „Vöktun á líffríki og vatnsgæðum Þingvallavatns, gagnaskýrsla fyrir árið 2021“. Í: (3-2022). URL: <https://natkop.kopavogur.is/wp-content/uploads/2023/03/22-3-thingvallavatn.pdf> (skoðað 11.08.2023).
- Heiðarsson, Lárus, Bjarni D. Sigurdsson, Benjamín Ö. Davíðsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Aðalsteinn Sigurgeirsson, Brynjar Skúlason, María D. Vest og Guðmundur Halldorsson (2020). „The effect of the pine woolly aphid (*Pineus pini*) on survival, growth and natural selection in Scots pine (*Pinus sylvestris*) in Iceland“. Í: *Agricultural and Forest Entomology* 22.2, bls. 146–156. DOI: <https://doi.org/10.1111/afe.12369>.
- Helgi Guðjónsson, Jón Einar Jónsson, Walter Stefánsson, Aðalsteinn Örn, Tómas Snæþórsson og Grétar Gunnarsson (án árs). „Bird Study Annual and large-scale variation in breeding output of Greylag geese *Anser anser* in Iceland“. Í: (). ISSN: 1944-6705. DOI: 10.1080/00063657.2015.1034655.
- Henry, Greg H.R., Robert D. Hollister, Kari Klanderud, Robert G. Björk, Anne D. Bjorkman, Cassandra Elphinstone, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Ulf Molau, Alessandro Petraglia, Steven F. Oberbauer, Christian Rixen og Philip A. Wookey (2022). „The International Tundra Experiment (ITEX): 30 years of research on tundra ecosystems“. Í: *Arctic Science* 8.3, bls. 550–571. DOI: 10.1139/as-2022-0041.
- Hilmar J. Malmquist, Finnur Ingimarsson, Haraldur R. Ingvason, Stefán Már Stefánsson og Þóra Hrafnadóttir (2020). „Hlýnun Þingvallavatns og hitaferlar í vatninu“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (1), bls. 80–99.
- Hjörleifur Finnsson (2021). *Hnúðlax á Íslandi: Vággestur eða velkominn?: um stjórnun ágengra tegunda á Íslandi*. Meistararitgerð við Háskóla Vestfjarða. URL: <http://hdl.handle.net/1946/39165>.
- Hlynur Bárðarson, Ingi Rúnar Jónsson, Eydís Njarðardóttir og Sigurður Óskar Helgason (2018). „Rannsóknir á fiskistofnum nokkurra áa á Norðausturlandi 2017“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2018-23).
- Hlynur Bárðarson, Sigurður Óskar Helgason og Eydís Njarðardóttir (2023). „Rannsóknir á fiskistofnum nokkurra áa á Norðausturlandi 2022“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2023-14).
- Horta-Lacueva, Quentin J.-B., Jónína H. Ólafsdóttir, Fia Finn, Edite Fiskoviča, Lieke Ponsioen, Marina de la Cámara og Kalina H. Kapralova (2022). „From drones to bones: Assessing the importance of abiotic factors for salmonid spawning behaviour and embryonic development through a multidisciplinary approach“. Í: *Ecology of Freshwater Fish* 31.3, bls. 596–606. ISSN: 1600-0633. DOI: 10.1111/eff.12654.
- Hólmgeir Björnsson (2007). *Framleiðsla lífmassa á Suðurlandi og Norðausturlandi - skýrslur til Íslenska lífmassafélagsins*. Fjölrit LbhÍ nr. 13. Hvanneyri: Landbúnaðarháskóli Íslands.
- Susceptibility of different provenances of birch in Iceland to *Heringocrania unimaculella** (2019), bls. 21–22.
- Hraundís Guðmundsdóttir (2013). „Ræktun ávaxtatrjáa á Íslandi“. Thesis.
- ICES (2022). *Working Group on North Atlantic Salmon (WGNAS)*. Bd. 4:39. ICES Scientific Reports, bls. 39. DOI: 10.17895/ices.pub.19697368.
- IPCC (2022). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

- IPCC Working Group I (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.
- Jenný Brynjarsdóttir, Sigrún H. Lund, Kjartan G. Magnússon og Ólafur K., Nielsen (2003). *Analysis of time series for rock ptarmigan and gyrfalcon populations in north-east Iceland*. Tæknileg skýrsla RH-18-2003.
- Jeppesen, Erik, Thomas Mehner, Ian J. Winfield, Külli Kangur, Jouko Sarvala, Daniel Gerdeaux, Martti Rask, Hilmar J. Malmquist, Kerstin Holmgren, Pietro Volta, Susana Romo, Reiner Eckmann, Alfred Sandström, Saúl Blanco, Andu Kangur, Henrik Ragnarsson Stabo, Marjo Tarvainen, Anne-Mari Ventelä, Martin Søndergaard, Torben L. Lauridsen og Mariana Meerhoff (2012). „Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes“. Í: *Hydrobiologia* 694.1, bls. 1–39. ISSN: 1573-5117. DOI: 10.1007/s10750-012-1182-1. (Skóðað 07.09.2022).
- Jóhann Óli Hilmarsson, Einar Ó. Þorleifssonand (2002). „Íslenskir skógarfuglar“. Í: *Skógræktarritið* (1), bls. 67–76.
- Jóhannes Sturlaugsson (2007). *Rannsóknir á atferlivistfræði Þingvallaurriða - Dæmi um niðurstöður*. Laxfiskar, bls. 17.
- (2011). *Gönguhegðun urriða í Efra-Sogi og Úlfjótuvatni - Framvinda 2010*. Laxfiskar, bls. 25.
- (2016). *Rannsóknir á lífsháttum Þingvallaurriða í sunnanverðu Þingvallavatni 2015-2016*. Laxfiskar, bls. 17.
- (2020). *Atferli bleikju í Þingvallavatni skráð árið um kring*. Laxfiskar. URL: http://laxfiskar.is/index.php?option=com_content&view=article&id=189%3Aatferli-bleikju-i-thingvallavatni-skrad-arid-um-kring (skoðað 11.08.2023).
- (2023a). *Ellíðaár 2022. Rannsóknir á fiskistofnum vatnakerfisins*. Laxfiskar. URL: http://laxfiskar.is/images/stories/skyrslur/Ellidaar_2022-Fiskirannsóknir-Johannes-Sturlaugsson-Laxfiskar_april2023.pdf (skoðað 11.08.2023).
- (2023b). *Þingvallaurriði - Upplýsingar um lífshætti og rannsóknir frá Jóhannesi Sturlaugssyni líffræðingi*. Laxfiskar. URL: http://laxfiskar.is/index.php?option=com_content&view=article&id=130&Itemid=145&lang=is (skoðað 11.08.2023).
- (án árs). „Hrygningagöngur Urriðans í Öxará-göngumynstrið og stærð hrygningarstofns með hliðssjón af umhverfisþáttum í 20 ár (2003-2022)“.
- Jóhannes Sturlaugsson og Hilmar Malmquist (2011). „Brown trout in Lake Thingvallavatn“. Í: *Thingvallavatn - a unique world of evolving*. Opna bókaútgáfan, Reykjavík.
- Jóhannes Sturlaugsson, Hrönn Ólína Jörundsdóttir, Franklín Georgsson og Helga Gunnlaugsson (2009). *Kvikasilfur og önnur óæskileg snefilefni í urriða úr Þingvallavatni*. Mátis ohf og Laxfiskar ehf. URL: http://laxfiskar.is/images/stories/skyrslur/Kvikasilfur_i_urrida_i_Thingvallavatni-des2009.pdf (skoðað 11.08.2023).
- Jóhannes Sveinbjörnsson og Daði Már Kristófersson (2021). „Afkoma sauðfjárþænda á Íslandi og leiðir til að bæta hana. Skýrsla unnin fyrir atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið“. Í: *Rit LbhÍ* 142, bls. 95. URL: www.lbhi.is/images/pdf/utgefing/5C%20efni/fjolrit/5C%20rannsóknastofnunar/5C%20landbunadarins/rit_lbhi_nr_142-2.pdf.
- Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir (2017). *Vistgerðir á Íslandi*. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Jónsdóttir, Ingibjörg S, Borgthor Magnússon, Jón Gudmundsson, Ásrún Elmarsdóttir og Hreinn Hjartarson (2005). „Variable sensitivity of plant communities in Iceland to experimental warming“. Í: *Global Change Biology* 11, bls. 553–563. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00928.x.

- Kardjilov, Marin Ivanov (2008). „Riverine and terrestrial carbon fluxes in Iceland“. PhD Thesis. Department of Geography and Tourism, Faculty of Science, Inst. of Earth Sciences, University of Iceland: University of Iceland.
- Keller, Nicole, Ásta Karen Helgadóttir, Sigríður Rós Einarsdóttir, Rafn Helgason, Brian Charles Barr, Birgir Urbancic Ásgeirsson, Diljá Helgadóttir, Inga Rún Helgadóttir, Chanee Jónsdóttir Thianthong, Kristinn Már Hilmarsson, Leone Tinganelli, Arnór Snorrason, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórrsson (2023). *National Inventory Report. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2021*. Report. Umhverfisstofnun. URL: https://ust.is/library/Skrar/loft/NIR/ISL_NIR%5C%202023_15%5C%20april_on_web.pdf.
- Kourantidou, Melina, Laura N. H. Verbrugge, Phillip J. Haubrock, Ross N. Cuthbert, Elena Angulo, Inkeri Ahonen, Michelle Cleary, Jannike Falk-Andersson, Lena Granhag, Sindri Gíslason, Brooks Kaiser, Anna-Kaisa Kosenius, Henrik Lange, Maiju Lehtiniemi, Kristin Magnussen, Ståle Navrud, Petri Nummi, Francisco J. Oficialdegui, Satu Ramula, Terhi Rytteri, Menja von Schmalensee, Robert A. Stefansson, Christophe Diagne og Franck Courchamp (2022). „The economic costs, management and regulation of biological invasions in the Nordic countries“. Í: *Journal of Environmental Management* 324, bls. 116374. ISSN: 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116374. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116374>.
- Kreiling, Agnes-Katharina, Daniel P Govoni, Snæbjörn Pálsson, Jón S Ólafsson og Bjarni K Kristjánsson (2022). „Invertebrate communities in springs across a gradient in thermal regimes“. Í: *Plos one* 17.5, e0264501. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264501>.
- Kristmundsson, Árni, Th Antonsson, F Árnason o.fl. (2010). „First record of proliferative kidney disease in Iceland“. Í: *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists* 30.1, bls. 35–40.
- Kristmundsson, Árni, Fjóla Rut Svavarsdóttir, Friðþjófur Árnason, Þórólfur Antonsson, Guðni Guðbergsson, Hildur Magnúsdóttir og Mark Andrew Freeman (2023). „Tetracapsuloides bryosalmonae and proliferative kidney disease in Icelandic salmonids—Comparative data from two different time periods“. Í: *International Journal for Parasitology* 53.4, bls. 207–220.
- Lagunas, Marcos, Arnar Pálsson, Benóný Jónsson, Magnús Jóhannsson, Zophonías O. Jónsson og Sigurður S. Snorrason (2023). „Genetic structure and relatedness of brown trout (*Salmo trutta*) populations in the drainage basin of the Ölfusá river, South-Western Iceland“. Í: *PeerJ* 11, e15985. DOI: 10.7717/peerj.15985.
- Landbúnaðarráðuneytið (1990). *Reglugerð um innflutning og útflutning á plöntum og plöntuafurðum*. Reglugerðarsafn. URL: <https://www.reglugerd.is/reglugerdir/allar/nr/189-1990>.
- Lavin, Charles P, Cesc Gordo-Vilaseca, Fabrice Stephenson, Zhiyuan Shi og Mark John Costello (2022). „Warmer temperature decreases the maximum length of six species of marine fishes, crustacean, and squid in New Zealand“. Í: *Environmental Biology of Fishes* 105.10, bls. 1431–1446.
- Leblans, Niki I. W., Bjarni D. Sigurdsson, Sara Vicca, Yongshuo Fu, Josep Penuelas og Ivan A. Janssens (2017). „Phenological responses of Icelandic subarctic grasslands to short-term and long-term natural soil warming“. Í: *Global Change Biology* 23.11, bls. 4932–4945. DOI: 10.1111/gcb.13749.
- Lilja Jóhannesdóttir, Aldís Erna Pálsdóttir, Jennifer A. Gill, José A. Alves, Böðvar Þórisson og Tómas Grétar Gunnarsson (án árs). *Mói – vefur um líffræði og vernd mófugla á Íslandi*. URL: moi.hi.is.
- Loftslagsráð (2023). *Uppgjör Loftslagsráðs*. Electronic Article. URL: www.loftslagsrad.is/library/alit/Uppgj%C3%B6r%5C%20Loftslagsr%C3%A1%C3%B0s%5C%202019-2023_Loka.pdf.

- Magnús Jóhannsson og Benóný Jónsson (2022). „Fiskirannsóknir á vatnasvæði Þjórsár. Samantekt fyrir árin 2013-2021“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2022-28).
- Magnús Jóhannsson, Benóný Jónsson, Ragnhildur Magnúsdóttir og Jón S. Ólafsson (2015). „Stóra-Laxá í Hreppum. Vatnalíf, veiðinytjar og virkjun“. Í: (VMST/15005, LV-2015-128), bls. 81.
- Magnús Jóhannsson og Hlynur Bárðarson (2021). „Fiskstofnar á vatnasvæði Ölfusár-Hvítár. Ástand stofna og veiðinýting“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2021-17).
- Maljanen, Marja, Heli Yli-Moijala, Christina Biasi, Niki I. W. Leblans, Hans J. De Boeck, Brynhildur Bjarnadóttir og Bjarni D. Sigurdsson (2017). „The emissions of N₂O and CH₄ from natural soil temperature gradients in a volcanic area in southwest Iceland“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 109, bls. 70–80.
- Mallory, Conor D og Mark S Boyce (2018). „Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer“. Í: *Environ. Rev.* 26, bls. 13–25. DOI: 10.1139/er-2017-0032.
- Marañón-Jiménez, S., J. Peñuelas, A. Richter, B. D. Sigurdsson, L. Fuchsluger, N. I. W. Leblans og I. A. Janssens (2019). „Coupled carbon and nitrogen losses in response to seven years of chronic warming in subarctic soils“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 134, bls. 152–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.028>.
- Marteinsdóttir, Bryndís, Isabel C. Barrio og Ingibjörg Svala Jónsdóttir (2017). „Assessing the ecological impacts of extensive sheep grazing in Iceland“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 30, bls. 55–72.
- Marteinsdóttir, Bryndís, Jóhann Helgi Stefánsson og Rán Finnsdóttir (2021). *GróLind – Mat og vöktun á gróður- og jarðvegsauðlindum Íslands. Ársskýrsla 2021*. Report. Landgræðslan.
- Meinander, O., P. Dagsson-Waldhauserova, P. Amosov, E. Aseyeva, C. Atkins, A. Baklanov, C. Baldo, S. L. Barr, B. Barzycka, L. G. Benning, B. Cvetkovic, P. Enchilik, D. Frolov, S. Gassó, K. Kandler, N. Kasimov, J. Kavan, J. King, T. Koroleva, V. Krupskaya, M. Kulmala, M. Kusiak, H. K. Lappalainen, M. Laska, J. Lasne, M. Lewandowski, B. Luks, J. B. McQuaid, B. Moroni, B. Murray, O. Möhler, A. Nawrot, S. Nickovic, N. T. O’Neill, G. Pejanovic, O. Popovicheva, K. Ranjbar, M. Romanias, O. Samonova, A. Sanchez-Marroquin, K. Schepanski, I. Semenov, A. Sharapova, E. Shevna, Z. Shi, M. Sofiev, F. Thevenet, T. Thorsteinsson, M. Timofeev, N. S. Umo, A. Uppstu, D. Urupina, G. Varga, T. Werner, O. Arnalds og A. Vukovic Vimic (2022). „Newly identified climatically and environmentally significant high-latitude dust sources“. Í: *Atmos. Chem. Phys.* 22.17, bls. 11889–11930. DOI: 10.5194/acp-22-11889-2022.
- Moffett, I. J. J., M. Allen, C. Flanagan, W. W. Crozier og G. J. A. Kennedy (2006). „Fecundity, egg size and early hatchery survival for wild Atlantic salmon, from the River Bush“. en. Í: *Fisheries Management and Ecology* 13.2, bls. 73–79. DOI: 10.1111/j.1365-2400.2006.00478.x.
- Mulloy, Tara A., Isabel C. Barrio, Ingibjörg S. Jónsdóttir og David S. Hik (2021). „The effects of different management interventions on degraded rangelands in Iceland“. Í: *Land Degradation & Development* 32.16, bls. 4583–4594. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.4057>.
- Náttúrufræðistofnun Íslands (2018). *Válisti fugla*. URL: <https://www.ni.is/is/midlun/utgafa/valistar/fuglar/valisti-fugla>.
- (2022). „Óbirt gögn“.
 - (2023a). *Fuglar*. URL: <https://www.ni.is/is/dyr/fuglar>.
 - (2023b). *Vöktun náttúruverndarsvæða*. URL: <https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/voktun-natturuverndarsvaeda>.
 - (2023c). *Vöktun skógarmítla*. URL: <https://www.ni.is/is/voktun-skogarmitla>.
 - (2023d). *Pöddur*. URL: <https://www.ni.is/is/dyr/poddur> (skoðað 08.08.2023).
 - (2023e). *Vöktun fiðrilda*. URL: <https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/voktun-fidrilda> (skoðað 08.08.2023).
 - (2023f). *Vöktun mófugla*. URL: <https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/voktun-mofugla> (skoðað 08.08.2023).

- Nelson, Daniel, Jonathan P. Benstead, Alexander D. Huryn, Wyatt F. Cross, James M. Hood, Philip W. Johnson, James R. Junker, Gísli M. Gíslason og Jón S. Ólafsson (2020a). „Contrasting responses of black fly species (Diptera: Simuliidae) to experimental whole-stream warming“. Í: *Freshwater Biology* 65.10, bls. 1793–1805. ISSN: 1365-2427. DOI: 10.1111/fwb.13583. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/fwb.13583> (skoðað 21.09.2022).
- (2020b). „Thermal niche diversity and trophic redundancy drive neutral effects of warming on energy flux through a stream food web“. Í: *Ecology* 101.4. DOI: 10.1002/ecy.2952. (Skoðað 22.09.2022).
- New Zealand Plant Conservation Network (2023). *Pinus contorta*. URL: <https://www.nzpcn.org.nz/flora/species/pinus-contorta/>.
- Nyquist, Corrie, Gísli Már Gíslason, Bruce Vondracek og Leonard Charles Ferrington (2021). „Longevities of Adult Chironomidae (Diptera) from Two Streams in Iceland“. Í: *CHIRONOMUS Journal of Chironomidae Research* 34. Number: 34. ISSN: 2387-5372. DOI: 10.5324/cjcr.v0i34.3431.
- O’Gorman, Eoin J., Doris E. Pichler, Georgina Adams, Jonathan P. Benstead, Haley Cohen, Nicola Craig, Wyatt F. Cross, Benoît O. L. Demars, Nikolai Friberg, Gísli Már Gíslason, Rakel Gudmundsdóttir, Adrianna Hawczak, James M. Hood, Lawrence N. Hudson, Liselotte Johansson, Magnus P. Johansson, James R. Junker, Anssi Laurila, J. Russell Manson, Efpraxia Mavromati, Daniel Nelson, Jón S. Ólafsson, Daniel M. Perkins, Owen L. Petchey, Marco Plebani, Daniel C. Reuman, Björn C. Rall, Rebecca Stewart, Murray S. A. Thompson og Guy Woodward (jan. 2012). „Chapter 2 - Impacts of Warming on the Structure and Functioning of Aquatic Communities: Individual- to Ecosystem-Level Responses“. Í: *Advances in Ecological Research*. Gefið út af Guy Woodward, Ute Jacob og Eoin J. O’Gorman. Bd. 47. Global Change in Multispecies Systems Part 2. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-398315-2.00002-8.
- Ólafsson, Haraldur og Iman Roustia (2021). „Influence of atmospheric patterns and North Atlantic Oscillation (NAO) on vegetation dynamics in Iceland using Remote Sensing“. Í: *European Journal of Remote Sensing* 54.1, bls. 351–363. DOI: 10.1080/22797254.2021.1931462.
- Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserova og Haraldur Ólafsson (2016). „The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts — A review“. Í: *Aeolian Research* 20, bls. 176–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.01.004>.
- Ólafur Arnalds (2010). „Dust sources and deposition of aeolian material“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 23, bls. 3–21.
- (2023). *Mold ert þú. Jarðvegur og íslensk náttúra*. IÐNÚ útgáfa.
- Ólafur Arnalds, Elín Þóra Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir (2019a). „Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi - I. Sandar og fok“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 89.1-2, bls. 34–47.
- Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson (2020). „Loftslag, kolefni og mold“. Í: *Rit Lbhi* 133, bls. 49. URL: www.lbhi.is/images/pdf/utgefingurinn/rit/rit_133_ok.pdf.
- Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink (2019b). „Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi - II. Áfok og ryk“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 89.3-4, bls. 130–143.
- Ólafur K Nielsen, Jenný Brynjarsdóttir og Kjartan Magnússon (2004). *Vöktun rjúpnastofnsins 1999–2003*. Náttúrufræðistofnun Íslands. URL: <http://www.ni.is>.
- Ólafur K Nielsen (ágú. 2023). *Víðkoma rjúpu 2023*. URL: <https://www.ni.is/sites/default/files/2023-08/Vidkoma-rjupu-2023-2.pdf>.
- Ólafur K. Nielsen (sep. 1999). „Gyrffalcon predation on ptarmigan: Numerical and functional responses“. Í: *Journal of Animal Ecology* 68 (5), bls. 1034–1050. DOI: 10.1046/J.1365-2656.1999.00351.X.
- (2003). „The impact of food availability on Gyrffalcon (*Falco rusticolus*) diet and timing of breeding“. Í: gefið út af D. B. A. Thompson, S. M. Redpath, A. H. Fielding, M. Marquiss og C. A. Galbraith. Scottish Natural Heritage, bls. 283–302.

- Ólafur K. Nielsen (2011). „Gyr Falcon population and reproduction in relation to Rock Ptarmigan numbers in Iceland“. Í: gefið út af R.T. Watson, T.J. Cade, M. Fuller, G. Hunt og E. Potapov. The Peregrine Fund., bls. 21–48.
- Ólafur K. Nielsen og Guðmundur A. Guðmundsson (2020). „Body condition of Ptarmigan and population change“. Í: *Veggspjald á OIKOS ráðstefnunni í Reykjavík 3.-5. mars 2020*. Reykjavík.
- Óskarsdóttir, Guðrún, Thóra Ellen Thórhallsdóttir, Anna Helga Jónsdóttir, Hulda Margrét Birkisdóttir og Kristín Svavarsdóttir (2022). „Establishment of mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa*) on a glacial outwash plain: Spatial patterns and decadal processes“. Í: *Ecology and Evolution* 12.10, e9430. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.9430>.
- Parisa, Zack, Eric Marland, Brent Sohngen, Gregg Marland og Jennifer Jenkins (2022). „The time value of carbon storage“. Í: *Forest Policy and Economics* 144, bls. 102840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102840>.
- Páll Bergþórsson (1996). „Hitafar og gróður“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 10, bls. 141–164.
- Pálsdóttir, Aldís E., Jennifer A. Gill, José A. Alves, Snæbjörn Pálsson, Verónica Méndez, Harry Ewing og Tómas G. Gunnarsson (okt. 2022). „Subarctic afforestation: Effects of forest plantations on ground-nesting birds in lowland Iceland“. Í: *Journal of Applied Ecology* 59 (10), bls. 2456–2467. DOI: 10.1111/1365-2664.14238.
- Pálsson, Snæbjörn, Páll Hersteinsson, Ester R. Umnsteinsdóttir og Ólafur K. Nielsen (apr. 2016). „Population limitation in a non-cyclic arctic fox population in a changing climate“. Í: *Oecologia* 180.4, bls. 1147–1157. DOI: 10.1007/S00442-015-3536-7/TABLES/2.
- Pálsson, Snæbjörn, Pawel Wasowicz, Starri Heiðmarsson og Kristinn Pétur Magnússon (nóv. 2022). „Population structure and genetic variation of fragmented mountain birch forests in Iceland“. Í: *Journal of Heredity* 114, bls. 165–174. DOI: 10.1093/jhered/esac062.
- Phillips, Joseph S, Guðni Guðbergsson og Anthony R Ives (2022). „Opposing trends in survival and recruitment slow the recovery of a historically overexploited fishery“. Í: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79.7, bls. 1138–1144.
- Pilakouta, Natalie, Shaun S. Killen, Bjarni K. Kristjánsson, Skúli Skúlason, Jan Lindström, Neil B. Metcalfe og Kevin J. Parsons (2020). „Multigenerational exposure to elevated temperatures leads to a reduction in standard metabolic rate in the wild“. Í: *Functional Ecology* 34.6, bls. 1205–1214. ISSN: 1365-2435. DOI: 10.1111/1365-2435.13538.
- Poeplau, Christopher, Thomas Kätterer, Niki I. W. Leblans og Bjarni D. Sigurdsson (2017). „Sensitivity of soil carbon fractions and their specific stabilisation mechanisms to extreme soil warming in a subarctic grassland“. Í: *Global Change Biology* 23, bls. 1316–1327. DOI: 10.1111/gcb.13491.
- Przedpelska-Wasowicz, Ewa Maria, Pawel Wasowicz, Aníta Ósk Áskelsdóttir, Ellý Renée Guðjohnsen og Margrét Hallsdóttir (2021). „Characterisation of pollen seasons in Iceland based on long-term observations: 1988–2018“. Í: *Aerobiologia* 37.3, bls. 507–524. DOI: 10.1007/s10453-021-09701-y.
- Pörtner, H.O., R.J. Scholes, J. Agard, E. Archer, A. Arneth, X. Bai, D. Barnes, M. Burrows, L. Chan, W.L. Cheung, S. Diamond, C. Donatti, C. Duarte, N. Eisenhauer, W. Foden, M. A. Gasalla, T. Handa C. and Hickler, O. Hoegh-Guldberg, K. Ichii, U. Jacob, G. Insarov, W. Kiessling, P. Leadley, R. Leemans, L. Levin, M. Lim, S. Maharaj, S. Managi, P. A. Marquet, P. McElwee, G. Midgley, T. Oberdorff, D. Obura, E. Osman, R. Pandit, U. Pascual, A. P. F. Pires, A. Popp, V. Reyes- García, M. Sankaran, J. Settele, Y. J. Shin, D. W. Sintayehu, P. Smith, N. Steiner, B. Strassburg, R. Sukumar, C. Trisos, A.L. Val, J. Wu, E. Aldrian, C. Parmesan, R. Pichs- Madruga, D.C. Roberts, A.D. Rogers, S. Díaz, M. Fischer, S. Hashimoto, S. Lavorel, N. Wu og H.T. Ngo (2021). *Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change*. Útg. 5. DOI: 10.5281/zenodo.5101125. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5101125>.

- Radujkovic, Dajana, Erik Verbruggen, Bjarni D. Sigurdsson, Niki I. W. Leblans, Ivan A. Janssens, Sara Vicca og James T. Weedon (2018). „Prolonged exposure does not increase soil microbial community compositional response to warming along geothermal gradients“. Í: *FEMS Microbiology Ecology* 94, fix17. DOI: doi:10.1093/femsec/fix174.
- Raynolds, Martha, Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson og Sigurður Magnússon (júl. 2015). „Warming, Sheep and Volcanoes: Land Cover Changes in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends“. Í: *Remote Sensing* 7 (8), bls. 9492–9506. DOI: 10.3390/rs70809492.
- Reid, Andrea J., Andrew K. Carlson, Irena F. Creed, Erika J. Eliason, Peter A. Gell, Pieter T. J. Johnson, Karen A. Kidd, Tyson J. MacCormack, Julian D. Olden, Steve J. Ormerod, John P. Smol, William W. Taylor, Klement Tockner, Jesse C. Vermaire, David Dudgeon og Steven J. Cooke (2019). „Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity“. Í: *Biological Reviews* 94, bls. 849–873. DOI: 10.1111/brv.12480.
- Richter, Sigurdur H, Matthías Eydal, Karl Skírnisson og Erling Ólafsson (2013). „Tick species (Ixodida) identified in Iceland“. Í: *ICEL. AGRIC. SCI* 26, bls. 3–10.
- Rixen, Christian, Toke Thomas Høye, Petr Macek, Rien Aerts, Juha M Alatalo, Jill T Anderson, Pieter A Arnold, Isabel C Barrio, Jarle W Bjerke og Mats P og fleiri Björkman (2022). „Winters are changing: snow effects on Arctic and alpine tundra ecosystems“. Í: *Arctic Science* 8.3, bls. 572–608.
- Robinson, Sinikka I., Órla B. McLaughlin, Bryndís Marteinsdóttir og Eoin J. O’Gorman (2018). „Soil temperature effects on the structure and diversity of plant and invertebrate communities in a natural warming experiment“. Í: *Journal of Animal Ecology* 87.3, bls. 634–646. DOI: 10.1111/1365-2656.12798.
- Roed, Knut H, A V Soldal og Skarphéðinn Þórisson (des. 1985). „Transferrin variability and founder effect in Iceland reindeer, Rangifer tarandus L“. Í: *Hereditas* 103 (2), bls. 161–164. DOI: 10.1111/J.1601-5223.1985.TB00496.X.
- Ross, Louise C., Gunnar Austrheim, Leif-Jarle Asheim, Gunnar Bjarnason, Jon Feilberg, Anna Maria Fosaa, Alison J. Hester, Øystein Holand, Ingibjörg S. Jónsdóttir, Lis E. Mortensen, Atle Mysterud, Erla Olsen, Anders Skonhoft, James D. M. Speed, Geir Steinheim, Des B. A. Thompson og Anna Gudrún Thórhallsdóttir (2016). „Sheep grazing in the North Atlantic region: A long-term perspective on environmental sustainability“. Í: *Ambio* 45.5, bls. 551–566. DOI: 10.1007/s13280-016-0771-z.
- Ruseva, Tatyana, James Hedrick, Gregg Marland, Henning Tovar, Carina Sabou og Elia Besombes (2020). „Rethinking standards of permanence for terrestrial and coastal carbon: implications for governance and sustainability“. Í: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 45. Open Issue 2020 Part A: Technology Innovations and Environmental Sustainability in the Anthropocene, bls. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.09.009>.
- Rúnar Snær Reynisson (2021). *Ekkert lát á þurrkum - vara bændur við yfirborðsvatni*. Newspaper Article. URL: <https://www.ruv.is/frett/2021/08/31/ekkert-lat-a-thurrrkum-vara-baendur-vid-yfirbordsvatni>.
- Saino, Nicola, Roberto Ambrosini, Diego Rubolini, Jost Von Hardenberg, Antonello Provenzale, Kathrin Hüppop, Ommo Hüppop, Aleksí Lehikoinen, Esa Lehikoinen, Kalle Rainio, Maria Romano og Leonid Sokolov (mar. 2011). „Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds“. Í: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278 (1707), bls. 835–842. ISSN: 14712970. DOI: 10.1098/RSPB.2010.1778. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2010.1778>.
- Salazar, Alejandro, Denis Warshan, Clara Vasquez-Mejia og Ólafur S. Andrésón (2022). „Environmental change alters nitrogen fixation rates and microbial parameters in a subarctic biological soil crust“. Í: *Oikos* 2022.11, e09239. DOI: <https://doi.org/10.1111/oik.09239>.
- Schroeder, Martin og Simon Kärverno (2022). „Rokordstort utbrott av granbarkborre - orsaker och vad man skal göra“. Í: *Kungl. skogs- och lantbruksakademiens tidskrift* 161.7, bls. 16–19.

- URL: https://www.ksla.se/wp-content/uploads/2022/11/KSLAT-7-2022-Friska-skogar-%E2%80%93-sa-nar-vi-dit_hr.pdf.
- Schyberg, Harald, Xiaohua Yang, Morten A.Ø. Køltzow, Bjørn Amstrup, Åsmund Bakketun, Eric Bazile, Jana Bojarova, Jason E. Box, Per Dahlgren, Sverre Hagelin, Maria Homleid, Andrés Horányi, Jacob Høyer, Åke Johansson, Mari Anne Killie, Heiner Körnich, Patrick Le Moigne, Magnus Lindskog, Terhikki Manninen, Poul Nielsen Englyst, Klaus P. Nielsen, Erik Olsson, Bjorn Palmason, Carlos Peralta Aros, Roger Randriamampianina, Patrick Samuelsson, Robert Stappers, Eyvind Støylen, Steinþór Thorsteinsson, Teresa Valkonen og Zhen-Qing Wang (2020). „Arctic regional reanalysis on height levels from 1991 to present“. Í: *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.8679900d.
- Sigrún Hallsdóttir og Stefán Gíslason (2017). *Losun gróðurhúsalofttegunda frá sauðfjárbúum á Íslandi og aðgerðir til að draga úr losun. Unnið fyrir Landssamtök sauðfjárbænda*. Report. Umhverfisráðgjöf Íslands ehf. (Environice).
- Sigurður Björn Alfredsson (2018). „The effects of shrub encroachment on avian communities in lowland Iceland“. University of Iceland, bls. 1–56. URL: <http://hdl.handle.net/1946/31883>.
- Sigurður Reynir Gíslason (2012). *Kolefnishringrásin*. Hið íslenska bókmenntafélag. ISBN: 9789979663034.
- Skarphéðinn G Þórisson (2018). „Population dynamics and demography of reindeer (*Rangifer tarandus* L.) on the East Iceland highland plateau 1940–2015. A comparative study of two herds.“ Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: <http://hdl.handle.net/1946/30920>.
- (2004). „Hreindýr“. Í: *Íslensk spendýr*. Gefið út af Páll Hersteinsson. Reykjavík: Vaka-Helgafell, bls. 232–243.
- Skarphéðinn G. Þórisson og Rán Þórarinsdóttir (2017). *Vöktun Náttúrustofu Austurlands 2016 og tillaga um veiðikvóta og ágangssvæði 2017*. Náttúrustofa Austurlands NA-170167, bls. 1–87. URL: <https://drive.google.com/file/d/1TJ2ZHINETPa8vDKx-Y-gKsWv10y5vow3/view>.
- Skarphéðinn G. Þórisson, Rán Þórarinsdóttir og Friða Jóhannesdóttir (2022). *Vöktun hreindýra 2022 og tillaga um veiðikvóta og ágangssvæði 2023*. Náttúrustofa Austurlands, NA-220236.
- Skóra, Michal E., Guðni Guðbergsson, Gordon H. Copp og J. Iwan Jones (2023). „Evidence of successful recruitment of non-native pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* in Iceland“. Í: *Journal of Fish Biology*. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfb.15556>.
- Snorrason, Arnór (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020. Report. Iceland*. Report. UN Food and Agriculture Organization (FAO). URL: <https://www.fao.org/3/cb0010en/cb0010en.pdf>.
- (2022a). „Binding og losun gróðurhúsalofttegunda í fortíð, nútíð og framtíð“. Í: *Rit Mógilsár* 47, bls. 8–9. URL: https://www.skogur.is/static/files/rit-mogilsar/47-2022_fagradstefna-skograektar-2022-utdraettir_vefur.pdf.
- (2022b). *Úttekt á landnámi trjátegunda á jaðarsvæðum ræktaðs skóglendis á Íslandi*. Web Page.
- Snorrason, Sigurdur S, Pétur M Jónasson, Bror Jonsson, Torfinn Lindem, Hilmar J Malmquist, Odd Terje Sandlund og Skúli Skúlason (1992). „Population dynamics of the planktivorous arctic charr *Salvelinus alpinus* ("murta") in Thingvallavatn“. Í: *Oikos*, bls. 352–364.
- Snæbjörnsdóttir, Sandra Ó., Bergur Sigfússon, Chiara Marieni, David Goldberg, Sigurður R. Gíslason og Eric H. Oelkers (feb. 2020). „Carbon dioxide storage through mineral carbonation“. Í: *Nature Reviews Earth & Environment* 1.2, bls. 90–102. DOI: 10.1038/s43017-019-0011-8.
- Soffía Helga Valsdóttir (2022). „Að standa af sér storminn. Upplifun og líðan Skagfirðinga í óveðrinu í desember 2019“. Thesis. URL: <https://skemman.is/handle/1946/42879>.
- Solberg, S. Ø., A. Diederichsen, Áslaug Helgadóttir, Sigríður Dalmannsdóttir, R. Djurhuus, A. Frederiksen, G. Poulsen og F. Yndgaard (2016). „Plant genetic resources and climate change. Stakeholder perspectives from the Nordic and Arctic regions“. Í: *Applied Mathematics and Omics to Assess Crop Genetic Resources for Climate Change Adaptive Traits*. Gefið út af

- A. Bari, A. B. Damania, M. Mackay og S. Dayanandan. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press, bls. 13–24. ISBN: 978-1-4987-3013-6. DOI: 10.1201/b19518-4.
- Springer, Alan M og Gus B van Vliet (2014). „Climate change, pink salmon, and the nexus between bottom-up and top-down forcing in the subarctic Pacific Ocean and Bering Sea“. Í: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.18, E1880–E1888.
- Standing Committee (2022). *Recommendation No. 216 (2022) of the Standing Committee, adopted on 2nd December 2022, on Risks associated with the use of invasive alien tree species as a Nature-based Solution to mitigate climate change*. <https://rm.coe.int/2022-rec-216e-invasive-alien-trees-and-ias/1680a94961>.
- Steinunn Garðarsdóttir, Jónína Svavarsdóttir og Hrannar Smári Hilmarsson (2022). „Hunangsber“. Í: *Jarðræktarrannsóknir 2020*. Gefið út af Þóroddur Sveinsson, Erla Sturludóttir og Margrét Jónsdóttir. Rit LbhÍ 153, Landbúnaðarháskóli Íslands, bls. 84. URL: www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit%5C%20lbhi%5C%20nr%5C%20153.pdf.
- Sunna Áskeldsdóttir (2012). „Changes in soil organic carbon in four long-term hayfield fertilisation experiments in Iceland: Monitoring and modelling“. M.Sc. thesis.
- Sunna Skeggjadóttir, Egill Gunnarsson og Hrannar Smári Hilmarsson (2022a). *Orkujurt: Bættar aðferðir til olíuræktunar*. Report. Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: <https://www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit%5C%20lbhi%5C%20nr%5C%20160-orkujurt.pdf>.
- Sunna Skeggjadóttir, Jónína Svavarsdóttir og Hrannar Smári Hilmarsson (2022b). *Akurhafri. Áburðartilraunir á höfrum til þroska á tveimur mismunandi jarðvegsgerðum á Hvanneyri 2020*. Report. Rit LbhÍ 160, Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit_lbhi_nr_156_akturhafri.pdf.
- Svenning, Martin-A., Morten Falkegård, J. Brian Dempson, Michael Power, Bård-Jørgen Bårdsen, Guðni Guðbergsson og Per Fauchald (2021). „Temporal changes in the relative abundance of anadromous Arctic charr, brown trout, and Atlantic salmon in northern Europe: Do they reflect changing climates?“ Í: *Freshwater Biology* 67.1, bls. 64–77. ISSN: 1365-2427. DOI: 10.1111/fwb.13693.
- Thakur, Madhav P., Bjarni D. Sigurðsson, Páll Sigurðsson og Martin Holmstrup (2023). „Warming shifts the biomass distribution of soil microarthropod communities“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 177, bls. 108894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108894>.
- Thórsson, AE. Th., S. Pálsson, M. Lascoux og K. Anamthawat-Jónsson (nóv. 2010). „Introggression and phylogeography of *Betula nana* (diploid), *B. pubescens* (tetraploid) and their triploid hybrids in Iceland inferred from cpDNA haplotype variation“. Í: *Journal of Biogeography* 37 (11), bls. 2098–2110. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2010.02353.x.
- Tómas G. Gunnarsson og Gunnar Tómasson (feb. 2011). „Flexibility in spring arrival of migratory birds at northern latitudes under rapid temperature changes“. Í: *Bird Study* 58 (1), bls. 1–12. ISSN: 00063657. DOI: 10.1080/00063657.2010.526999. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00063657.2010.526999>.
- Tómas Grétar Gunnarsson, Lilja Jóhannesdóttir, José A. Alves, Böðvar Þórisson og Jennifer A. Gill (apr. 2017). „Effects of spring temperature and volcanic eruptions on wader productivity“. Í: *Ibis* 159 (2), bls. 467–471. ISSN: 1474-919X. DOI: 10.1111/IBI.12449. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ibi.12449>
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ibi.12449>
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ibi.12449>.
- Tómas Gunnarsson (2020). „Búsvæði og vernd íslenskra vaðfugla“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (2-3), bls. 145–162.
- Umhverfisstofnun (2022). *Vöktunaráætlun vatnaáætlunar 2022-2027*. Umhverfisstofnun, Reykjavík.
- Unnsteinsdóttir, E. R. og P. Hersteinsson (mar. 2009). „Surviving north of the natural range: The importance of density independence in determining population size“. Í: *Journal of Zoology* 277 (3), bls. 232–240. DOI: 10.1111/J.1469-7998.2008.00532.X.

- Unnsteinsdóttir, Ester Rut (2021). „Íslenski melrakkinn – fyrsti hluti. Stofnbreytingar, veiðar og verndun“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 91.3-4, bls. 97–111.
- Valdés, Alicia, Vigdís F. Helmutsdóttir, Bryndís Marteinsdóttir og Johan Ehrlén (2022). „Selection against early flowering in geothermally heated soils is associated with pollen but not prey availability in a carnivorous plant“. Í: *American Journal of Botany* 109.11, bls. 1693–1701. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajb2.16047>.
- Verbrugghe, N., N. I. W. Leblans, B. D. Sigurdsson, S. Vicca, C. Fang, L. Fuchslueger, J. L. Soong, J. T. Weedon, C. Poeplau, C. Ariza-Carricondo, M. Bahn, B. Guenet, P. Gundersen, G. E. Gunnarsdóttir, T. Kätterer, Z. Liu, M. Maljanen, S. Marañón-Jiménez, K. Meeran, E. S. Oddsdóttir, I. Ostonen, J. Peñuelas, A. Richter, J. Sardans, P. Sigurdsson, M. S. Torn, P. M. Van Bodegom, E. Verbruggen, T. W. N. Walker, H. Wallander og I. A. Janssens (2022). „Soil carbon loss in warmed subarctic grasslands is rapid and restricted to topsoil“. Í: *Biogeosciences* 19.14. BG, bls. 3381–3393. DOI: 10.5194/bg-19-3381-2022.
- Vilmundur Hansen og Sigurður Jóhannesson (2021). „Hampbyltingin á Íslandi“. Í: *Tímarit Bændablaðsins* 2021, bls. 16–23. URL: https://issuu.com/bbl.is/docs/timarit_baendabladsins_2021_hq/s/11936469.
- Vísinda- og Tækniráð (2017). *Vöktun á Íslandi: kortlagning og framtíðarsýn - skýrsla verkefnahóps Vísinda- og tækniráðs um rannsóknarinnviði og vöktun*. Mennta- og menningarmálaráðuneytið, Reykjavík. ISBN: 978-9935-436-66-5.
- VKM, Kjetil Hindar, Lars Robert Hole, Kyrre Kausrud, Martin Malmstrøm, Espen Rimstad, Lucy Robertson, Odd Terje Sandlund, Eva B. Thorstad, Knut Wiik Vollset, Hugo de Boer, Katrine Eldegard, Johanna Järnegren, Lawrence Kirkendall, Inger Måren, Anders Nielsen, Erlend B. Nilsen abd Eli Rueness og Gaute Velle (2020). „Assessment of the risk to Norwegian biodiversity and aquaculture from pink salmon (*Oncorhynchus gorboscha*). Scientific Opinion of the Panel on Alien Organisms and Trade in Endangered Species of the Norwegian Scientific Committee for Food and Environment CITES“. Í: *VKM Report 2020:01*. ISSN: 2535-4019.
- VSÓ (2021). *Losun gróðurhúsalofttegunda frá landi. Samantekt á rannsóknum og vöktun og samræmi við kröfur í losunarbókhaldi Íslands*. Tæknileg skýrsla. VSÓ Ráðgjöf.
- Walker, Tom W. N., Ivan A. Janssens, James T. Weedon, Bjarni D. Sigurdsson, Andreas Richter, Josep Peñuelas, Niki I. W. Leblans, Michael Bahn, Mireia Bartrons, Cindy De Jonge, Lucia Fuchslueger, Albert Gargallo-Garriga, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, Sara Marañón-Jiménez, Edda S. Oddsdóttir, Ivika Ostonen, Christopher Poeplau, Judith Prommer, Dajana Radujković, Jordi Sardans, Páll Sigurdsson, Jennifer L. Soong, Sara Vicca, Håkan Wallander, Krassimira Ilieva-Makulec og Erik Verbruggen (2020). „A systemic overreaction to years versus decades of warming in a subarctic grassland ecosystem“. Í: *Nature Ecology & Evolution*, bls. 101–108. DOI: 10.1038/s41559-019-1055-3.
- Walker, Tom W. N., Christina Kaiser, Florian Strasser, Craig W. Herbold, Niki I. W. Leblans, Dagmar Woebken, Ivan A. Janssens, Bjarni D. Sigurdsson og Andreas Richter (2018). „Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming“. Í: *Nature Climate Change* 8.10, bls. 885–889. DOI: 10.1038/s41558-018-0259-x.
- Warner, Emily, Bryndís Marteinsdóttir, Vigdís F Helmutsdóttir, Johan Ehrlén, Sinikka I Robinson og Eoin J O’Gorman (2021). „Impacts of soil temperature, phenology and plant community composition on invertebrate herbivory in a natural warming experiment“. Í: *Oikos* 130.9, bls. 1572–1582.
- Wasowicz, Pawel og Torbjörn Alm (2022). „*Senecio pseudoarnica* Less. (Asteraceae): a new non-native species invading coastal areas in arctic and subarctic Europe“. Í: *Biological Invasions* 24, bls. 1575–1583. DOI: 10.1007/s10530-022-02759-w.
- Wasowicz, Pawel, Guðrún Óskarsdóttir, Guðrún Gísladóttir og Þóra Ellen Þórhallsdóttir (mar. 2022). *Stafafura (Pinus contorta) í Steinadal - mat á ágengni*. Icelandic Institute of Natural History, bls. 1–35.

- Wasowicz, Pawel, Ewa Maria Przedpelska-Wasowicz og Hörður Kristinsson (des. 2013). „Alien vascular plants in Iceland: Diversity, spatial patterns, temporal trends, and the impact of climate change“. Í: *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208 (10-12), bls. 648–673. DOI: 10.1016/j.flora.2013.09.009.
- Wasowicz, Pawel, Andrey N. Sennikov, Kurt B. Westergaard, Kristine Spellman, Michael Carlson, Lyndsey J. Gillespie, Jaakko M. Saarela, Steven S. Seefeldt, Brian Bennett og Christian Bay (2020). „Non-native vascular flora of the Arctic: Taxonomic richness, distribution and pathways“. Í: *Ambio* 49.3, bls. 693–703. DOI: 10.1007/s13280-019-01296-6.
- Weedon, James T., Erland Bååth, Ruud Rijkers, Stephanie Reischke, Bjarni D. Sigurdsson, Edda Oddsdóttir, Jurgen van Hal, Rien Aerts, Ivan A. Janssens og Peter M. van Bodegom (2023). „Community adaptation to temperature explains abrupt soil bacterial community shift along a geothermal gradient on Iceland“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 177, bls. 108914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108914>.
- Westergaard-Nielsen, Andreas, Anders Boding Björnsson, Martin Rudbeck Jepsen, Martin Stendel, Birger Ulf Hansen og Bo Elberling (2015). „Greenlandic sheep farming controlled by vegetation response today and at the end of the 21st Century“. Í: *Science of The Total Environment* 512-513, bls. 672–681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.039>.
- Woodward, Guy, John B. Dybkjær, Jón S. Ólafsson, Gísli M. Gíslason, Elísabet R. Hannesdóttir og Nikolai Friberg (2010). „Sentinel systems on the razor’s edge: effects of warming on Arctic geothermal stream ecosystems“. Í: *Global Change Biology* 16.7, bls. 1979–1991. ISSN: 1365-2486. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02052.x. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2009.02052.x> (skoðað 22.09.2022).
- Zhang, Jing, Alf Ekblad, Bjarni D. Sigurdsson og Håkan Wallander (2020). „The influence of soil warming on organic carbon sequestration of arbuscular mycorrhizal fungi in a sub-arctic grassland“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 147, bls. 107826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107826>.
- Þorsteinn Guðmundsson (2018). *Jarðvegur – Myndun, vist og nýting*. Háskólaútgáfa.
- Þorsteinn Guðmundsson, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson (2018). „Langtímaáhrif nituráburðar á kolefni, nitur og auðleyst næringarefni í snauðri sandjörð“. Í: *Skrína* 4, nr. 2. URL: <https://skrina.is/wp-content/uploads/2018/05/Langt%C3%ADma%C3%A1hrif-nitur%C3%A1bur%C3%B0ar-%C3%A1-kolefni-nitur-og-au%C3%B0leyst-n%C3%A6ringarefni-%C3%AD-snau%C3%B0ri-sandj%C3%B6r%C3%B0.pdf>.
- Þórdís A Kristjánsdóttir (2013). *Jarðræktarrannsóknir 2012*. Bd. nr. 44. Rit LbhÍ. Hvanneyri: Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://lbhi.is/images/pdf/utgefid%5C%20efni/fjolrit%5C%20rannsoknastofnunar%5C%20landbunadarins/rit_lbhi_nr44.pdf.
- Þóroddur Sveinsson (2022). *Nytjaplöntur á Íslandi 2022. Yrki, sem mælt er með fyrir landbúnað, gras- og golfflatir, landgræðslu og garðrækt*. Rit LbhÍ 148, Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit_lbhi_nr_148.pdf.
- Þóroddur Sveinsson, Teitur Sævarsson, María Svavarsdóttir, Bergrún Arna Óladóttir, Þorbjörg Helga Sigurðardóttir, Eiríkur Loftsson og Þórarinn Leifsson (2022). „Langtímatap kolefnis í framræstu ræktarlandi“. Í: *Rit LbhÍ* 149, bls. 69.
- Þórólfur Antonsson og Friðbjófur Árnason (2011). „Elliðaár 2010. Rannsóknir á fiskistofnum vatnakerfisins“. Í: *Veidimálastofnun* (VMST/11030).