

8 Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki Íslands

Samantekt

1. Loftslagsbreytingar, hlýnun, og aukinn styrkur CO₂ í andrúmsloftinu hafa mikil áhrif á lífsskilyrði plantna og dýra á landi. Aukinn styrkur CO₂ hefur áhrif á framleiðni plantna sem lýsir sér m.a. í meiri vexti þeirra. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á ýmsa aðra umhverfisþætti, s.s. veðurfarssveiflur, úrkomu, snjóhulu, bráðnun jökla og vatnafar almennt. Allir þessir umhverfisþættir hafa síðan bein og óbein áhrif, s.s. á flæði næringarefna í vistkerfum, valda breytingum á búsvæðum plantna og dýra, útbreiðslu þeirra og fjölbreytni tegunda, bæði staðbundið og á landsvísi.
2. Stýrðar rannsóknir/tilraunir hafa sýnt að viðbrögð gróðurlenda við hlýnun eru misjöfn. Litlar breytingar hafa orðið í mosaþembum en í fjalldrapamóum hefur hlýnunin leitt til aukins vaxtar viðarkenndra tegunda á kostnað mosa. Fjalldrapamóar friðaðir fyrir beit sýna svipaða svörun, hvað varðar aukinn vöxt, og fjalldrapamóar í reitum þar sem hitastig hefur verið hækkað.
3. Niðurstöður stýrðra rannsókna/tilrauna til að meta áhrif loftslagsbreytinga á viskerfi ferskvatna sýna m.a. að í misheitum lækjum hér á landi jókst magn þörunga og blágrænbaktería á botni, samfara auknum hita og næringarefnainnflæði, og lífsferlar botnlægra hryggleysingja breyttust. Aukinn hiti leiddi einnig til breytinga í fæðuvef og vistkerfi lækjanna. Jafnframt sýna rannsóknir að heildarfrumframleiðni og þéttleiki vatnadýra í flestum fæðuþrepum jókst en það dró úr fjölbreytileika samfélaga þeirra og fjölbreytni þörunga minnkaði. Hið síðasttalda veldur áhyggjum um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki ferskvatns á Íslandi.
4. Fyrstu niðurstöður stýrðra rannsókna sem nýta jarðvegshlýnun frá heitum berggrunni til að skoða áhrif hlýnunar á þurrlandisvistkerfi sýna að vistkerfin hafa umtalsvert þanþol gagnvart hlýnun, um rúmlega 5°C, en þegar hlýnunin fer upp fyrir þau mörk þá „hrynja“ vistkerfin.
5. Rannsóknir á gróðurfarsbreytingum á Íslandi síðustu áratugi, með langtímavöktun gróðurreita í úthaga og fjarkönnun, hafa leitt í ljós töluvert mikla aukningu gróðurs á árunum 1982–2013. Helstu ástæður þessarar aukningar eru taldir nokkrir samverkandi þættir s.s. minni sauðfjárbreit og láglendi og hlýrra loftslag sem eykur vöxt gróðurs en leiðir einnig til hopunar jökla og þ.a.l. landnáms gróðurs á nýjum svæðum.
6. Hlýnun loftslags hefur haft áhrif á margar fuglategundir á Íslandi. Útbreiðslumörk margra tegunda eru að breytast vegna hlýnunar og breytinga sem verða á búsvæðum þeirra. Tíðni landnáms nýrra fuglategunda hér á landi hefur aukist eftir því sem leið á 20. öldina. Komu- og varptími sumra farfugla, eins og jaðrakans, hefur breyst í takt við hlýnun loftslags. Breyttur varptími getur haft áhrif á afkomu margra fuglategunda. Varpfuglum í sjófuglabyggðum við norðanvert Atlantshaf hefur fækkað verulega frá síðustu aldamótum og flestir sjófuglastofnar virðast fara minnkandi.
7. Áhrif loftslagsbreytinga á íslensk spendýr eru í flestum tilvikum óbein og tengjast fyrst og fremst breytingum á fæðuframboði. Breytileiki í veðrakerfum og hafstraumum hefur áhrif á sjávarlífverur og sýnt hefur verið fram á að það hafi áhrif á fæðuval sumra spendýra. Gera má ráð fyrir

að fækkun í sjófuglastofnum hafi áhrif á afkomu refa, sérstaklega á þeim svæðum þar sem sjófuglar eru stór hluti fæðunnar.

8. Með hlýnandi loftslagi og vegna breytinga á gróðurfari, þ.m.t. aukinni skógrækt, hafa orðið breytingar á útbreiðslu margra smádyra (skordýra og annarra hryggleysingja). Einnig hefur landnám nýrra tegunda aukist en merki þess sjást nú víða.
9. Áhrif loftslagsbreytinga á lifríki í ferskvatni eru flókin og mismunandi eftir gerð straum- og stöðuvatna og aðstæðum á hverjum stað. Snjóbráðnun á hálendinu getur haft mikil kælingaráhrif á ár og læki. Gera má ráð fyrir að við frekari hlýnun styttest sá tími sem ís hylur vötn og í sumum tilfellum hætti vötn alfarið að leggja á veturna. Hlýnun vatns í lækjum og ám mun í heildina leiða til aukinnar frumframleiðni, aukins vaxtarhraða dýra og minni fjölbreytileika lífvera. Búast má við að kulvíssum tegundum fjölgi en kulsæknar tegundir lífvera láti undan síga og útbreiðsla þeirra dragist saman. Á meðal fiska sem virðast vera sérstaklega viðkvæmir fyrir hlýnun, einkum í grunnum vötnum, er bleikja og eru skýr dæmi um fækkun hennar hér á landi.
10. Miklar líkur eru á því að hlýnandi loftslag muni auðvelda ýmsum tegundum dýra og plantna, þ.m.t. lífverum sem valda sjúkdómum, s.s. sníkjudýrum og örverum, að nema hér land en hlýnun mun einnig hafa veruleg áhrif á útbreiðslu framandi tegunda sem þegar eru fyrir í landinu. Aukin skaðsemi af völdum framandi ágengra tegunda getur aukist með hlýnandi loftslagi. Mikilvægt er að fyllstu varúðar sé gætt við innflutning, notkun og dreifingu á framandi lífverum, hvort sem um er að ræða hættu á að skaða náttúrulegt lifríki landsins eða t.d. ýmsa ræktun. Mótvægisáðgerðir vegna loftslagsbreytinga verða að taka tillit til verndunar líffræðilegrar fjölbreytni.
11. Við vinnslu þessa kafla kom áþreifanlega í ljós að mikill skortur er á rannsóknum og vöktun á lifríki landsins í tengslum við loftslagsbreytingar. Hægt var að finna ýmsar rannsóknir og vöktun sem gefa góðar vísbendingar um orsakasambandi milli loftslagsbreytinga og ýmissa náttúrufarsþátta. Það sem skortir hins vegar verulega er vöktunar- og rannsóknaráætlun á lykilsþáttum íslenskrar náttúru þar sem tengsl við loftslagsbreytingar eru beinn



Mynd 8.1 Haftyrðill, mynd eftir teikningu Benedikts Gröndal frá 1899–1900.

þáttur í slíkri vöktunaráætlun en ekki reynt að skýra út orsakasambandi milli breytinga á umhverfisþáttum og náttúrufari eftir á.

8.1 Inngangur

Veðurfar hefur mikil áhrif á lífsskilyrði lífvera. Í þessum kafla er fyrst og fremst fjallað um lifríki á landi, þ.m.t. ferskvatni, þótt ekki verði komist hjá því að tengja það að einhverju leyti við hafið umhverfis Ísland, en um það er ritað sérstaklega í kafla 7 í þessari skýrslu. Loftslagsbreytingar geta bætt lífsskilyrði sumra tegunda en haft neikvæð áhrif á aðrar. Við hlýnun loftslags má gera ráð fyrir að hánorrænar tegundir sem eru aðlagðar köldu loftslagi fari að öllu jöfnu halloka fyrir tegundum sem þrífast betur við hærri hita eða þola betur veðurfarssveiflur. Mynd 8.1 sýnir haftyrðil sem er gott dæmi um hánorræna fuglategund sem ekki verpir lengur hér á landi, en tegundin verpti síðast 1995 í Grímsey og var þar á suðurmörkum útbreiðslusvæðis síns.

Ísland er í kaldtempraða beltinu en hefur, sérstaklega á hálendinu og nyrstu annesjum, mörg einkenni

heimskautasvæða¹. Lofslagsbreytingar frá landnámi eru nokkuð vel þekktar frá hlýviðraskeiði sem var við upphaf landnáms á 9. öld til litlu-ísaldar (~1300–1900) og svo til heimshlýnnunar á okkar dögum². Á þessu tímabili sveiflast veðurfar á Íslandi á milli þess að vera á mörkum tempraða beltisins og heimskautasvæða og einkennist lífríki landsins af því, en auk þess er landið eyja sem einnig hefur áhrif á tegundasamsetningu³. Það er þó ekki bara veðurfar sem hefur áhrif á lífsskilyrði lífvera heldur líka aðrir þættir í náttúrunni, s.s. tíðar raskanir m.a. vegna eldvirkni, og svo bein og óbein áhrif af mannavöldum, s.s. eyðing búsvæða vegna ýmissa framkvæmda, innflutningur ágengra framandi tegunda og mengun.

Við loftslagsbreytingar er það ekki eingöngu hærrí hiti sem ræður afkomu plantna og dýra heldur einnig ýmsar breytingar sem verða á vistkerfum og búsvæðum tegunda. Hækkun á styrk koldíoxíðs, CO₂, í andrúmslofti hefur t.d. bein áhrif á ljóstillifun plantna og getur þannig leitt til meiri vaxtar gróðurs (sjá einnig grein 8.3.1). Auk þess sem styrkur CO₂ eykst og hiti hækkar verða jafnframt breytingar á ýmsum öðrum þáttum í náttúrunni, s.s. veðurfarsveiflum, úrkomu, snjóhulu, bráðnun jökla og vatnafari almennt (sjá einnig greinar 5.1 og 5.2). Allar þessar umhverfisbreytingar geta síðan haft bein og óbein áhrif á flæði næringarefna í vistkerfum sem getur valdið breytingum á búsvæðum plantna og dýra, útbreiðslu þeirra og fjölbreytni, bæði staðbundið og á landsvísu. Mjög erfitt er því að segja fyrir um hvaða breytingar verða nákvæmlega í náttúrunni í framtíðinni og hver áhrifin verða á útbreiðslu og stofnstærðir tiltekinna tegunda. Almennt má segja að hærri meðalhiti hér á landi undanfarin ár hafi aukði gróðurþekju en aðrir áhrifaþættir spila þar einnig inn í, svo sem minni beit og landgræðsla⁴. Við hækkun vatnshita í ám eru líkur til þess að magn og framleiðni þörungna á botni aukist og að lífsferlar botndýra og framleiðni breytist (sjá grein 8.3.3).

Hér á eftir verða tekin nokkur dæmi um rannsóknir og vöktun sem sýna breytingar sem hafa orðið í náttúru Íslands og rekja má að einhverju leyti til loftslagsbreytinga. Í fyrstu er fjallað um rannsóknir þar sem reynt er að líkja eftir hugsanlegum afleiðingum loftslagsbreytinga, t.a.m. hlýnun, auknu magni af koltvísýringi í andrúmslofti, breyttu rennsli í ám og ákomu áburðarefna af landi. Markmið þessara stýrðu rannsókna er að líkja eftir þeim aðstæðum sem geta

skapast vegna loftslagsbreytinga og meta hvernig lífríki landsins bregst við breyttum aðstæðum. Þar á eftir eru rakin nokkur dæmi um breytingar sem hafa orðið í náttúrunni og rekja má a.m.k. að einhverju leyti til loftslagsbreytinga. Rétt er að taka fram að hér er ekki um tæmandi yfirlit að ræða.

8.2 Stýrðar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á vistkerfi Íslands

Á Íslandi eru og hafa verið í gangi þrjú stór verkefni á landi með stýrðum rannsóknum til að kanna hvaða áhrif hlýnun hefur á lífríki og aðra náttúrufarsþætti til lengri tíma. Þetta eru verkefnin:

1. ITEX
2. EURO-LIMPACS og aðrar rannsóknir á jarðhitasvæðum á Hengilssvæðinu
3. FORHOT

ITEX (*International Tundra Experiment*) verkefnið er stórt, alþjóðlegt samstarfsverkefni um áhrif loftslagsbreytinga á gróðurfar norðurslóða⁵. Á Íslandi fer það fram í fjalldrapamóum á Auðkúluheiði og mosabembum í Pingvallahrauni en notuð eru opin harðplastskýli til að hækka lofthita um 1–2°C (mynd 8.2). Rannsóknirnar hófust hér á landi á árunum 1995–1997 og hefur þeim síðan verið fylgt eftir, eða í um 20 ár. Viðbrögð gróðurlenda við hlýnun hafa verið misjöfn. Breytingar hafa verið litlar í mosabembum þar sem rótarlaus mosinn er lítið háður jarðvegsþáttum, en í fjalldrapamóum hefur hlýnunin leitt til aukins vaxtar viðarkenndra tegunda á kostnað mosa⁶. Fjalldrapamóar á sama svæði sem hafa verið fríðaðir fyrir beit sýna svipaða svörun, hvað varðar aukinn vöxt, og fjalldrapamóar í reitum þar sem hitastig hefur verið hækkað. Segja má að bæði hlýnun og beitarfríðun bæti lífsskilyrði í fjalldrapamóum og lífmassi aukist⁷. Niðurstöðurnar koma vel heim og saman við það sem hefur verið að gerast á mörgum lágarkískum túndrusvæðum í heiminum þar sem útbreiðsla runnagróðurs er mjög að aukast í kjölfar hlýnnunar^{8,9}. Það styrkir einnig niðurstöður ITEX að síðustu 20 ár hafa orðið sambærilegar breytingar á gróðurfari á ómeðhöndluðum samanburðarreitum verkefnisins í kjölfar þeirra loftslagsbreytinga sem þegar hafa orðið á tímabilinu¹⁰.

Mynd 8.2. ITEX-tilraunasvæði á Auðkúluheiði sem sett var upp 1997. Í skýlum sem eru opin í toppinn (OTC) hækkar sumarihitinn um 1–2°C. Gróður er mældur innan og utan skýlanna og fylgst með breytingum með árunum. Innsetta myndin sýnir mun á stærð krækiberja innan og utan skýla haustið 1999. (Sjá tilvísun 6, ljósmyndir: Borgþór Magnússon.)



EURO-LIMPACS verkefnið hófst árið 2004, en markmið þess var að meta áhrif hnattrænna breytinga á vistkerfi ferskvatna í Evrópu^{11,12}. Einn liður í þeim rannsóknum fólst í að nýta lækni í Hengladölum (mynd 8.3) á SV-landi sem vegna jarðhita eru misheitir, til að spá fyrir um hugsanleg áhrif hlýnunar og afleiðingar hennar, t.a.m. aukinnar ákomu næringarefna af landi á vistkerfi lækjanna. Helstu niðurstöður sýndu að magn þörunga og blágrænbaktería á botni jókst samfara auknum hita og næringarefnainnflæði¹³ og lífsferlar botnlægra hryggleysingja breyttust með auknum hita þannig að fleiri kynslóðir rykmýs náðu að þroskast í heitari lækjunum en þeim kaldari¹⁴. Enn fremur breyttust fæðuvefir¹⁵, síðframléiðsla jókst^{16,17} og virkni vistkerfa lækjanna breyttist samfara auknum hita¹⁸. Eftir að EURO-LIMPACS verkefninu lauk árið 2008 hafa önnur alþjóðleg rannsóknaverkefni tekið við og standa rannsóknir tengd þeim enn yfir. Sameiginleg markmið þeirra rannsókna er m.a. að mæla á hvaða hátt vistkerfi fallvatna bregðast við aukinni hlýnun og næringarefnaákomu. Helstu niðurstöður þeirra rannsókna sýna að heildarfrumframleiðni, þekja og lífmassi vatnplantna og blágrænna baktería jókst með hlýnun¹⁹, en fjölbreytni þörunga minnkað²⁰. Þá varð einnig aukning í niðurbrotshraða og niturbindingu í lækjunum við hlýnunina, sem jók frjósemi vatnsins²¹. Þéttleiki vatnadýra í flestum fæðuþrepum varð meiri við hlýnun, en það dró hins vegar úr fjölbreytileika

samfélaga þeirra¹⁸. Fæðuþrepum fjölgaði einnig í lækjunum og rándýr (fiskar og hryggleysingjar) urðu meira áberandi samfara hækkandi hita¹³. Heildarlífmassi breyttist þó ekki afgerandi og almennt má segja að þrátt fyrir aukna framleiðni þá fóstari heitari lækirnir tegundafátækari samfélög en venjulegir kaldir lækir. Það er einkum hið síðasttalda sem veldur áhyggjum um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki ferskvatns á Íslandi.

Niðurstöðum rannsókna á áhrifum heits affallsvatns frá Nesjavallavirkjun á botndýralíf í fjörubelti Þingvallavatns svipar til niðurstaðna rannsókna á heitu og köldu lækjunum í Hengladölum. Rannsóknirnar í Þingvallavatni sýndu m.a. að hlýnun vatns upp að vissu marki ýtti undir vöxt og viðgang botndýra, mismikið eftir tegundum, en við frekari hlýnun dró úr þéttleika og fjölbreytni. Við miðlungshlýnun vatns, allt að ~10°C umfram bakgrunnsgildi, jókst heildarþéttleiki hryggleysingja, einkum meðal lírfa rykmýstegundanna *Paratanytarsus sp.* og *Cricotopus sylvestris* og vatnabobba (*Radix peregra*). Vatnabobbi sýndi auk þess merki um aukinn vaxtarhraða og lægri dánartíðni. Frekari hlýnun vatns, 10–17°C umfram bakgrunnsgildi, leiddi bæði til fækkunar á fjölda tegunda og þéttleika dýra²².

FORHOT (*Natural soil warming in natural grasslands and a Sitka spruce forest in Iceland*) er yngsta verkefnið sem hófst af fullum krafti 2013²³. Þar, líkt og í straumvatnsverkefninu í Hengladölum, er jarðvegs-hlýnun nýtt frá heitum berggrunni til að rannsaka áhrif



Mynd 8.3 Unnið við mælingar og sýnatökur í köldum og heitum lækjum í Hengladölum þar sem reynt hefur verið að spá fyrir um áhrif loftslagshlýnunar á vistkerfi straumvatna. Báðir lækirnir á myndinni eru úr uppsprettum. Að jafnaði er hiti í þeim til vinstri um og yfir 20°C en vatnshiti í þeim til hægri er undir 8°C. (Ljósmynd: Jón S. Ólafsson.)

hlýnunar á þurrlendisvistkerfi²⁴. Í því eru borin saman skammtímaáhrif hlýnunar á ræktaða greniskóga og náttúruleg graslendi í nágrenni Hveragerðis, sem byrjuðu að hitna eftir Suðurlandsskjálftann 29. maí 2008. Það að vitað er hvernær þurrlendisvistkerfin tóku að hlýna gerir FORHOT samanburðarhæft við aðrar stýrðar upphitunartilraunir í heiminum²⁵. Fyrstu niðurstöður verkefnisins sýna að þurrlendisvistkerfin hafa umtalsvert þanþol gagnvart hlýnun um rúmlega 5°C, en þegar hlýnunin fer upp fyrir þau mörk þá „hrynja“ vistkerfin, þ.e. miklar breytingar verða þá á tegundasamsetningu gróðurs²⁶, smádyra og örvera þeirra, jarðvegsuppbygging breytist²⁷ og hringrás næringarefna og kolefnis opnast þannig að mikið af efnum berst út í grunnvatn eða upp til andrúmslofts²⁸. Þessar fyrstu niðurstöður FORHOT sýna mikilvægi þess að halda hlýnun norðurslóða innan þeirra marka sem gert er ráð fyrir í Parísarsamkomulaginu.

Stýrðar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á lífríkið eru mjög mikilvægar til að styrkja fræðilegan skilning og spár um hvaða áhrif breytt loftslag getur haft á Íslandi og hvaða afleiðingar gæti þurft að takast á við, bæði vistfræðilega og fjárhagslega.

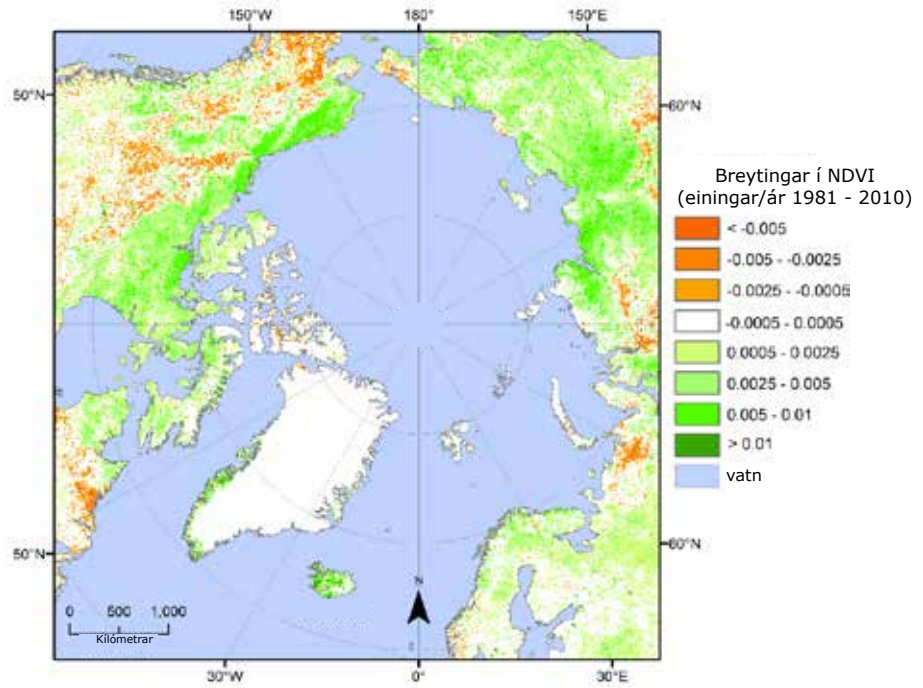
8.3 Áhrif loftslagsbreytinga á gróðurfar og dýralíf

8.3.1 Gróðurfar

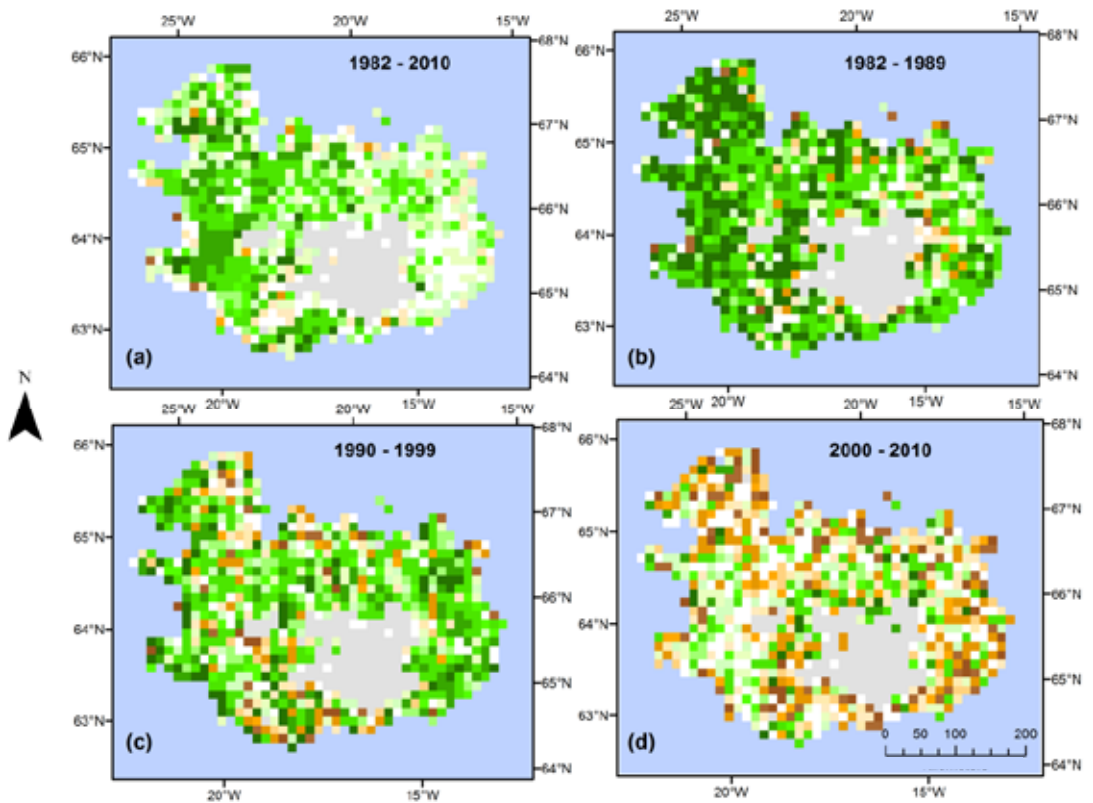
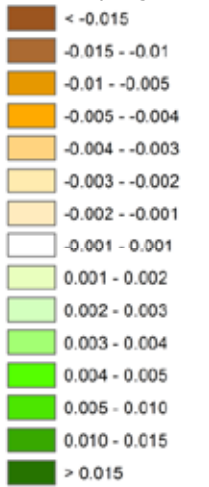
Í síðustu skýrslu vísindanefndarinnar²⁹ var fjallað um ýmsar eldri rannsóknir og vöktun á áhrifum loftslagsbreytinga á vistkerfi landsins sem fram fóru fyrir 2008. Þar má t.d. nefna rannsóknir á áhrifum hækkads styrks CO₂ í andrúmslofti á framleiðni grastegundarinnar finnungs³⁰ á Snæfellsnesi. Hækkandi styrkur koldíoxíðs (CO₂) í andrúmslofti hefur aðallega tvíþætt áhrif á gróðurfar. Annars vegar hefur hækkandi styrkur CO₂ bein áhrif á ljóstíllifun þar sem plöntur (frumframleiðendur) umbreyta sólarorku í efnaorku með því að binda CO₂ í sykrur. Séu aðrir umhverfisþættir ekki takmarkandi má gera ráð fyrir að hækkandi styrkur CO₂ í andrúmslofti leiði til meiri framleiðni og þ.a.l. meiri vaxtar gróðurs³¹.

Hins vegar hefur aukinn styrkur CO₂ einnig áhrif á loftslag en veðurfarsþættir hafa mikil áhrif á lífsskilyrði plantna og þar með á gróðurfar landsins. Þeir þættir sem mestu skipta fyrir gróður eru lengd vaxtartíma, hiti, úrkoma og vindafar. Áhrifin geta verið bein og

Mynd 8.4 Leitni í hámarksgróðurstuðli (NDVI) á landi, að sumri, árin 1982–2010 í löndum umhverfis norðurskautið. Vesturhluti Íslands er meðal svæða þar sem grænkun varð hvað mest á tímabilinu. (Heimild: sjá tilvisun 33.)



NDVI breyting á ári



Mynd 8.5 Leitni í hámarksgróðurstuðli (NDVI) á Íslandi að sumri eftir tímabilum á árunum 1982–2010. Vesturland og Norðvesturland eru meðal svæða þar sem grænkun varð hvað mest á tímabilinu. (Heimild: sjá tilvisun 33.)



Mynd 8.6. Rústamýravist.
(Ljósmynd: Borgþór Magnússon.)

óbein. Bein áhrif hækkandi hita birtast einkum í auknum vexti og útbreiðslu en óbein áhrif í auknu framboði næringarefna, sem er háð jarðvegsraka og því aðstæðum á hverjum stað, vegna hraðari umsetningar þeirra í jarðvegi. Hærri meðalhiti yfir vaxtartíma veldur því m.a. að gróðurmörk færast ofar í landið. Hlýindi að vetri, ásamt breytingum á snjóá- og svellalögum, geta einnig haft veruleg og oft neikvæð áhrif á gróður²⁹. Vindur hefur mikil áhrif á gróðurfari. Hann færir hita plantna nær lofthita og getur haft óbein áhrif á vetrarskemmdir trjáa og runna, snjóalög og jarðvegs-eyðingu. Sömuleiðis geta breytingar á gróðurfari haft mikil áhrif á vindhraða við yfirborð. Hávaxinn gróður, einkum tré og runnar, gerir yfirborðið grófara og dregur úr vindhraða³². Þar með batna staðbundin skilyrði fyrir annan gróður, a.m.k. á meðan trjálagið verður ekki of þétt.

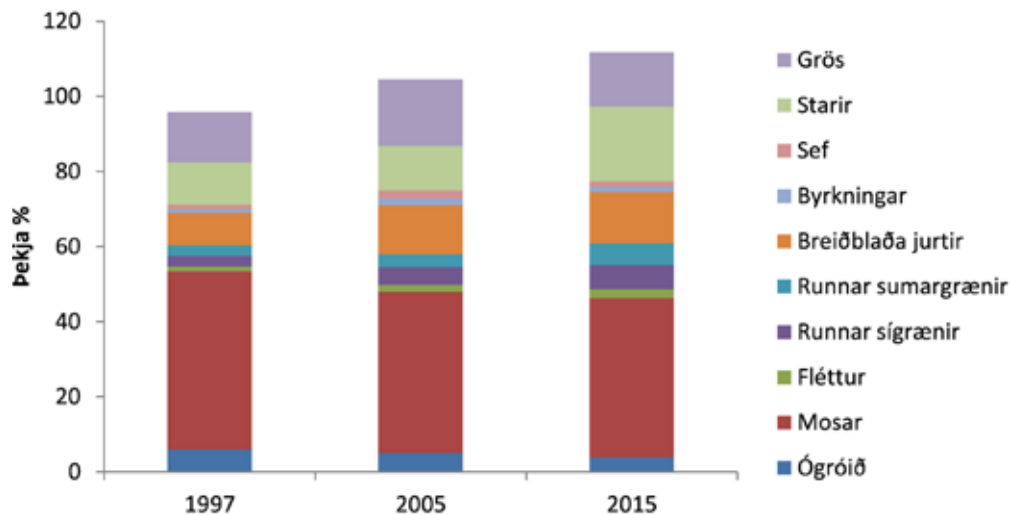
8.3.1.1 Breytingar á gróðurfari

Endurtekin landúttekt á gróðurfari landsins er af skornum skammti, en eina gróðurlendið sem hefur verið metið endurtekið frá því um 1972 eru íslensku birkiskógarnir, sem fóru að auka útbreiðslu sína upp úr 1990 (sjá einnig umfjöllun í grein 9.3).

Rannsóknir á gróðurfarsbreytingum á Íslandi með fjarkönnun síðustu áratugi hafa einnig leitt í ljós töluvert miklar breytingar á gróðurfari. Rannsóknirnar sýndu mikla aukningu gróðurs, mælt sem NDVI³³ frá

1982 fram til ársins 2013 (mynd 8.4). Á tímabilinu 1982–1989 varð aukningin mest, minni næstu 10 ár þar á eftir, 1990–1999, og á árunum 2000–2010 virtist draga verulega úr aukningu á gróðri þótt hana megi víða sjá. Mesta aukning í gróðri sést á Vesturlandi og Norðvesturlandi (mynd 8.5). Fróðlegt er að bera þessar niðurstöður saman við hlýnun á Íslandi síðustu áratugina (mynd 4.13), sem sýnir að hlýnunin er meiri vestan- og norðvestantil á landinu og var einna áköfust um aldamótin. Nánari greining á gróðuraukningunni benti til að helstu ástæður hennar væru nokkrir samverkandi þættir, s.s. minni sauðfjárbreit á afreittum og láglandi og hlýrra loftslag sem eykur vöxt gróðurs en leiðir einnig til hopunar jökla og þ.a.l. landnáms gróðurs á nýjum svæðum. Einnig á landgræðsla og skógrækt hlut að máli. Þau svæði sem sýndu minni grósku en áður voru þar sem miklar breytingar urðu af mannavöldum, t.d. Háslón Kárahnjúkavirkjunar en einnig af náttúrulegum ástæðum, s.s. vegna tveggja eldgosu, í Eyjafjallajökli 2010 og Grímsvötnum 2011.

Mynd 8.6 sýnir rústamýri, en það er vistgerð sem hefur dregist saman með hlýnandi veðurfari frá lokum 19. aldar. Rústamýrar finnast eingöngu þar sem er sífreri í jörðu. Núna finnst þessi vistgerð aðeins á fjórum svæðum hérlendis³⁴ og þekur um 70 km². Með áframhaldandi hlýnun munu rústir í hálendismýrum sennilega hverfa að mestu hér á landi³⁵ og eftir standa hengistaraflóavist eða aðrar mýravistir hálendisins.



Mynd 8.7 Meðalþekja plöntuhópa og ógróins yfirborðs í 24 föstum reitum í láglendishögum og á afréttum á Norðurlandi og Suðurlandi. Reitirnir voru settir niður og mældir 1997–1998 og endurmældir 2005 og 2015. (Heimild: sjá tilvísun 38.)

8.3.1.2 Hagaverkefnið

Í skýrslu vísindanefndar frá 2008 var fjallað um langtíamælingar í rannsóknareitum í úthaga sem eru hluti af verkefninu *Vöktun haglendis*. Mælingarnar fara fram víða á Norðurlandi og Suðurlandi en þær hófust á árunum 1997–1998³⁶ og síðan var aftur mælt 2005 og síðast 2015. Í öllum reitum fór fram ástandsmat, einfaldar gróðurmælingar og ljósmyndun var endurtekin á öllum stöðum. Mæld var gróðurþekja, rof, grashæð, beitarummerki, uppskera og pH, nitur og kolefni í jarðvegi. Mynd 8.7 sýnir helstu niðurstöður þessara mælinga. Niðurstöður fyrri mælinga 2005 sýndu aukna framleiðni gróðurs og þekju frá 1997, en niðurstöður frá 2015 sýna að gróska lands hefur enn aukist og að dregið hefur úr rofi og beitarálagi, bæði á láglendi og til heiða. Breytingar á gróðri og ástandi lands eru þó minni nú en á fyrra tímabili milli 1998 og 2005. Líkleg skýring á þessu er veruleg loftslagshlúnun á landinu frá því um 1995 til 2005, en hægt hefur á henni síðustu ár (sjá nánar grein 4.3), en fremur litlar breytingar hafa hins vegar orðið á fjölda hrossa og sauðfjár í landinu undanfarnin 20 ár³⁷ og beitaráhrif því líklega svipuð og áður.

Erfitt getur verið að skilja í sundur áhrif hlýnandi veðurfars og breytinga sem samtímis hafa orðið á landnýtingu, einkum búfjárbreit. Til að fá óyggjandi svör við því hvort breytingar á gróðurfari og öðru lífríki eru vegna loftslagsbreytinga eða annarra þátta er mikilvægt að gera beinar tilraunir samhliða vöktunar-

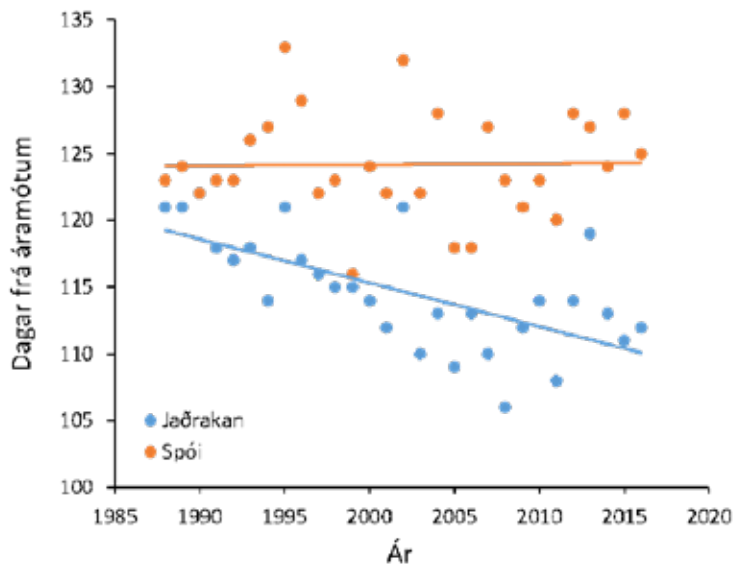
mælingum, t.d. með því að friða stór svæði fyrir beit í grennd við framangreinda rannsóknareiti. Með því að rannsaka svæði þar sem áhrifa landnýtingar gætit ekki má fá áreiðanlegri hugmynd um áhrif loftslagsbreytinganna einna og sér.

Mikilvægt er einnig að rannsaka svæði þar sem ekki gætit neinna áhrifa frá landnotkun fyrr eða síðar, sérstaklega beit. Slík svæði eru vandfundin á Íslandi en gömul jökulsker bjóða upp á einstakar aðstæður til að meta áhrif loftslagsbreytinga óháð landnotkun. Nýlega voru endurteknar mælingar í föstum rannsóknareitum í jökulskerjum í Breiðamerkurjökli og Vatnajökli. Í áratugi hefur reglulega verið fylgst með breytingum á gróðurfari í jökulskerjum og sumstaðar í yfir 50 ár, s.s. í Káraskeri og Bræðraskeri, eða frá árinu 1965. Fleiri plöntutegundir vaxa nú á jökulskerinu Máfabýggðum en fyrir 35 árum síðan³⁹. Niðurstöður vöktunarinnar sýna að plöntutegundum hefur fjölgað og gróðurmörk breyst með hlýnandi loftslagi. Fjölgun plöntutegunda getur einnig verið afleiðing náttúrulegrar framvindu enda tekur það bæði mislangan tíma fyrir tegundir að dreifast inn á ný svæði og að skapa skilyrði fyrir þær að nema land og þrífast.

8.3.2 Dýralíf

8.3.2.1 Fuglar

Eins og áður hefur komið fram ræður veðurfar miklu um hvar tegundir dýra og plantna geta lifað. Margar



Mynd 8.8. Komutími farfugla að vori. Ættingjarnir jaðrakani og spói eru báðir farfuglar og algengir varpfuglar á láglandi Íslands. Jaðrakani er skammdrægur farfugl sem hefur vetursetu í V-Evrópu en hann hefur flýtt komu sinni til Íslands að vori síðustu ár. Spói er langdrægur farfugl sem hefur vetursetu í V-Afríku en hann hefur ekki breytt komutíma sínum. Munur á þessum tveimur tegundum endurspeglar vel þann mun sem er almennt á fartíma skammdrægra og langdrægra farfugla á Norðurhveli. Stofnar langdrægra farfugla standa almennt mun verr og er það rakið til þess að þeir hafa ekki aðlagð komutíma sinn og varp hækkandi hita. Gögnin sýna fyrstu komutíma jaðrakans og spóa í Laugarás í Biskupstungum og hafa verið birt til 2009 en eru hér uppfærð til 2015. (Heimild: sjá tilvísun 46).

tegundir fugla eru t.d. aðlagðar votlendi, allt frá vötnum til sjávar, aðrar mólendi, lauf- eða barrskógum, og enn aðrar hánorrænum túndrum eða heiðum. Það er ekki eingöngu fæðuframboðið og hæfileikinn til að nýta tiltekna fæðu sem ræður búsvæðavali fugla heldur einnig aðlögun að loftslaginu hvort sem það er kuldi heimskautasvæðanna eða steikjandi hiti þegar nær dregur miðbaug. Sumar tegundir geta aðlagð sig breyttum aðstæðum, ef breytingarnar eru ekki of miklar, en aðrar verða að flytja sig til í leit að aðstæðum sem henta. Hvarf haftyrdíls, hánorrænnar tegundar sem síðast verpti í Grímsey hér á landi, má að öllum líkindum a.m.k. að hluta rekja til hlýnandi veðurfars. Um 35 nýjar fuglategundir hafa hins vegar reynt að nema land á síðustu öld og margar sest hér að. Má þar nefna fuglategundir eins og svartþröst, stara, sílamáf, stormmáf, brandönd og helsingja og virðist tíðni landnáms hafa aukist eftir því sem leið á 20. öldina⁴⁰. Mildara veðurfar, einkum að vetri til, getur aukið líkur á því að fuglar sem flækjast hingað nái fótfestu, en myndun nýrra búsvæða er einnig mikilvægur þáttur. Má í því sambandi til dæmis nefna skógarfuglana glókoll, skógarsnípu og krossnef sem nýlega hófu hér varp^{41,42,43}.

Varpfuglum í sjófuglabyggðum við norðanvert Atlantshaf hefur fækkað verulega frá síðustu aldamótum og flestir sjófuglastofnar virðast fara minnkandi en nánar er fjallað um sjófugla í grein 7.4.

Til að auka skilning okkar og fylgjast með breytingum

sem geta orðið á útbreiðslu og fari fugla eða annarra dýra vegna loftslagsbreytinga þarf m.a. að vakta útbreiðslumörk þeirra og sjá hvort tengsl eru milli hlýnunar og útbreiðslubreytinga. Einnig má rannsaka breytingar á fartíma farfugla, einkum að vori, en fartími getur tengst afkomu í gegnum tækifæri til varps og hugsanlegra breytinga á varptíma⁴⁴. Þá má einnig rannsaka tengsl milli afkomu (varpárangurs og lífslíkna) og hita beint.

Rannsóknir í Evrópu og Norður-Ameríku sýna að skammdrægir farfuglar hafa flýtt komu sinni meira en langdrægir. Stofnbreytingar innan þessara hópa sýna einnig að tegundum langdrægra farfugla, sem ekki hafa náð að laga fartíma sinn að breyttum aðstæðum, fækkar hraðar en hinum⁴⁵. Hér á landi væru skammdrægir farfuglar þeir sem hafa vetursetu í Vestur-Evrópu en langdrægir þeir sem hafa vetursetu í Afríku eða við sunnanvert Atlantshaf. Komutími íslenskra farfugla hefur verið lítið kannaður en þó eru til upplýsingar um komutíma algengra farfugla í uppsveitir Árnassýslu á tímabilinu 1988–2009⁴⁶. Greining á gögnunum sýnir að íslenskir farfuglar flýttu almennt komutíma sínum á tímabilinu svo miklu munar og sýnir komutími bæði tengsl við vorhita á Íslandi og Norður-Atlantshafs-sveifluna⁴⁷. Þar sem breytileiki í hita í apríl, þeim mánuði sem flestir farfuglar koma til landsins, var mjög mikill á þessu tímabili sýna niðurstöðurnar kannski frekar sveigjanleika íslenskra farfugla heldur en að hér sé um langtímatilhneigingu að ræða. Mynd 8.8 sýnir



Mynd 8.9 Jaðrakan.
(Ljósmynd: Erling Ólafsson.)



Mynd 8.10 Æðarblikar.
(Ljósmynd: Trausti Baldursson.)

samanburð á komutíma jaðrakans (mynd 8.9) og spóa, en breytingar á fartíma eru drifnar áfram af nýliðum í stofninum, þ.e. að ungar sem koma fyrir úr eggjum að vori virðast koma fyrir að vori þegar þeir fljúga fyrst norður til landsins tveimur árum seinna⁴⁸. Fjölgun jaðrakans, einkum í kaldari landshlutum, virðist mega rekja til þess að jaðrakanar, sem verpa almennt fyrir í hlýrri vorum, liggja skemur á og ungarnir eru fljótari að verða fleygir⁴⁸. Við þetta aukast líkur á að fuglarnir komist á vetrarstöðvar og þá líkurnar á því að þeir skili sér aftur á varpstöðvar hér á landi. Þá sýna nýjar rannsóknir að varpárangur jaðrakans á stórum svæðum er betri þegar vor eru hlý en þau tengsl geta skýrt útbreiðsluaukningu tegundarinnar um landið⁴⁹.

Stofnbreytingar hjá æðarfugli (mynd 8.10) hafa verið tengdar við breytileika í veðurfari⁵⁰. Stofnvísitölur eru m.a. byggðar á fjölda hreiðra sem æðarbændur telja í vörpum og ná fáeinar tímaseriur allt aftur til aldamótanna 1900 en flestar eru styttri. Einnig eru til upplýsingar um tímasetningu varps og eggjafjölda úr fáeinum vörpum⁵⁰. Niðurstöður rannsókna sýna að

stofnstærð æðarfugls er lítt næm fyrir venjulegum sveiflum í veðri. Öfgakennð vetrarveður eins og frostaveturinn 1918 geta hins vegar haft veruleg áhrif á lífslíkur fullorðinna fugla. Jafnframt sýna rannsóknir erlendis að ísmyndun að vetri og hve hratt ís bráðnar að vori hefur áhrif á afkomu æðarfugla⁵¹. Tengsl veðurfars, varptíma og stofnbreytinga sýna talsverðan breytileika milli varpa en líklegt er að staðbundnar aðstæður, t.d. fæðuframboð, hafi meiri áhrif á æðarfugl heldur en veðurfar af þeim breytileika sem hefur verið síðustu öldina^{52,53}.

Hér á landi er lítið um rannsóknir sem hafa haft þann tilgang að tengja breytileika í veðurfari við lýðfræði fugla eða annarra dýra. Breytileiki í lýðfræði, sem rekja má til veðurfars, bendir til þess að loftslagsbreytingar geti og muni hafa áhrif, t.d. á varptíma æðarfugls⁴⁴. Nýlegar rannsóknir á grágæs⁵⁴ sýna t.d. að verulegur munur er eftir landshlutum á varptíma og varpárangri grágæsa en þær verpa almennt fyrir og gengur betur þar sem er hlýrra. Einnig sýna rannsóknir á jaðrakan, sem nefndar voru fyrir, að varpárangur þeirra er betri þegar



Mynd 8.11. Refur. (Ljósmynd: Wilhelm Gunnarsson.)

vor eru hlý. Líklegt er að hliðstæður finnist í mörgum stofnum ef að er gáð⁴⁹. Vond staða sjófuglastofna við Ísland er að koma æ betur í ljós og hefur verið rakin til breytinga á fæðuframboði sem líklega eru drifnar af loftslagsbreytingum. Rannsóknir á kríum á Vesturlandi benda til sömu þróunar⁵⁵. Nánar er fjallað um breytingar á stofnum sjófugla hér við land í grein 7.4.

Talsvert vantar á að hægt sé að spá fyrir um áhrif loftslagsbreytinga á íslenska fugla nema með mjög almennum hætti. Til þess skortir langtímavöktun og rannsóknir, bæði á vistfræðilegum ferlum hér á landi og á vetrarstöðvum fuglanna og betri tengingu rannsókna við aðra þætti sem hafa áhrif t.d. á búsvæði þeirra. Hér má t.d. nefna gróðurfarsbreytingar og breytta og aukna landnotkun, s.s. í landbúnaði og skógrækt, sem oft má rekja til breytinga á veðurfari.

8.3.2.2 Spendýr

Nokkrar nýlegar rannsóknir fjalla um áhrif loftslagsbreytinga á íslensk spendýr. Í flestum tilvikum eru áhrifin óbein og tengjast fyrst og fremst breytingum á fæðuframboði. Eina upprunalega spendýrið hér á landi er heimskautarefurinn (mynd 8.11). Refurinn er rándýr og hér á landi er hann tækifærissinni í fæðuvali. Stofnstærð refs fylgir því ekki sveiflum í stofnstærð tiltekinna bráðar eins og þekkt er víða annars staðar þar sem refir geta verið að miklu leyti háðir ákveðinni bráð, s.s. læmingjum. Nýlegar rannsóknir⁵⁶ á stofnstærð refsins hér á landi sýna hvernig viðkoma getur tekið breytingum vegna hæfni refsins til að skipta yfir í bráð hvers stofnstærð er óháð refsins og jafnvel úr fasa við sveiflur í stofnstærð hans. Refastofninn hér á landi minnkaði verulega á 20 ára tímabili vegna falls í

rjúpnastofninum og skorts á öðrum fæðutegundum, líklega vegna kulda og óhagstæðs veðurfars en einnig var á tímabili eitrad fyrir ref. Þótt rjúpnastofninn tæki ekki við sér óx refastofninn engu að síður upp í fyrri stærð, og langtum meira en það, með því að nýta aðrar tegundir, aðallega heiðagæs á hálendinu, fyl og vaðfugla. Þessir bráðarstofnar voru þá í örum vexti í kjölfar betri veðurskilyrða. Hin jákvæðu áhrif sem loftslagsbreytingar virðast hafa haft á refastofninn hér á landi eru í andstöðu við það sem hefur verið að gerast annars staðar á heimskautasvæðum en þar hefur tegundinni staðið ógn af afleiðingum loftslagsbreytinga, m.a. vegna aukinnar samkeppni við rauðrefi og stofnbreytinga hjá læmingjum (lægri toppar og minni sveiflur)⁵⁷. Þó að íslenskir refir hafi notið góðs af hlýnandi veðurfari undanfarin 30 ár virðast sum áhrif af völdum breytinga í veðurkerfum og sjávarstraumum⁵⁸ vera neikvæð, t.d. varðandi líkamsvöxt og stofnstærð refa⁵⁹. Jafnframt hefur verið sýnt fram á að staðbundnar sveiflur í hita, úrkomu og vindi hafa marktæk áhrif á nýliðun og afkomu yrðlinga⁶⁰. Breytileiki í veðrakerfum og hafstraumum hafa áhrif á sjávarlífverur og hefur verið sýnt fram á að fæðuval hjá minkum má tengja breytingum á visitölum tengdum hafstraumum í Norðvestur-Atlantshafi og Norður-Atlantshafssveiflunni^{61,62}. Minkar hafa lifað villtir á Íslandi allt frá því þeir sluppu fyrst úr minkabúum á fyrri helmingi síðustu aldar. Þeir eru útbreiddir um allt land og teljast til framandi ágengra tegunda en fæða þeirra er bæði af landrænum og hafsrænum uppruna. Samkvæmt veiðitölum fjölgaði minkum samfellt frá þeim tíma sem þeir tóku að sleppa og allt til ársins 2006 en fækkaði hratt eftir það. Þar sem refir á vesturhluta landsins lifa einkum á sjófugli, má



Mynd 8.12 Hagamús.
(Ljósmynd: Ester Rut Unnsteinsdóttir.)

gera ráð fyrir að fækkun í sjófuglastofnum muni einnig hafa áhrif á afkomu refa. Svo virðist sem nokkur fækkun hafi verið í refastofninum undanfarin ár⁶³ og því er mikilvægt að fylgjast með stofnbreytingum og finna skýringar á þeim.

Hagamúsinn (mynd 8.12) er eina nagdýrið sem lifir í náttúru landsins óháð manningum. Í rannsókn á takmarkandi þáttum á lífslíkum og stofnstærð hagamúsa kom fram að vetrarhiti hafði afgerandi áhrif á lífslíkur⁶⁴. Þannig réð vetrarhiti því hversu margar hagamús lifðu til vors og gátu tekið þátt í tímgun. Því fleiri mýs sem tímgastr í upphafi sumars, því stærri varð hauststofn hagamúsa. Íslenski hagamúsastofninn hefur því væntanlega notið góðs af hlýnandi veðurfarum í kjölfar loftslagsbreytinga undanfarna áratugi.

Hreindýr sem fyrst voru flutt til landsins eftir miðja 18. öld eru stærst villtra spendýra á Íslandi en þau er einungis að finna á austanverðu landinu. Ekki er vitað hvort eða hvaða áhrif hlýnandi veðurfar hefur á stofnbreytingar hreindýra hérlendis en stærð stofnsins hefur sveiflast nokkuð á undanförmum áratugum. Náði stofninn hámarki um miðjan áttunda áratug sl. aldar en lágmarki um 10 árum síðar. Nú er íslenski hreindýrastofninn í sögulegu hámarki, eða yfir 7000 dýr^{65,66}.

8.3.2.3 Smádýr

Loftslagsbreytingar geta haft mikil áhrif á afkomu smádýra eins og annarra dýra. Fjöl margar tegundir smádýra berast til landsins, ýmist eftir náttúrulegum leiðum með vindum eða tilviljanakennt með vörum sem fluttar eru inn víða að og eftir ýmsum leiðum.

Fæstar innfluttu tegundanna eiga hér lífsmöguleika en suðrænar tegundir drepast þegar kólnar í veðri á vetrum.

Undanfarin ár hafa mildari vetur gert mörgum tegundum kleift að lifa af yfir vetrartímam og setjast hér að⁶⁷. Fleira kemur til en mildari vetur. Hlýnandi loftslag undanfarna áratugi hefur haft mikil áhrif á gróður og grósku sem eykur möguleika smádýra til landnáms. Náttúrulegur gróður hefur tekið við sér, bæði vegna hlýnunar og minni beitar, og hefur það haft áhrif á ýmsar gamalgrónar tegundir smádýra sem hafa fært út kvíar, þeim hefur fjölgað og þær breiðst enn frekar út.

Skógrækt með útlendum trjátegundum hefur aukist verulega og einnig útbreiðsla annarra framandi tegunda eins og lúpínu^{68,69}. Með síauknum innflutningi varnings eykst fjöldi aðfluttra smádýra og möguleikar margra tegunda til landnáms aukast með hlýnandi loftslagi og aukinni gróðursæld sem m.a. byggist á innfluttum tegundum⁷⁰. Einna þyngst vegur aukin garðrækt í þéttbýli og sumarhúsabyggingum og því samfara aukinn og oft illa ígrundaður innflutningur á gróðurvörum, s.s. pottaplöntum og græðlingum. Upphaf landnáms ýmissa tegunda má því rekja til garðræktar í þéttbýli. Fyrst um sinn eru margar tegundanna bundnar gördum sem gætu reynst stökkpallar út í náttúruna. Reyndar eru margar tegundir háðar innfluttum garðplöntum og komast hvergi lengra.

Fjöl mörg dæmi mætti nefna um breytingar sem orðið hafa á smádýrafánunni og slíka þróun sem er í fullum gangi. Það einkennir landnema sem borist hafa



Mynd 8.13. Skógbursti, lirfa.
(Ljósmynd: Erling Ólafsson.)

með vindum að landnám þeirra getur hafist nánast hvar sem er, ekki síst á landinu sunnan- eða austanverðu. Barrvefari (*Zeiraphaera griseana*) fannst fyrst í Hallormsstaðaskógi og Fljótshlíð. Það er vel mögulegt að hann hafi upphaflega borist hingað með vindum þó að innflutningur með trjáplöntum komi einnig til greina. Barrvefari breiddist út óðfluga og er nú eitt algengasta fiðrildið þar sem barrtré eru ræktuð en hann lifir eingöngu á barnállum. Stráygla (*Apamea remissa*) nam land á Suðausturlandi og hefur dreifst hægt og sígandi vestur eftir Suðurlandi. Ýmsar tegundir skordýra eru hér reglubundnir flækingar með vindum en vetur hafa reynst þeim of harðir til að varanlegt landnám sé mögulegt. Þó eru grunsemdir um að sumar tegundir kunni að lifa af óvenjumilda vetur, til dæmis kálmödur (*Plutella xylostella*), skrautygla (*Phlogophora meticulosa*) og garðygla (*Agrotis ypsilon*).

Upphaf landnáms smádyra sem borist hafa til landsins fyrir tilstilli manna er oftast á höfuðborgarsvæðinu og í nágrennabygðum þess⁶⁷. Margar tegundanna hafa enn sem komið er ekki náð að dreifast frá manngerðu umhverfi. Dæmi um slíkar tegundir eru spánarsnigill (*Arion lusitanicus*), pardussnigill (*Limax maximus*), rauðhumla (*Bombus hypnorum*), garðaklaufhali (*Forficula auricularia*) og rífsþéla (*Nematus ribesii*)⁷¹. Sumar hafa fíkrað sig út í náttúruna, eins og asparglytta (*Phratora vitellinae*) sem skaðar lauf aspa og víðitegunda, jafnt ræktaðra sem villtra, og birkikemba (*Heringocrania unimaculella*) sem dreifist hratt út sem skaðvaldur í birkiskógum Suðurlands⁷². Dæmi eru um tegundir sem auka útbreiðslu sína hægt og bitandi og

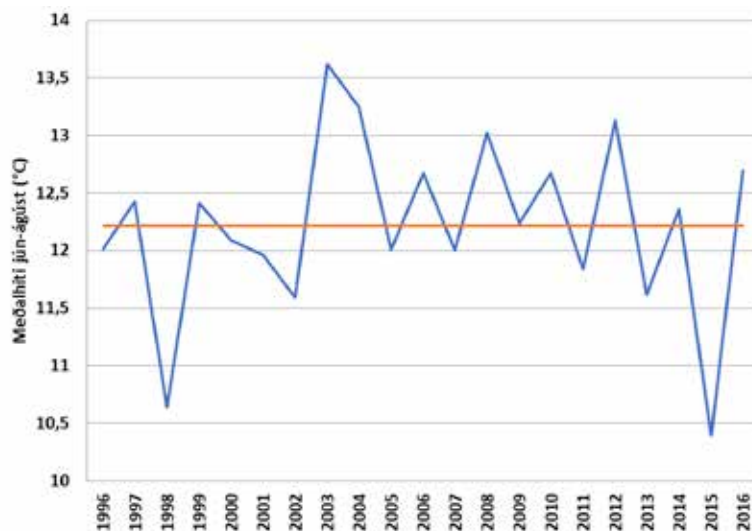
aðrar sem eru afar staðbundnar. Dumbygla (*Apamea crenata*) er tegund sem fannst fyrst á höfuðborgarsvæðinu en hefur náð að dreifast allt austur í Hornafjörð. Sniglanárakka⁷³ (*Phoshuga atrata*) fer fjölgandi með hverju ári staðbundið í Kollafirði⁶⁷.

Ýmsum gamalgrónum tegundum hefur farið fjölgandi. Sem dæmi má nefna tvær tegundir fiðrilda. Ertuygla (*Melanchra pisi*) var löngum frekar sjaldgæf sunnan til á landinu. Henni hefur fjölgað mikið á Suðurlandi og breiðst út norður eftir Vesturlandi. Staðbundið er hún orðin skaðvaldur á gróðri víða á útbreiðslusvæðinu⁷⁴. Mynd 8.13 sýnir skógbursta (*Orgyia antiqua*) sem var var afar fágætur í Fljótshlíð og undir Eyjafjöllum en hefur nú breiðst um sveitir Suðurlands og orðið skaðvaldur á gróðri í sumarhúsabygðum⁷⁵.

Í Evrópu hefur fjöldi skógarmítla (*Ixodes ricinus*) aukist og samhliða hlýnandi loftslagi hefur tegundin stækkað útbreiðslusvæði sitt til norðurs. Jafnframt eru skógarmítlar að finnast í meiri hæð yfir sjávarmáli^{76,77}.

Hér á landi hefur orðið vart við aukningu á skógarmítlum en hins vegar er óvíst hvort tegundin sé orðin landlæg þótt það þyki líklegt. Helsta leið skógarmítla til landsins er með farfuglum og fannst tölverður fjöldi á skógarþröstum (*Turdus iliacus*) við fuglamerkingar á Höfn í Hornafirði vorið 2017⁷⁸.

Með hlýnandi loftslagi og aukinni skógrækt má leiða líkur að því að skógarmítlum fari fjölgandi hér á landi. Skortur á hentugum blóðgjöfum getur þó staðið skógarmítlum fyrir þrífum. Fjölgun á kaninum í skóglendi gæti hugsanlega auðveldað mítlunum landnám.



Mynd 8.14 Meðalhiti júní – ágúst í Laxá í Aðaldal mældur með sirta við Laxamýri.

8.3.3 Vatnalíf

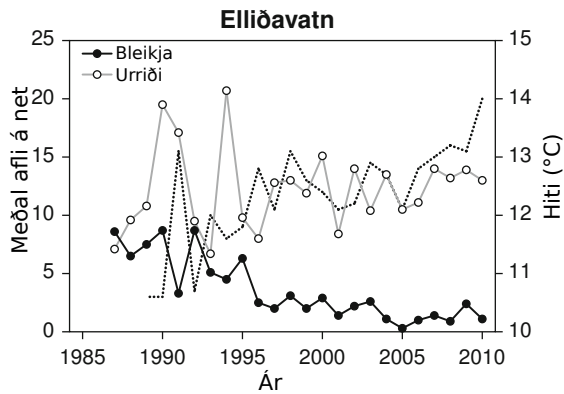
Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki í ferskvatni geta verið nokkuð flókin og mismunandi eftir gerð straum- og stöðuvatna og aðstæðum á hverjum stað, s.s. hæð yfir sjó, vatnsmagni, dýpi og skjóli fyrir veðri og vindum. Í ferskvatni á norðurslóð er almennt reiknað með að hlýnun leiði til aukningar í ákomu næringarefna og frumframleiðslu sem skilar sér áfram í hagstæðari lífsskilyrðum fyrir hryggleysingja, fiska og fugla upp að vissu marki^{12,79,80}. Yfir sumartímann eru jafnan sterk tengsl á milli lofthita og vatnshita, auk þess sem orka kemur frá inngeslun sólar þegar hennar nýtur við. Yfir vetrartímann er vatnshiti lágur og á þeim tíma sem ís er á eða við vötn er hitastig nærri 0°C. Bráðnun snævar á hálendinu getur haft mikil kælingaráhrif á ár og læki. Aukin snjóalög geta því haft áhrif á vatnshita og rennsli fram eftir vori. Enn fremur má gera ráð fyrir að við frekari hlýnun styttest sá tími sem ís hylur vötn og í sumum tilfellum hætti vötn alfarið að leggja á veturna. Afleiðingar þess fyrir vistkerfi stöðuvatna geta verið margþætt, m.a. fer frumframleiðsla eftir ljósmagni og eykst eftir því sem sól hækkar á lofti. Frumframleiðsla gæti því hafist fyrr í vötnum sem ekki eru hulin ís að vori og þar með breytt klaktíma hryggleysingja. Flugtími ýmissa skordýrategunda fer m.a. eftir hitastigi. Þannig geta fleiri kynslóðir rykmýs náð að klekjast ár hvert samfara hækkandi hita, líkt og sýnt hefur verið fram á í tilraunum í Hengladölum á Helligsheiði¹⁴. Hlýnun vatns í lækjum og ám mun í heildina leiða til aukinnar frumframleiðni, aukins vaxtarhraða dýra og minni

fjölbreytileika lífvera^{16,17,19,20}. Í djúpum vötnum má búast við öflugri hitaskilum og lagskiptingu í vatnsbolnum að sumri til. Slíkt stuðlar að einangrun vatnslaga og kann að leiða til skorts á næringarefnum í ljóstíllifunarláginu með tilheyrandi áhrif á frumframleiðslu^{12,81}. Þá má búast við að kulvísnum tegundum fjölgi en kulsækna tegundir lífvera láti undan síga og útbreiðsla þeirra dragist saman. Á meðal fiska sem virðast vera sérstaklega viðkvæmir fyrir hlýnuninni, einkum þó í grunnum vötnum, er bleikja (*Salvelinus alpinus*) og eru skýr dæmi um fækkun hennar hér á landi, sjá hér fyrir neðan^{79,89}.

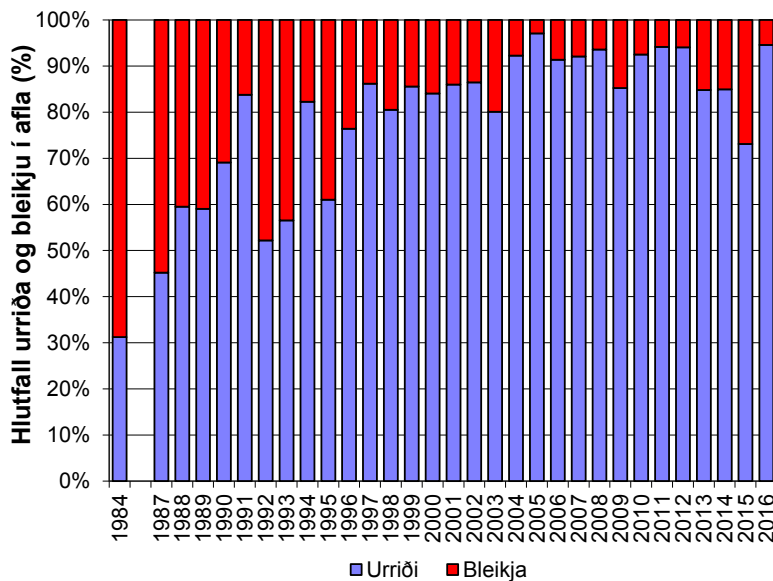
Hiti hefur bein áhrif á klak hrogn laxfiska og þurfa hrogn á bilinu 420–500 gráðudaga frá hrygningu til klaks^{82,83}. Vöxtur laxfiska fer ekki af stað að ráði fyrr en vatnshiti nær 5–7°C. Sterk tengsl eru á milli vatnshita og stærðar vörgamalla seiða laxfiska að hausti⁸². Þau tengsl eru þó sterkust við hita vormánaða, þ.a. hlýtt haust bættir ekki upp fyrir kalt vor, enda styttest birtutími á haustin. Þegar horft er á tengsl hita og einstakra tegunda laxfiska er mikilvægt að þau ferli sem áhrif hafa séu þekkt svo hægt sé að gera sér betur grein fyrir afleiðingum hitabreytinga.

Mynd 8.14 sýnir vatnshita Laxár í Aðaldal við Laxamýri að sumarlagi frá 1996–2016 og merkja má nokkurn breytileika í meðalhita á tímabilinu. Hitinn var hæstur 2003 en lægstur árið 2015.

Bleikja (*Salvelinus alpinus*) er útbreidd umhverfis allt norðurheimskautssvæðið og er ein af þeim lykiltegundum sem fylgst er með til að segja fyrir um hvað gerist við hlýnandi loftslag á norðurslóðum⁸³. Tegundin



Mynd 8.15 Netafli bleikju og urriða og meðalvatnshiti júní-september (punktalína) í Elliðavatni á árunum 1987–2010. Vatnið hefur hlýnað marktækt ($R^2=0.54$, $P<0.001$) og bleikju snarfækkað ($R^2=0.71$, $P<0.001$). (Heimild: sjá tilvísun 79.)



Mynd 8.16 Hlutfall urriða og bleikju í afla í rannsóknaveiðum í tvær netaraðir í Elliðavatni á tímabilinu 1987–2016, auk 1984. (Heimild: sjá tilvísun 89 uppfært fyrir þessa skýrslu til 2016. Friðþjófur Arnason, Hafrannsóknastofnun.)

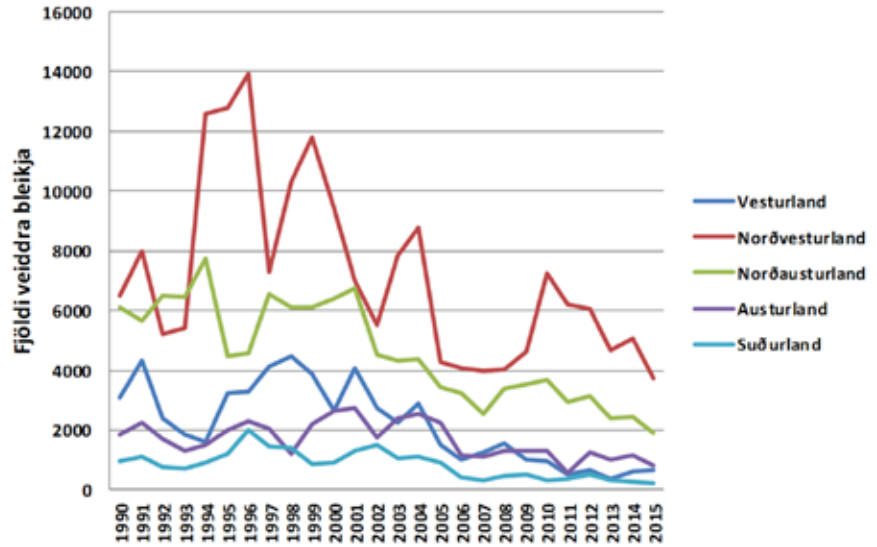
hefur mikla aðlögunarhæfni sem kemur fram í mismunandi svipfari og erfðafræðilegum einkennum bleikjustofna, jafnvel innan sama vatnakerfis, og eru bleikjugerðirnar fjórar í Þingvallavatni eitt skýrasta og best rannsakaða dæmið um þennan breytileika^{84,85}. Lífssaga bleikjunnar er breytileg og getur hiti haft umtalsverð áhrif þar á, bæði hjá sjógöngustofnum og staðbundnum stofnum. Tegundin þolir þó almennt ekki að hiti fari yfir 20°C⁸⁶ en við hækkandi hita geta einnig aðrir umhverfisþættir breyst, s.s. fæða, samkeppni við aðrar tegundir, sníkjudýr og sjúkdómar. Við Norður-Atlantshaf eru syðri mörk útbreiðslu sjóbleikju við 64°N⁸⁷. Í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá 2008 kom fram að vísbendingar væru um að bleikja ætti undir högg að sækja í stöðuvötnum landsins vegna hækkandi vatnshita, einkum í mjög grunnum vötnum^{88,89} s.s í Elliðavatni. Rannsóknir í Elliðavatni undanfarin 30 ár staðfesta þetta en þar hefur bleikjustofninn nánast hrunið meðan urriðastofninn hefur staðið í stað^{12,89,79}. Á sama tíma hafði vatnið

hlýnað umtalsvert, mest snemma vors og síðsumars, og farið vel yfir kjörhita bleikju til vaxtar og viðgangs (mynd 8.15), en urriði þolir hækkun á hita betur. Þessi þróun hefur haldið áfram í Elliðavatni þar sem hlutfall bleikju í netaveiði hefur haldist lágt (mynd 8.16). Vísbendingar um svipaðar breytingar má sjá hjá bleikju víðar á landinu þar sem hlutur tegundarinnar í veiði hefur farið dvinandi á síðari árum (mynd 8.17). Á sama tíma hefur sjóbirtingi fjölgað í ám, einkum á Norður- og Austurlandi⁹⁰.

Í skýrslu um rannsóknir á laxaseiðum frá 1979 til 2015 í Selá og Hofsá í Vopnafirði⁹¹ kemur fram að vaxtarhraði laxaseiða, aldur gönguseiða og heildarlífþyngd laxaseiða hefur breyst umtalsvert á síðari árum. Einn af þeim þáttum í umhverfinu sem hugsanlega geta skýrt þessar breytingar er vatnshiti. Mælingar á vatnshita yfir sama tímabil sýndu að meðalhiti sumarmánaðanna (júní–ágúst) fór hækkandi til ársins 2003 en hefur síðan lækkað til 2015.

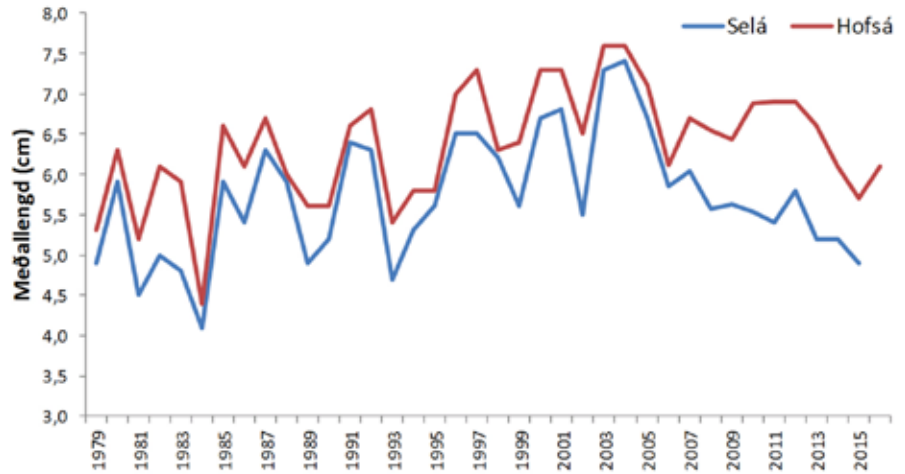
Mynd 8.18 sýnir að á tímabilinu fram til ársins 2003,

Skráð stangveiði á sjóbleikju á Íslandi skipt eftir landshlutum

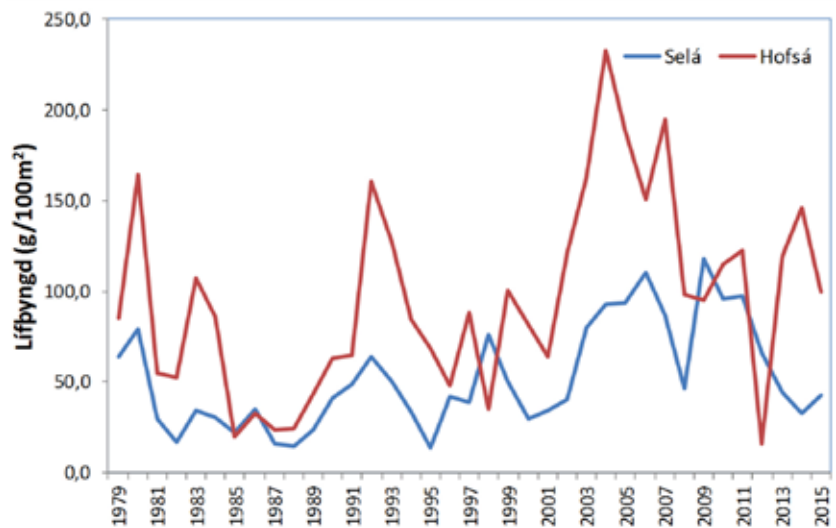


Mynd 8.17 Fjöldi stangveiddra bleikja í ám á Íslandi skipt eftir landshlutum. (Heimild: sjá tilvisun 90.)

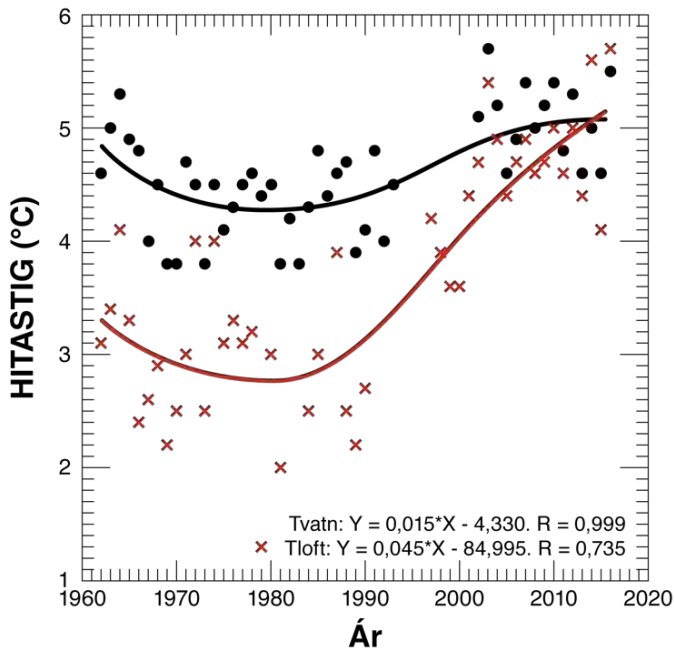
Meðallengd 1+ seiða



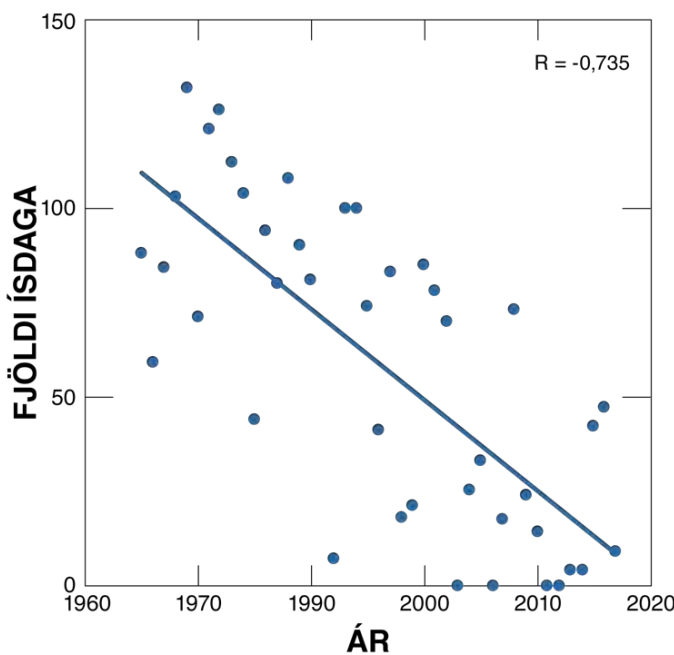
Mynd 8.18 Meðallengd árgamalla laxaseiða í seiðamælingum í Selá og Hofsá. (Heimild: sjá tilvisun 91.)



Mynd 8.19 Lifþyngd laxaseiða í Selá og Hofsá, mæld sem vísitala í seiðamælingum í Selá og Hofsá. (Heimild: sjá tilvisun 91.)



Mynd 8.20 Ársmeðalhiti Þingvallavatns (svartir punktar) og ársmeðallofthiti á vatnasviði Þingvallavatns (rauðir krossar) á tímabilinu 1962–2016. Einnig eru sýndir útjafnaðir ferlar og jöfnur línulegra aðhvarfsgreininga ásamt fylgnistuðlum. (Heimildir: sjá tilvísanir 93 og 94).

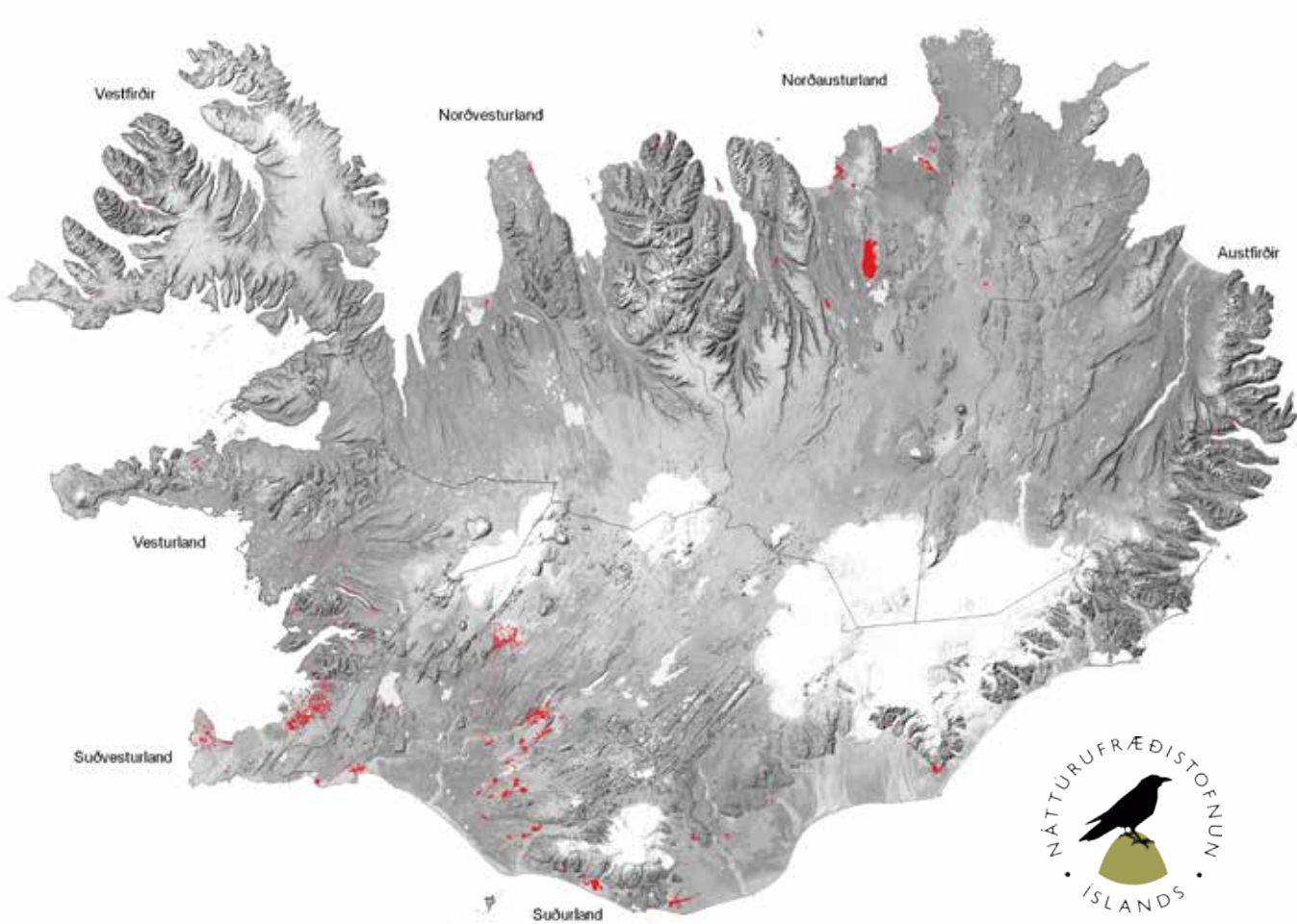


Mynd 8.21 Fjöldi daga með fastan ís á öllu Þingvallavatni veturna 1974–2017. Einnig er sýnd besta lína og fylgnistuðull. (Heimildir: sjá tilvísanir 93 og 94.)

Þegar hiti hækkaði í ánum, jókst meðallengd ársgamalla laxaseiða en tók að minnka eftir það þegar kólnaði að nýju⁹¹. Mynd 8.19 sýnir sambærilegar niðurstöður fyrir lífþyngd. Við það að vöxtur eykst lækkar gönguseiðaaldur og lífsferill stytst en þegar kólnar dregur úr vexti og gönguseiðaaldur hækkar. Varðandi þær fisktegundir sem ganga til sjávar er líklegt að ástand sjávar, s.s. hiti, fæðuframboð, afrán og samkeppni við aðrar tegundir, geti haft marktæk áhrif á lífsafkomu þeirra. Á síðustu árum hafa komið fram miklar og tíðar breytingar í

laxgengd á Íslandi, meiri en áður hafa sést á þeim rúmum 40 árum sem skráningar ná til⁹². Þessar breytingar koma m.a. fram í samsetningu stofna eftir sjávaraldri en laxi með eins árs sjávardvöl hefur fjölgað eftir 1980 en laxi með tveggja ára sjávardvöl hefur fækkað⁹².

Rannsóknir í Þingvallavatni og á vatnasviðinu, sem byggjast á langtímaskráningu á vatns- og lofthita á tímabilinu 1962–2016, sýna að Þingvallavatn hefur hlýnað umtalsvert á undanförmum 40–50 árum og að



Mynd 8.22 Kortið sýnir útbreiðslu lúpínu 2016 (rautt). Heildarflatarmál lúpínu er áætlað að lágmarki 314 km². (Heimild: sjá tilvísun 101.)

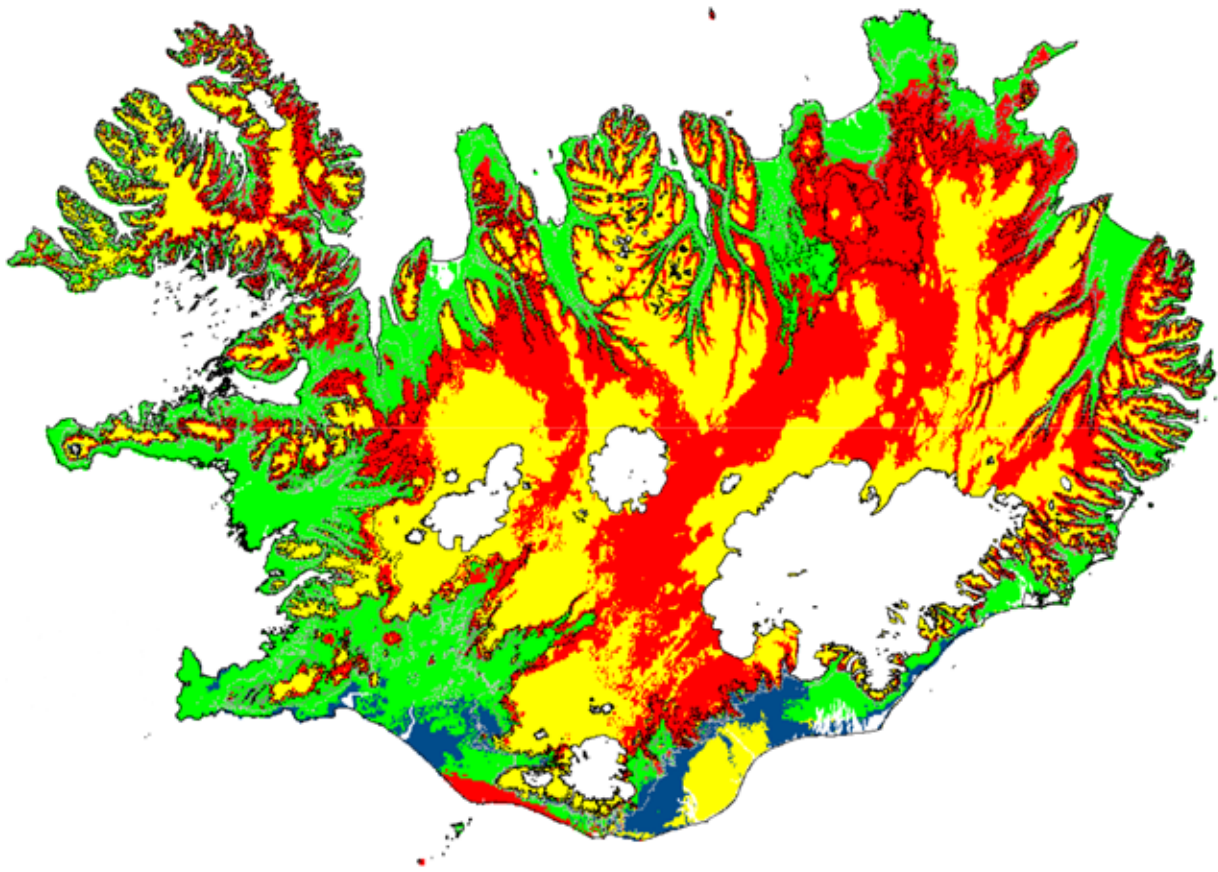
hlýnun vatnsins fylgir hækkandi lofthita á svæðinu (mynd 8.20). Árshitaferlarnir í vatninu og á vatnasviðinu falla jafnframt mjög vel að þróun ársmeðallofthita á Íslandi á umræddu tímabili. Ársmeðalhiti í vatninu hefur hækkað um nær 0.2°C á áratug, sem er á pari við hlýnun stórra og djúpra vatna á norðlægum slóðum og í Ölpunum. Vegna hlýnunarinnar leggur Þingvallavatn nú orðið bæði sjaldnar og seinna en áður, ís brotnar fyrr upp og íslausum árum hefur fjölgað mikið upp úr síðustu aldamótum (mynd 8.21).

Afleiðingar hlýnunar fyrir lífríki Þingvallavatns virðast þegar vera mælanlegar. Blaðgrænumælingar benda m.a. til að lífþyngd sviflægra þörunga í vatnsbolnum sé umtalsvert meiri nú en var fyrir um 40 árum. Þörungamagn í svifinu hin síðari ár hefur mælst tvö- til fjórfalt meira en var á árunum 1979 og 1981–1982. Munurinn er mestur á haustin en minnstur á sumrin. Þetta rímar vel við þróun lagskiptingar í vatnsbolnum og myndun hitaskila síðsumars á 15–25 m dýpi, sem virðast hafa bæði eflst í seinni tíð og vara lengur en fyrir 30–40 árum⁹³.

Um frekari afleiðingar hlýnunar á vistkerfi Þingvallavatns er erfitt að staðhæfa að svo komnu. Þetta stafar m.a. af því að sumar breytingarnar eru nýlegar og hafa varað í skamman tíma. Þetta á m.a. við um breytingar sem mælst hafa í ákomu næringarefna, en vísbendingar eru um aukinn styrk nitrats í írennslinu í norðanverðu vatninu á síðari árum^{93,94,95}. Árið 2016 áttu sér einnig stað fordæmalausar breytingar í frumframleiðslumunstri og tegundasamsetningu svifþörunga í vatnsbol vatnsins sem óvíst er hvernig muni vinda fram^{93,94,96}.

8.3.4 Loftslagsbreytingar og framandi ágengar tegundir

Eins og hefur verið nefnt hér að framan eru miklar líkur á því að hlýnandi loftslag muni auðvelda ýmsum tegundum dýra og plantna að nema hér land. En hlýnun mun einnig geta haft veruleg áhrif á útbreiðslu framandi tegunda sem þegar eru fyrir í landinu. Mikil óvissa er um hver áhrifin verða og með hvaða hraða breytingar geta orðið. Margar tegundir munu líklega



Mynd 8.23 Rauðu svæðin eru spá um ný möguleg útbreiðslusvæði Alaskalúpínu fram til 2050. (Heimild: sjá tilvísun 99.)

aldrei verða ágengar né valda skaða þar sem þær eru bundnar við tiltekin búsvæði, s.s. eins og glókokullur í barrskógum. Meiri óvissa er hins vegar um ýmsar plöntur eða trjátegundir, skordýr og önnur dýr. Til eru fjölmörg dæmi um tegundir sem geta orðið ágengar, s.s. eins og minkurinn hér á landi, og valdið ómældum skaða, bæði á lífríki, eignum og ýmiskonar ræktun í landbúnaði^{97,98}. Niðurstöður rannsókna benda til að loftslagsbreytingar geti haft veruleg áhrif á útbreiðslu aðfluttra plantna á Íslandi⁹⁹.

Tegundir sem flokkaðar hafa verið sem ágengar munu líklega hafa sterka tilhneigingu til að leggja undir sig ný svæði við hlýnun loftslags. Spár sýna að svæði með hentugu loftslagi fyrir alaskalúpínu muni stækka mjög mikið til 2050 sem getur stuðlað að landnámi tegundarinnar á stórum svæðum miðhálandisins⁹⁹, sjá myndir 8.22 og 8.23. Á sama hátt er því spáð að svæði með hentug loftslagsskilyrði fyrir skógarkerfil muni vaxa verulega, þótt í minna mæli verði. Það mun leiða til þess, að hann leggur undir sig ný svæði, sem hann nær ekki til við núverandi aðstæður⁹⁹. Á það skal bent að þetta á líka við lífverur sem valda sjúkdómum, s.s.

sníkjudýr og örverur. Nýleg yfirlitsgrein sýndi hvernig tíðni landnáms nýrra sníkjudýra á trjám og runnum hefur sveiflast með breytingum á ársmeðalhita síðustu 100 árin hér á landi¹⁰⁰.

Ágengar tegundir eru ekki síður vandamál í ferskvatni og í sjó. Um margar ágengar framandi tegundir í ferskvatni og sjó gildir það sama og á landi að þær hafa víða reynst illviðráðanlegar í vistkerfum erlendis^{98,102} þó enn hafi ekki orðið stórslys hér á landi. Nú þegar er vitað um nokkrar tegundir, s.s. nýja tegund flatfisks, flundru, sem hefur gert sig heimakomna í árósasvæðum hérlendis og veiddist fyrst í Ölfusárósi 1999¹⁰³. Upp úr 1990 urðu veiðimenn og bændur vitni að mikilli og skjótri útbreiðslu kísilþörungsins vatnaflóka (*Didymosphenia geminata*) í ám í Borgarfirði og skömmu síðar fannst tegundin einnig í miklum magni í ám á Suðvesturlandi¹⁰⁴. Ljóst þótti að tegund þessi, sem ekki hafði áður fundist með vissu hér á landi, breiddist hratt út í einstökum ám og um landið allt. Þörungurinn sjálfur situr á stilkum sem mynda þetta hnoðra á botni áa. Snöggar breytingar á útbreiðslu þessarar tegundar eru þekktar í Kanada, á Nýja Sjálandi og í nyrstu

fylkjum Bandaríkjana¹⁰⁴. Vatnaplantan kransarfi (*Egeria densa*) sem er algeng í fiskabúrum, hefur fundist villt í allstórra volgri tjörn í Opnunum í Ölfusi og myndað breiður á stóru svæði í tjörninni¹⁰⁵. Plantan er upprunalega frá Suður-Ameríku og gæti orðið ágeng við vissar aðstæður¹⁰⁶ og ekki ólíklegt að hún geti t.d. þrífist í vötnum eins og Elliðavatni og Vífilsstaðavatni og víðar. Jafnframt er vitað um ræktun á karpafiskinum, *Cyprinus carpio*, í tilbúnum tjörnum hér á landi¹⁰⁷ en tegundin þolir vel vetrarkulda og er talin ágeng víða um heim og líklega aðeins spurning hvenær fiskar sleppa í náttúruleg vatnakerfi.

Aukin skaðsemi af völdum framandi ágengra tegunda

getur aukist með hlýnandi loftslagi. Það er því afar mikilvægt að fyllstu varúðar sé gætt við innflutning, notkun og dreifingu á framandi lífverum. Þetta á við hvort sem um er að ræða hættu á að skaða náttúrulegt lífríki landsins eða t.d. ýmsa ræktun. Það má heldur ekki horfa framhjá því að mótvægisáðgerðir vegna loftslagsbreytinga verða að vera í samræmi við verndun líffræðilegrar fjölbreytni.

Aðeins hefur verið dregið hér á nokkrar helstu breytingar sem orðið hafa á lífríki landsins á síðustu árum og áratugum með áherslu á að bæta við það yfirlit sem birtist í skýrslu fyrri vísindanefndar frá árinu 2008.

Tilvísanir

- 1 CAVM Team. 2003. Circumpolar Arctic Vegetation Map, scale 1:7,500,000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska. Sjá einnig Walker, D. A., M. K. Raynolds, F. J. A. Daniels, E. Einarsson, A. Elvebakk, W. A. Gould, A. E. Katenin, S. S. Kholod, C. J. Markon, E. S. Melnikov, N. G. Moskalenko, S. S. Talbot, B. A. Yurtsev & CAVM Team. 2005. The Circumpolar Arctic Vegetation Map. *Journal of Vegetation Science* 16. 267-282.
- 2 Sjá nánar grein 4.2.
- 3 Snorri Baldursson, 2014. Lífríki Íslands – vistkerfi lands og sjávar, Bókautgáfan Opna og Forlagið.
- 4 Raynolds, M., Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson & Sigurður Magnússon 2015. Warming, Sheep and Volcanoes: Land Cover Changes in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends. *Remote Sensing* 7(8). 9492-9506.
- 5 Henry, G. H. R. & Molau, U. 1997. Tundra plants and climate change: the International Tundra Experiment (ITEX). *Global Change Biology*, 3. 1-9.
- 6 Jónsdóttir, I. S., Magnússon, B., Gudmundsson, J., Elmarsdóttir, Á. & Hjartarson, H., 2005. Variable sensitivity of plant communities in Iceland to experimental warming. *Global Change Biology*, 11. 553-563.
- 7 Jónsdóttir, I. S., 2015. Hlynandi loftslag: Háskóli Íslands. www.hi.is/hlynandi_loftslag
- 8 Elmendorf, S. C., Henry, G. H., Hollister, R. D., Bjork, R. G., Bjorkman, A. D., Callaghan, T. V., Collier, L. S., Cooper, E.J., Cornelissen, J. H., Day, T. A., Fosaa, A. M., Gould, W. A., Gretarsdottir, J., Harte, J., Hermanutz, L., Hik, D. S., Hofgaard, A., Jarrad, F., Jonsdottir, I. S., Keuper, F., Klanderud, K., Klein, J. A., Koh, S., Kudo, G., Lang, S. I., Loewen, V., May, J. L., Mercado, J., Michelsen, A., Molau, U., Myers-Smith, I. H., Oberbauer, S. F., Pieper, S., Post, E., Rixen, C., Robinson, C. H., Schmidt, N. M., Shaver, G. R., Stenstrom, A., Tolvanen, A., Totland, O., Troxler, T., Wahren, C. H., Webber, P. J., Welker, J. M. & Wookey, P. A., 2012. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecological Letters*, 15. 164-175.
- 9 Elmendorf, S. C., ofl. 2012. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming. *Nature Climate Change*, 2. 453-457.
- 10 Elmendorf, S. C., Henry, G. H. R., Hollister, R. D., Fosaa, A. M., Gould, W. A., Hermanutz, L., Hofgaard, A., Jónsdóttir, I. I., Jorgenson, J. C., Lévesque, E., Magnusson, B., Molau, U., Myers-Smith, I. H., Oberbauer, S. F., Rixen, C., Tweedie, C. E. & Walker, M., 2014. Experiment, monitoring, and gradient methods used to infer climate change effects on plant communities yield consistent patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- 11 Heimasiða þar sem verkefninu er lýst er aðgengileg á: www.refresh.ucl.ac.uk/eurolimpacs, sjá einnig www.ni.is/greinar/19-oktober-2016-gisli-mar-gislason-ahrif-loftslagshlynunar-a-vistkerfi-straumvatna.
- 12 Jeppesen, E., Moss, B., Bennion, H., Carvalho, L., DeMeester, L., Feuchtmayr, H., Friberg, N., Gessner, M.O., Hefting, M., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Hilmar J. Malmquist, May, L., Meerhoff, M., Jón S. Ólafsson, Soons, M.B. & Verhoeven, J.T.A. 2010. Chapter 6. Interaction of Climate Change and Eutrophication. pp. 119-151. Í *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems* (ritstj. M. Kernan, R. W. Battarbee & B. Moss), Wiley-Blackwell, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444327397.ch6.
- 13 Gudmundsdóttir, R., Ólafsson, J.S., Pálsson, S., Gislason, G.M. & Moss, B. 2011. How will increased temperature and nutrient enrichment affect primary producers in sub-Arctic streams? *Freshwater Biology*, 56. 2045-2058.
- 14 Hannesdóttir, E.R. Gislason, G.M. & Ólafsson J.S. 2012. Life cycles of *Eukiefferiella claripennis* (Lundbeck 1898) and *Eukiefferiella minor* (Edwards 1929) (Diptera: Chironomidae) in spring-fed streams of different temperatures with reference to climate change. *Proceedings of the 18th International Symposium on Chironomidae. Fauna norvegica* 31. 35-46.
- 15 Woodward, Guy, Christensen, John B., Ólafsson, Jon S., Gislason, Gisli M., Hannesdóttir, Elisabet R. & Friberg, Nikolai. 2010. Sentinel systems on the razor's edge: effects of warming on Arctic stream ecosystems. *Global Change Biology* 16. 1979-1991.
- 16 Elisabet Ragna Hannesdóttir, Gisli Már Gislason, Jón S. Ólafsson, Ólafur Patrick Ólafsson & Eoin J. O'Gorman 2013. Increased stream productivity with warming supports higher trophic levels. *Advances in Ecological Research* 48. 285-342.
- 17 Eoin J. O'Gorman, Ólafur P. Ólafsson, Benoit O. L. Demars, Nikolai Friberg, Guðni Guðbergsson, Elisabet R. Hannesdóttir, Michelle C. Jackson, Liselotte S. Johansson, Órla B. McLaughlin, Jón S. Ólafsson, Guy Woodward & Gisli M. Gislason 2016. Temperature effects on fish production across a natural thermal gradient. *Global Change Biology* 22. 3206-3220. doi: 10.1111/gbc.13233.
- 18 Friberg, N. Christensen, J.B., Ólafsson, J.S., Gislason G.M., Larsen, S. & Lauridsen, T.L. 2009. Relationships between structure and function in streams contrasting in temperature. *Freshwater Biology* 54. 2051-2068.
- 19 Demars, B. O. L., Russell Manson, J., Ólafsson, J. S., Gislason, G. M., Gudmundsdóttir, R., Woodward, G. U. Y., Reiss, J., Pichler, D. E., Rasmussen, J. J. & Friberg, N., 2011. Temperature and the metabolic balance of streams. *Freshwater Biology*, 56. 1106-1121.
- 20 Gudmundsdóttir, R., Gislason, G. M., Pálsson, S., Ólafsson, J. S., Schomacker, A., Friberg, N., Woodward, G., Hannesdóttir, E. R. & Moss, B., 2011. Effects of temperature regime on primary producers in Icelandic geothermal streams. *Aquatic Botany*, 95. 278-286.
- 21 Welter, J. R., Benstead, J. P., Cross, W. F., Hood, J. M., Hury, A. D., Johnson, P. W. & Williamson, T. J., 2015. Does N₂ fixation amplify the temperature dependence of ecosystem metabolism? *Ecology*, 96. 603-610.
- 22 Snorrason, S.S., Malmquist, J.J., Ingólfssdóttir, H.B., Ingimundardóttir, P. & Ólafsson, J.S. 2011. Effects of geothermal effluents on macrobenthic communities in a pristine sub-arctic lake. *Inland Waters* 1. 146-157 (DOI: 10.5268/IW-1.3.363).
- 23 Bjarni D. Sigurdsson, Leblans, N. I. W., Dauwe, S., Elín Guðmundsdóttir, Gundersen, P., Gunnhildur E. Gunnarsdóttir o.fl. 2016. Geothermal ecosystems as natural climate change experiments: the ForHot research site in Iceland as a case study. *Icelandic Agricultural Sciences*, 29. 53-71.

- 24 O’Gorman, E., Benstead, J. P., Cross, W. F., Friberg, N., Hood, J. M., Johnson, P. W., Sigurdsson, B. D. & Woodward, G., 2014. Climate change and geothermal ecosystems: natural laboratories, sentinel systems, and future refugia. *Global Change Biology*, 20. 3291–3299.
- 25 De Boeck, H. J., Vicca, S., Roy, J., Nijs, I., Milcu, A., Kreyling, J., Jentsch, A., Chabbi, A., Campioli, M., Callaghan, T., Beierkuhnlein, C. & Beier, C., 2015. Global change experiments: challenges and opportunities. *Bioscience*, 65. 922-931.
- 26 Guðmundsdóttir, E., Óskarsson, Ú. & Elmarsdóttir, Á. 2014. Áhrif af hlýnun jarðvegs á gróðurfar í skóglendi og graslendi á Reykjum, Ölfusi. *Rit Mógilsár*, 31. 73-80.
- 27 Poepflau, Christopher, Kätterer, Thomas, Leblans, Niki I. W., & Sigurdsson, Bjarni D. 2017. Sensitivity of soil carbon fractions and their specific stabilisation mechanisms to extreme soil warming in a subarctic grassland. *Global Change Biology*, [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13491/epdf](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13491).
- 28 Maljanen, M., Yli-Moijala, H., Biasi, C., Leblans, N. I. W., De Boeck, H. J., Bjarnadóttir, B. & Sigurdsson, B. D., 2016. The emissions of N₂O and CH₄ from natural soil temperature gradients in a volcanic area in southwest Iceland. *Soil Biology and Biochemistry* 109. 70-80. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.01.021.
- 29 Sjá V2008, tilvísun 3 í kafla 3.
- 30 Cook, A. C., Tissue, D. T., Roberts, S. W. & Oechel, W. C., 1998. Effects of long-term elevated [CO₂] from natural CO₂ springs on *Nardus stricta*: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. *Plant, Cell and Environment*, 21. 417-425.
- 31 Bjarni D. Sigurdsson, Halldor Thorgeirsson & Linder, S. 2001. Growth and dry-matter partitioning of young *Populus trichocarpa* in response to CO₂ concentration and mineral nutrient availability. *Tree Physiology* 21. 941-950.
- 32 Robertson, A. 1989. Tré og vindur. *Ársrit Skógræktarfélags Íslands*, 1989, 33-44.
- 33 Hér er byggt á niðurstöðum rannsóknarverkefnisins Land Cover Change in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends. Í fjarkönnun er meðalgrænkustuðull NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) mikið notaður mælikvarði á gróðurfar, sjá nánar Martha Reynolds, Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson og Sigurður H. Magnússon 2015. Land cover changes in Iceland evident in satellite NDVI trends. *Remote Sens.* 2015, 7, 9492-9506.
- 34 Sigurður H. Magnússon, Borgþór Magnússon, Erling Ólafsson, Guðmundur Guðjónsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Hörður Kristinnson, Kristbjörn Egilsson, Kristinn H. Skarphéðinsson, Starri Heiðmarsson og Jón Gunnar Ottósson. 2009. Vistgerðir á miðhálandi Íslands. Flokkun, lýsing og verndargildi. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands. Sjá einnig Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir, (ritstj) 2016. Vistgerðir á Íslandi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. 299s.
- 35 Sjá grein 4.4.1 í V2008 (tilvísun 3 í kafla 3).
- 36 Borgþór Magnússon, Björn H. Barkarson, Bjarni E. Guðleifsson, Bjarni P. Maronsson, Starri Heiðmarsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Sigurður H. Magnússon og Sigprúður Jónsdóttir. 2006. Vöktun á ástandi og líffræðilegri fjölbreytni úthaga 2005. *Rit Fræðafþings landbúnaðarins* 2006. 221-232.
- 37 Borgþór Magnússon, Bændablaðið 28. apríl 2016 bls. 14 (www.bbl.is/files/pdf/bbl-8.-tbl.-2016-web.pdf) og www.ni.is/greinar/30-mars-2016-borgthor-magnusson-voktun-a-grodri-og-astandi-beitilands.
- 38 Borgþór Magnússon og Járngerður Grétarsdóttir, Hrafnafing N.Í., 30. mars 2016
- 39 www.ni.is/frettir/2016/08/hlynandi-loftslag-eykur-tegundafjolda-plantna-a-vatnajokli.
- 40 Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn.
- 41 Bjarni D. Sigurdsson og Borgþór Magnússon. 2005. Skógarsnípa: nýr íslenskur varpflugur finnst í furuskógi í Skorradal. *Skógræktarritið* 2005 (1). 14-17.
- 42 Daníel Bergmann. 2008. Landnám glókolls. *Skógræktarritið*, 2008(2).
- 43 Einar Ó. Þorleifsson og Jóhann Óli Hilmarsson. 2002. Íslenskir skógarfluglar. *Skógræktarritið* 2002(1), 67-76.
- 44 Jón Einar Jónsson, Smári J. Lúðvíksson & Michael D. Kaller. 2017, The early birds and the rest: do first nesters represent the entire colony? *Polar Biol* 2017 40. 413–421 DOI 10.1007/s00300-016-1969-z.
- 45 Nicola Saino, Roberto Ambrosini, Diego Rubolini, Jost von Hardenberg, Antonello Provenzale, Kathrin Hüppop, Ommo Hüppop, Aleksii Lehtikoinen, Esa Lehtikoinen, Kalle Rainio, Maria Romano & Leonid Sokolov. 2010. Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds, *Proc. R. Soc. B* 2011 278 801-809.
- 46 Gunnarsson, T.G. & Tomasson, G. 2011. Flexible spring arrival of migratory birds at northern latitudes under rapid temperature changes. *Bird Study* 58. 1-12.
- 47 Sjá stutta lýsingu á Norður-Atlantshafssveiflunni í hliðargrein 4C Hafhringrás í Norður-Atlantshafi og loftslagsbreytingar.
- 48 Gill, J.A., Alves, J.A., Sutherland, W.J., Appleton, G.F., Potts, P.M. & Gunnarsson, T.G. 2014. Why is timing of bird migration advancing when individuals are not? *Proceedings of the Royal Society of London B*. 281, 20132161.
- 49 Tómas Grétar Gunnarsson, Lilja Jóhannesdóttir, José A. Alves, Böðvar Þórisson & Jennifer A. Gill. 2017. Effects of spring temperature and volcanic eruptions on wader productivity. *IBIS*. 159(2) 467–471.
- 50 Jón Einar Jónsson, Þórður Örn Kristjánsson, Árni Ásgeirsson & Tómas G. Gunnarsson. 2015. Breytingar á fjölda æðarhreiðra á Íslandi. *Náttúrufræðingurinn*. Náttúrufræðingurinn 85. 141–152.
- 51 A Lehtikoinen, M Kilpi og M. Öst. 2006. Winter climate affects subsequent breeding success of common eiders, *Global Change Biology* 12(7) 1355-1365, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01162.x.
- 52 Jonsson, J.E., Gill, J.A., Gardarsson, A., Petersen, A. & Gunnarsson T.G. 2009. Weather effects on breeding parameters in a sub-arctic, capital breeding resident: long-term data from Iceland. *Climate Research* 38. 237-248.

- 53 Jonsson, J.E., Gardarsson, A., Gill, J.A., Petursdottir, U.K., Petersen, A. & Gunnarsson T.G. 2013. Relationships between long-term demography and weather in a sub-arctic population of common eider. PLOS One. DOI: 10.1371/journal.pone.0067093.
- 54 Gudjonsson, H., Jonsson, J.E., Stefansson, H.W., Snaethorsson, A.O. & Gunnarsson, T.G. 2015. Annual and large-scale variation in breeding output of Greylag geese (*Anser anser*) in Iceland. Bird Study. DOI:10.1080/00063657.2015.1034655.
- 55 Vigfusdottir, F., Gunnarsson, T.G. & Gill, J.A. 2013. Annual and between-colony variation in productivity of Arctic Terns in West Iceland. Bird Study 60. 289-297.
- 56 Pálsson S, Hersteinsson P, Unnsteinsdóttir ER & Nielsen ÓK. 2016. Population limitation in a non-cyclic arctic fox population in a changing climate. Oecologia. 180(4) 1147-1157. doi: 10.1007/s00442-015-3536-7.
- 57 R. Ims & E. Fuglei 2009. Trophic Interaction Cycles in Tundra Ecosystems and the Impact of Climate Change. Bioscience, 55(4) 311-322.
- 58 Hér er einkum átt við yfirborðshringstreymi í Norðvestur-Atlantshafi, sjá nánar umfjöllun í grein 27.1 auk umfjöllunar um Norður-Atlantshafssveiflunar (NAO) sem stuttlega er minnst á í hliðargrein 4C Hafhringrás í Norður-Atlantshafi og loftslagsbreytingar.
- 59 P. Hersteinsson, Y. Yom-Tov & Geffen E. 2009. Effect of Sub-Polar Gyre, North Atlantic Oscillation and ambient temperature on size and abundance in the Icelandic Arctic fox. Global Change Biology. 15. 1423-1433. doi: 10.1111/j.1365-2486.01765.x.
- 60 E. R. Unnsteinsdóttir, P. Hersteinsson, S. Pálsson & Angerbjörn A. 2016. The fall and rise of the Icelandic Arctic fox (*Vulpes lagopus*): a 50year demographic study on a noncyclic Arctic fox population. Oecologia, 181(4) 1129-1138.
- 61 R. Magnusdottir, M von Schmalensee, RA. Stefansson, DW. Macdonald & Hersteinsson P 2014. A foe in woe: American mink (*Neovison vison*) diet changes during a population decrease. Mammalian Biology, 79. 58–63.
- 62 Rannveig Magnúsdóttir 2013, American mink *Neovison vison* in Iceland: Diet by sex, habitat, season and years in the light of changing environment and population size, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Iceland.
- 63 E. Unnsteinsdóttir 2014. Íslenski refastofninn á niðurlæið. Fréttatilkynning frá Náttúrufræðistofnun Íslands, 22. október 2014. Vefslóð: www.ni.is/sites/ni.is/files/atoms/files/Stofnmat-a-refum_oktober-2014.pdf.
- 64 Unnsteinsdóttir, E. R. & Hersteinsson, P. 2009. Surviving north of the natural range: the importance of density independence in determining population size. Journal of Zoology, 277(3), 232-240.
- 65 S. Þórisson og R. Þórarinsdóttir 2014. Vetrartalning hrendýra 22. - .30. mars 2014. Skýrsla sótt á vef Náttúrustofu Austurlands: www.na.is/images/stories/utgefing/2013-2014/na-140144_vetrartalning_hreindyra.pdf.
- 66 S. Þórisson 1993. Hreindýr. Í P. Hersteinsson og G. Sigbjarnarson (ritstj.) Villt íslensk spendýr. Hið Íslenska Náttúrufræðifélag, Landvernd. Reykjavík 351 bls.
- 67 Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn.
- 68 Björn Traustason. 2012. Flatarmál skógræktar á Íslandi. Ársrit Skógræktar ríkisins, 2011, 8-10.
- 69 Náttúrufræðistofnun Íslands, 2016. Úbreiðsla alaskalúpínu á Íslandi. 2016. www.ni.is/frettir/2016/10/nytt-kort-af-utbreidslu-alaskalupinu-a-islandi.
- 70 Halldórsson, Guðmundur, Sigurdsson, Bjarni D., Hrafnkelsdóttir, Brynja, Oddsdóttir, Edda S., Eggertsson, Ólafur & Ólafsson, Erling 2013. New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review. Icelandic Agricultural Sciences, 26, 69-84.
- 71 Vefur Náttúrufræðistofnunar Íslands: www.ni.is/dyr/poddur.
- 72 Guðmundur Halldórsson. 2011. Ný meindýr á trjágróðri. Garðyrkjuritið, 91, 112-114.
- 73 Kreiling, A.-K., Matthías Alfreðsson & Erling Ólafsson 2015. Sniglanárakki (*Phosphuga atrata* (L.)) finnst á Íslandi (*Coleoptera*; *Silphidae*). Náttúrufræðingurinn 85. 24-27.
- 74 Hrafnkelsdóttir, Brynja, Oddsdóttir, Edda S., Sverrisson, Halldór & Halldórsson, Guðmundur. 2012. Varnir gegn ertuyglu. Ársrit Skógræktar ríkisins, 2011, 13-15.
- 75 Náttúrufræðistofnun Íslands, sjá nánar www.ni.is/biota/animalia/arthropoda/hexapoda/insecta/lepidoptera/erebidae/skogbursti-orgyia-antiqua
- 76 Gray JS, Dautel H, Estrada-Peña A, Kahl O & Lindgren E. 2009. Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe. Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases. 593232. doi:10.1155/2009/593232.
- 77 Medlock JM, Hansford KM, Bormane A, Derdakova M, Estrada-Peña A, George JC, Golovljova I, Jaenson TG, Jensen JK, Jensen PM, Kazimirova M, Oteo JA, Papa A, Pfister K, Plantard O, Randolph SE, Rizzoli A, Santos-Silva MM, Sprong H, Vial L, Hendrickx G, Zeller H & Van Bortel W, 2013. Driving forces for changes in geographical distribution of *Ixodes ricinus* ticks in Europe. Parasites & Vectors. 6. 1. doi.org/10.1186/1756-3305-6-1.
- 78 Náttúrufræðistofnun Íslands og Fuglaathugunarstöð Suðausturlands, óbirt gögn.
- 79 Jeppesen, E., T. Mehner, I.J. Winfield, K. Kangur, J. Sarvala, D. Gerdeaux, M. Rask, H.J. Malmquist, K. Holmgren, P. Volta, S. Romo, R. Eckmann, A. Sandström, S. Blanco, A. Kangur, H.R. Stabo, M. Tarvainen, A.-M. Ventelä, M. Søndergaard, T.L. Lauridsen & M. Meerhoff. 2012. Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. Hydrobiologia 694. 1–39.
- 80 Moss B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R.W., Jeppesen E., Mazzeo N., Havens K., Lacerot G., Liu Z., De Meester L. o.fl. 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. Inland Waters. 1. 101–105.
- 81 Dokulil, M.T. 2016. Climate impacts on ecohydrological processes in aquatic systems. Ecohydrology & Hydrobiology 16 2016 66–70. dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.08.001.

- 82 Jonsson, B & Jonsson, N. 2011. Ecology of Atlantic salmon and Brown trout. Habitat as a template for life histories. Springer, Heidelberg, 708 bls.
- 83 Barouday, E. & Elliott, J.M. 1994. The critical thermal limits for juvenile Arctic charr *Salvelinus alpinus*. Journal of Fish Biology 45. 1041-1053.
- 84 Skúlason, S., Snorrason, S.S. & Jónsson, B. 1999. Sympatric morphs, populations and speciation in freshwater fish with emphasis on arctic charr. Í Evolution of Biological Diversity (ritstj. A.E. Magurran & R.B. May), bls. 70Ð92. Oxford University Press, Oxford. Sjá einnig Snorrason, S.S. & Skúlason, S. 2004. Adaptive speciation in northern freshwater fish. Í Adaptive Speciation (ritstj. U. Dieckman, M. Doebeli, J.A.J. Metz & D. Tautz), bls 210–228. Cambridge University Press, Cambridge.
- 85 Klemetsen, A. 2010. The charr problem revisited: exceptional phenotypic plasticity promotes ecological speciation in postglacial lakes. Freshwater Review 3. 49–74.
- 86 Elliott, J.M. & Elliott J.A. 2010. Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. Journal of Fish Biology 77. 1793-1817.
- 87 Klemetsen, A., Amundsen, P.-A., Dempson, J.B., Jonsson, B., Jonsson, N., O'Connell & Mortensen, E. 2003. Atlantic salmon *Salmo salar* L., Brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. Ecology of Freshwater Fish. 12. 1-59.
- 88 Þórólfur Antonsson & Guðni Guðbergsson. 2006. Áhrif loftslagsbreytinga á fiskistofna í ferskvatni. Rit Fræðþings landbúnaðarins 2006. 95-101.
- 89 Malmquist, H.J., Th. Antonsson, H.R. Ingvarsson, F. Ingimarsson & F. Árnason 2009. Salmonid fish and warming of shallow lake Ellidavatn in SW-Iceland. Verh. Internat. Verein. Limnol. 30. 1127-1132.
- 90 Guðni Guðbergsson 2015. Lax- og silungsveiðin 2015. Veiðimálastofnun, VMST/1606. 38 bls.
- 91 veidimal.is/files/Skra_0074775.pdf (Þórólfur Antonsson o.fl. 2016).
- 92 veidimal.is/Files/Skra_0075486.pdf (Guðni Guðbergsson 2016).
- 93 Hilmar J. Malmquist, Finnur Ingimarsson, Haraldur Rafn Ingvason, Stefán Már Stefánsson & Þóra Hrafnadóttir 2018. Hlýnun Þingvallavatns og hitaferlar í vatninu. Náttúrufræðingurinn 88, 1–4.
- 94 Hilmar J. Malmquist, Finnur Ingimarsson, Haraldur Rafn Ingvason, Stefán Már Stefánsson & Þóra Hrafnadóttir 2012. Vöktun á lífríki og vatnsgæðum Þingvallavatns. Yfirlit yfir fimm fyrstu vöktunarárin 2007–2011 og samanburður við eldri gögn. Náttúrufræðistofa Kópavogs. Fjölrit nr. 3–2012. 67 bls.
- 95 Gunnar Steinn Jónsson 2016. Þingvallavatn - ákoma og afrennsli. Skýrsla tekin saman fyrir umhverfis- og auðlindaráðuneytið. Umhverfis- og auðlindaráðuneytið. ISBN 978-9935-9143-2-3.
- 96 Haraldur R. Ingvason, Finnur Ingimarsson, Stefán Már Stefánsson, Þóra Hrafnadóttir og Kristín Harðardóttir 2017. Vöktun á lífríki og vatnsgæðum Þingvallavatns. Gagnaskýrsla fyrir árið 2016 ásamt viðbótargögnum fyrir árið 2015. Verkþáttur nr. 2: Lífríki og efna- og eðlisþættir í vatnsbol. Náttúrufræðistofa Kópavogs. Fjölrit nr. 2-2017.
- 97 Dean R. Paini, Andy W. Sheppard, David C. Cook, Paul J. De Barro, Susan P. Worner & Matthew B. Thomas 2016. Global threat to agriculture from invasive species. PNAS 113(27) 7575–7579 www.pnas.org/content/113/27/7575.full.pdf.
- 98 Sjá umfjöllun á vefsvæðinu www.nobanis.org.
- 99 Pawel Wasowicz, Ewa Maria Przedpelska-Wasowicz & Hörður Kristinsson 2013. Alien vascular plants in Iceland: Diversity, spatial patterns, temporal trends, and the impact of climate change. Flora 208. 648–673.
- 100 Guðmundur Halldórsson, Bjarni D. Sigurdsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson & Erling Ólafsson 2013. New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review. Icelandic Agricultural Sciences 26. 69-84.
- 101 www.ni.is/frettir/2016/10/nytt-kort-af-utbreidslu-alaskalupinu-a-islandi.
- 102 www.caff.is/invasive-species.
- 103 Gunnar Jónsson, Jónbjörn Pálsson & Magnús Jóhannsson. 2001. Ný fiskitegund, flundra, *Platichthys flesus* (Linnaeus, 1758), veiðist á Íslandsmiðum. Náttúrufræðingurinn 70. 83-89; Guðmundur Ingi Guðbrandsson og Bjarni Jónsson, 2004. Landnám, útbreiðsla og búsvæðaval nýrrar tegundar við Íslandsstrendur, ósalúru *Platichthys flesus*. Úrdráttur í ráðstefnurni afmælisráðstefnu Líffræðifélags Íslands og Líffræðistofnunar HÍ, Reykjavík 19.-20. nóvember 2004.
- 104 Ingi Rúnar Jónsson, Gunnar Steinn Jónsson, Jón S. Ólafsson, Sigurður Már Einarsson og Þórólfur Antonsson 2010. The colonization of the invasive diatom *Didymosphenia geminata* in Icelandic rivers. Verh. Internat. Verein. Limnol. 30(9) 1340–1352.
- 105 www.floraislands.is/egeriden.html.
- 106 Global Invasive Species Database 2017 Species profile: *Egeria densa*. www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=289.
- 107 www.bondi.is/files/baendabladid/12.tbl.-20.juni_2013_small.pdf (sjá bls 30).