



22

Moldin og hlýnun jarðar



Mynd 22.1. Land í tötrum í Sandvatnshlíðum á Biskupstungnaafrétti. Þetta land var áður skógi vaxið fram eftir öldum. Gróðureyjan til hægri er til vitnis um horfna landkosti – maðurinn vinstra megin við barðið er til viðmiðunar. Jaðrar barðsins hafa verið græddir upp. Tapast hefur 1–2 m þykkt jarðvegslag af mörg hundruð km² svæði þannig að auðnin ein situr eftir.

Um er að ræða ótrúlega gjöreyðingu sem á sér fáar hliðstæður á jörðinni. Hér hafa glatast ókjör af kolefni sem má áætla að samsvari um 50 000 tonnum af C á km² (um 180 000 tonnum af CO₂ á hvern ferkílómetra). Ef tapið væri reiknað á hundruð ferkílómetra yrði það af geigvænlegri stærðargráðu (tugir milljóna tonna CO₂-ígílda).

Mold og CO₂

Ætla mætti af umræðu um gróðurhúsalofttegundir að meira væri af kolefni í andrúmsloftinu eða gróðri í samanburði við moldina. En svo er alls ekki, heldur þvert á móti. Moldin geymir meira kolefni en andrúmsloftið og gróður samanlagt.

22.1. Moldin er miðlæg í kolefnishringrásinni

Meðal mikilvægustu áskorana mannkynsins er að bæta ástand lands og draga úr styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Hrun og ástand vistkerfa og hlýnun andrúmsloftsins eru nátengd fyrirbrigði: stór hluti þeirra gróðurhúsalofttegunda sem losaður er út í andrúmsloftið á rætur að rekja til hnignunarvistkerfa og þá einkum moldar (mynd 22.1). Bruni jarðefnaeldsneytis vegur þó þyngra á heimsvísu og hann þarf að minnka. Leiðir til að minnka styrk CO₂ í andrúmsloftinu felast ekki síst í að binda kolefni (C) aftur í vistkerfum samhliða því að draga úr bruna jarðefnaeldsneytis. Moldin er miðlæg í kolefnishringrás jarðar og þar er hægt að binda á nýjan leik mikið kolefni.

Í þessum kafla er fjallað um kolefni (C) og koltvísýring (CO₂) og ferð kolefnis á milli vistkerfa og andrúmslofts. Kolefnið er á ýmsu formi í lífríkinu, í moldinni og einnig í andrúmsloftinu sem CO₂ og CH₄. Aðrar gróðurhúsalofttegundir en koltvísýringur koma við sögu hlýnunar andrúmsloftsins, svo sem tvínituroxíð (hláturgas – N₂O), metan (CH₄), óson (O₃) og brennisteinshexaflúoríð (SF₆) auk vatnsgufu (H₂O) (sjá Halldór Björnsson

Tafla 22.1. Skipting kolefnis. Hér er tekið tillit til mikils kolefnis í jarðvegi norðurhjarans og eldfjallajörð, sem yfirleitt nær mun dýpra en kolefni í öðrum jarðvegsgerðum (tölur frá IPCC 2013, talan fyrir úthafið felur í sér lífrænt set).

KOLEFNISHÍT	Gt C (Pg C)
Andrúmsloftið	830
Lífheimurinn (gróður)	450–650
Jarðvegur	1500–2400
Sífreri	1700
Úthafið	40 450
Jarðefnaeldsneytisforði	1000–1940

2008). Umfjöllun um hringrás kolefnis hefur einatt einskorðast við losun gróðurhúsalofttegunda vegna bruna jarðefnaeldsneytis og leiðir til að draga úr henni – sem er skiljanlegt. Einnig hafa rándýrar verkfræðilausnir, sem ganga út á að soga CO₂ úr andrúmsloftinu, hlotið mikla athygli. Þessar áherslur gera það þó að verkum að mikilvægi vistkerfa í þessu samhengi er iðulega vanmetið. Verulega skortir á almenna þekkingu á hlutverki vistkerfa í kolefnishringrásinni og það endurspeglast í umræðu um loftslag og umhverfismál.

22.2. Kolefni í jarðvegi

22.2.1. Moldin og aðrir hnattrænir geymar

Meginuppistaða lífrænu efnanna í hringrás lífsins eru kolefnisefna-sambönd. Heildarmagn kolefnis í hnattrænni (e. global) hringrás skiptist á nokkra megingeyma. Hafið er langsamlega stærsti geymirinn með um 40 000 Pg (petagrömm, milljarðar tónna eða gígtatonn Gt) en jarðvegurinn kemur þar á eftir með 1500–3500 Pg eftir því hver telur hverju sinni (tafla 22.1). Höfundur þessa rits hallast að efri tölunni því magn kolefnis í jarðvegi á heimskautasvæðum er yfirleitt vanmetið í heildartölum um kolefni í mold á jörðinni (Tarnocai o.fl. 2009, sjá einnig IPCC 2013).

Mun minna er af kolefni í andrúmsloftinu (830 Pg) og gróðri jarðar (450–650 Pg). Stærstu geymarnir eru þó í kalksteini (CaCO₃) sem fellur út í hafinu og lífrænu kolefni sem bundið er í jarðlögum (kol, olía, tjara, gas). Þar sem mikið losnar af Ca⁺⁺ við efnaveðrun í jarðvegi skilar það sér til sjávar og fellur út sem kalk (sem inniheldur C). Það á sérstaklega við hérlendis og er fjallað um það hér á eftir (sjá einnig Sigurð Reyni Gíslason 2012). Breytingar á kolefni í einum forða hafa alltaf í för með sér gagnstæða breytingu

Kolefni, CO₂ og flatarmál

C eða CO₂. Það er eðlilegt að loftslagsvísindin miði við koltvísýring (CO₂) því það efni umfram önnur veldur hlýnuninni. En í öðrum náttúruvísindum er algengt að nota frumefnaformið kolefni (C), enda getur C verið í afar mörgum myndum eða efnasamböndum í hringrás kolefnis og orku. Til þess að umbreyta 1 g af kolefni (C) yfir í g CO₂-ígildi er margfaldað með stuðlinum $44/12 = 3,667$.

CO₂-ígildi. Hugtakið CO₂-ígildi er mikið notað, m.a. vegna þess að fleiri lofttegundir en CO₂ valda gróðurhúsaáhrifum. Áhrif þeirra eru þá borin saman við gróðurhúsaáhrif CO₂, en þær hafa virkni á við tiltekið magn af CO₂. Þetta tiltekna magn af CO₂ er þá CO₂-ígildi þeirrar lofttegundar.

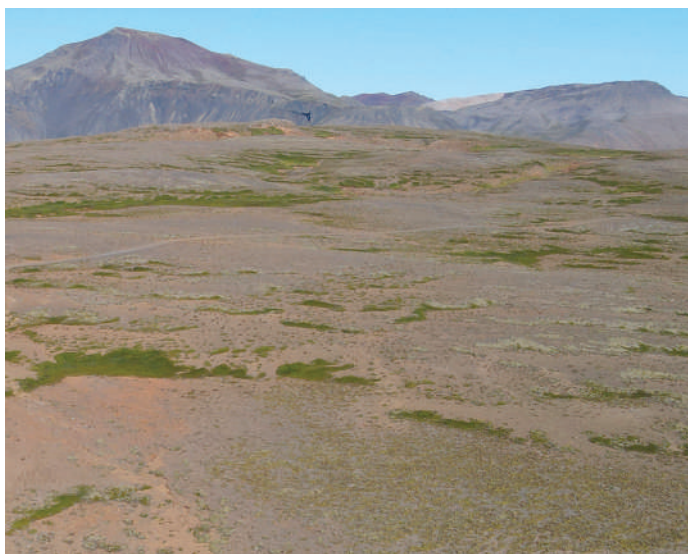
Einingar – magn. Margar einingar eru notaðar til að gefa til kynna magn kolefnis eða koltvísýrings, allt frá milligrömmum við útreikninga á flæði í tilraunareitum upp í Pg (Peta grömm = 10¹⁵ g, sama og milljarðar tonna) þegar fjallað er um hnöttinn í heild. Hér eru einingarnar kg/m², t/km² og t/ha mest notaðar. Einingin verður síðan milljón tonn þegar fjallað er um kolefni (C) eða koltvísýring (CO₂-ígildi) á landsvísu (einnig gefið upp sem 1000 kílótonn, þúsund kt).



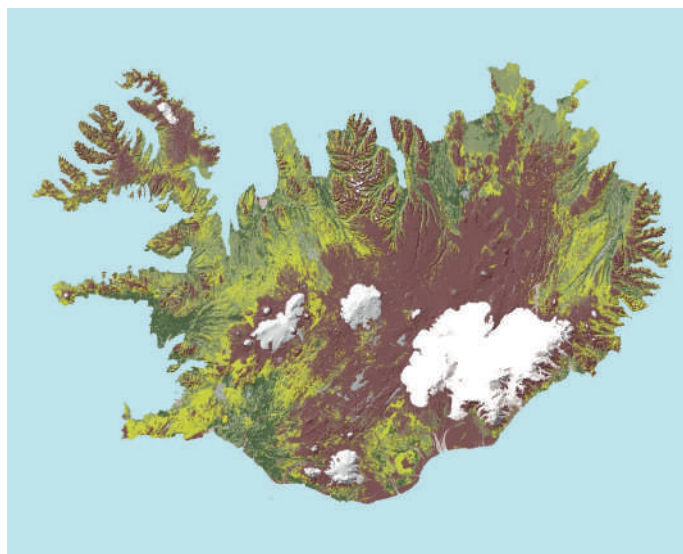
Snið – kg/m²



Landbúnaður – tonn/ha



Landslag – þúsund tonn/km²



Ísland – milljón tonn

Mynd 22.2. Mismunandi einingar fyrir kolefni (C) eða koltvísýring (CO₂) annars vegar og flatarmál lands hins vegar.

á öðrum, kolefni sem frumefni er hvorki að verða til né eyðast.

22.2.2. Hvað er mikið kolefni í hverri „moldareiningu“?

Mikilvægt er að þeir sem eru með hugann við kolefnisjöfnuð og kolefnisbindingu í landbúnaði, skógrækt eða landgræðslu geti reiknað út magn kolefnis í jarðvegi. Hér er stuttur kafli til að auðvelda þeim leikinn sem vilja fóta sig í slíkum útreikningum. Magn kolefnis í mold undir hverjum fermetra er talið í kílóum kolefnis (kg C/m²).

Eyðimerkurjörð hefur fá kg C/m² en í *mójjörð* getur kolefnismagnið hæglega numið yfir 200 kg C/m². Kolefnisforðinn er afar breytilegur innan jarðvegssniða. Til að fá út heildarmagnið þarf að leggja saman magn kolefnis í hverju jarðvegslagi eða dýptarbili fyrir sig, því mikill breytileiki getur verið innan hvers sniðs. Yfirleitt er mest af kolefni í yfirborðslögnum og stundum beinast útreikningar aðeins að þeim, t.d. efstu 30 cm moldarinnar. Í jarðvegi mýrlendis hér á landi er þessu ekki þannig farið: mikið er af kolefni niður allt moldarsniðið (*mójjörð*, *svartjörð*, *votjörð*), oft niður á eins til tveggja metra dýpi.

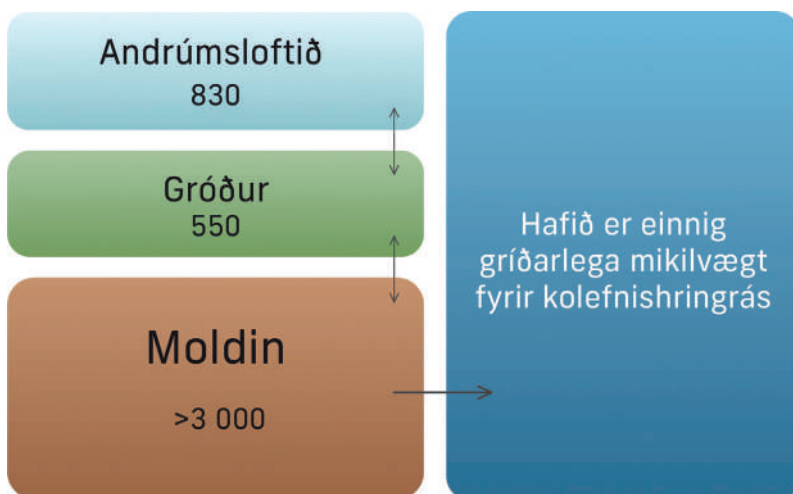
Niðurstöður mælinga á jarðvegskolefni eru yfirleitt gefnar upp sem % C. Til að reikna kolefnisforða á rúmmálseiningu er hlutfallsgildi kolefnis (% deilt með 100; gefur t C/t jarðvegs) margfaldað með rúmpýngd jarðvegsins (t jarðvegs/m³ jarðvegs) og niðurstaðan verður þá tonn kolefnis í hverjum rúmmetra; t C/m³ jarðvegs. Síðan þarf að laga þá tölu að þykktinni. Ef lagið er t.d. 10 cm þykkt, þ.e. 0,1 metri, er niðurstaðan t C/m³ jarðvegs x 0,1 m jarðvegs = t C/m² jarðvegs. Margfaldað er með 1000 til að breyta tonnum í kg. Dæmi: Ef jarðvegslagið er 20 cm þykkt, rúmpýngdin 0,8 t/m³ og hlutfall kolefnis 8% er heildarmagn kolefnis í kg/m² í þessu lagi eða dýptarbili:

$$\frac{8}{100} \times 0,8 \text{ t/m}^3 \times 0,2 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/t} = 12,8 \text{ kg/m}^2$$

Hafa ber í huga að hér er miðað við moldarefni og því þarf að draga frá þýngd og rúmmál steina sem eru stærri en 2 mm í þvermál. Sé mikið af steinum í jarðveginum verða mælingar á kolefnisforða því tafsamari. Finna þarf rúmmál steinanna (margar aðferðir) og reikna síðan þýngd og magn kolefnis í því rými sem eftir er, það er hið „virka“ rými sem inniheldur kolefnið. Þannig fæst heildarmagn kolefnis fyrir tiltekið jarðvegslag samkvæmt formúlunni hér að ofan. Steinar eru einkum viðfangsefni slíkra útreikninga á illa grónu landi og í skriðujarðvegi, en yfirleitt ekki í þurrlendisjarðvegi sem myndast við áfok (fínefni, lítið um steina) – eða í þykkum votlendisjarðvegi.

Reikna þarf kolefnismagnið fyrir hvert jarðvegslag fyrir sig og leggja saman öll lögin til að fá magn undir hverri flatareiningu. Jarðvegslögin hafa mismunandi kolefnishlutfall og rúmpýngd og því er mikilvægt að mæla báða þætti. Oft og tíðum er rúmpýngdin samt ekki þekkt, en með þekkingu á moldinni á hverju svæði fyrir sig, sem

C í lífrænni hringrás



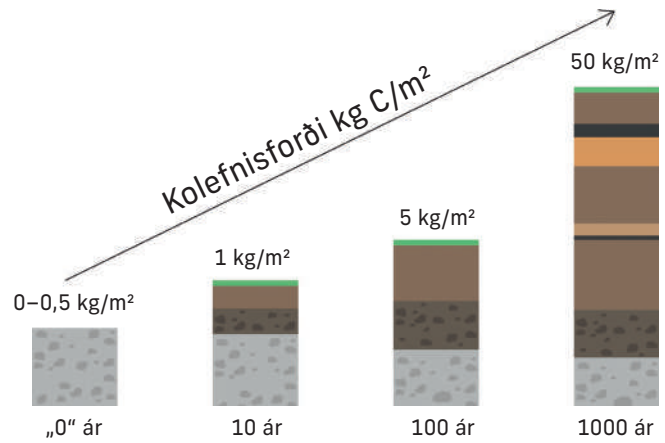
Mynd 22.3. Dreifing kolefnis í hringrás við andrúmsloft og vistkerfi. Moldin er miðlæg í hringrásinni. Hér er gert ráð fyrir >3000 Pg í jarðvegi, en líklegri tala er >3500 þegar allt kolefni í jarðvegi heimskautasvæðanna sem getur losnað er talið með (sjá töfluna hér að framan).

og tengslum rúmþyngdar og kolefnis, er iðulega hægt að áætla rúmþyngdina, enda þótt niðurstaðan verði ekki fullkomlega nákvæm (sjá 12. kafla um eðliseiginleika íslensks jarðvegs). Þá verður einnig að hafa í huga að breytileiki moldarinnar innan hvers svæðis er mikill og því verða mælingar og útreikningar aldrei annað en nálgun á kolefnisinnihald hvers svæðis.

22.2.3. Útreikningar á bindingu

Við útreikninga á bindingu eða losun kolefnis í jarðvegi bætist við tímaþáttur. Hver er bindingin í kg C/m² á ári? Eða losun sem CO₂ á ári? Unnt er að mæla upptöku og losun CO₂ með tækjabúnaði sem mælir breytingar á styrk CO₂ í lokuðu rými eða loftstreymi, en það er fremur dýrt og tímafrekt og slíkar mælingar þurfa að ná yfir langan tíma, helst nokkur ár því breytileikinn er mikill. Þær eru engu að síður nauðsynlegar til þess að fá fyllri skilning á kolefnisjöfnuði vistkerfa. Önnur leið er að fylgjast með ákveðnum svæðum og mæla kolefnisforða þeirra á nokkurra ára fresti. Það er m.a. aðferð sem notuð er á Íslandi í tengslum við Loftslagssamning Sameinuðu þjóðanna (Keller o.fl. 2020).

Þar sem ráðist er í landgræðslu er hægt að fylgjast með hversu hratt kolefni safnast fyrir í moldinni með því að mæla svæðin á 10 ára fresti, svo dæmi sé tekið. Einnig er unnt að rannsaka misgömul landgræðslusvæði þar sem aðstæður eru sambærilegar að öðru leyti (sjá t.d. ÓA o.fl. 2002). Við slíkar rannsóknir er mikilvægt að mæla alltaf rúmþyngd því hún fer lækkandi eftir því sem lífræn efni safnast fyrir í moldinni. Þá þarf að draga frá það rúmmál sem steinar taka í moldinni, bindingin tengist aðeins moldarefnunum (skilgreind sem korn <2 mm og kolefni er aðeins mælt í þeim hluta). Ókosturinn við þessa aðferð er að breytingar á kolefnisforða eru oft hægar og innan hvers svæðis getur verið mikill breytileiki – sem kallar á mikinn fjölda sýna.



Mynd 22.4. Kolefni safnast fyrir í mold, t.d. við landgræðslu. Í þessu dæmi er lítið kolefni í moldinni í upphafi, 0,5 kg/m², en að hundrað árum liðnum er magnið orðið 5 kg/m² og getur vel farið yfir 50 kg/m² í frjósömum vistkerfum eftir 1000 ár (en er þó iðulega lægra, t.d. 30 kg/m³, m.a. vegna nýtingar). Þessar tölur gefa einnig til kynna það tap sem verður þegar landhnignun og jarðvegsrof hafa orðið til þess að mold hverfur af yfirborðinu. Með tímanum lækkar rúmþyngd efsta lagsins, sem mikilvægt er að taka tillit til við útreikninga.

Binding í mold í náttúrulegum vistkerfum við bætta landnýtingu og landgræðslu er iðulega af stærðargráðunni 0,01–0,1 **kg C/m²** á ári eða 0,04–0,37 **kg CO₂/m²**. Það samsvarar 10–100 t C /km² eða 37–370 **t CO₂ á km²** á ári. Fyrir þá sem kjósa að nota hektara sem viðmið: 0,1–1 **t C/ha/ári** eða 0,37–3,7 **t CO₂ á ha** á ári (yfirlit í töflu 22.2 til einföldunar).

22.3. Kolefni í íslenskum jarðvegsflokkum

22.3.1. Núverandi forði kolefnis

Eldfjallajörð, meginjarðvegsflokkur Íslands, safnar mun meira kolefni en aðrir jarðvegsflokkar heimsins að *mójörð*

Tafla 22.2. Dæmigerð binding kolefnis í mold í náttúrulegum vistkerfum við landgræðslu og vistheimt. Bæði sem C og CO₂-ígildi á hvern fermetra, hektara og ferkílómetra ár hvert.

Eining kolefnis	Binding á m ² á ári	Binding á ha á ári	Binding á km ² á ári
C	0,01–0,1 kg/m ²	0,1–1 tonn/ha	10–100 tonn/km ²
CO ₂	0,04–0,37 kg/m ²	0,37–3,7 tonn/ha	37–370 tonn /km ²

Tafla 22.3. Dæmigerð gildi fyrir kolefnisforða í *eldfjallajörð* sem íslenskur jarðvegur telst til, bæði sem kolefni (C) og samsvarandi magn CO₂ á fermetra, hektara og ferkílómetra. Íslensku gildin í óraskaðri mold eru iðulega allnokkru hærri.

Eining kolefnis	Á fermetra	Á hektara	Á ferkílómetra
C	30 kg/m ²	300 tonn/ha	30 000 tonn/km ²
CO ₂	110 kg/m ²	1 100 tonn/ha	110 000 tonn/km ²

undanskilinni sé gróðurhula til staðar, en hana skortir á glerjörð (sjá 11. kafla um jarðvegsflokka). Oft er talað um að kolefnisforði *eldfjallajarðar* sé um 30 kg af C á fermetra að meðaltali, sem samsvarar 300 tonnum á hektara og 30 000 tonnum af C á ferkílómetra. Samsvarandi magn af CO₂ væri 110 kg CO₂ á fermetra, 1100 t CO₂/ha og 110 000 t CO₂/km² (yfirlit í töflu 22.3). Þetta eru há gildi – það er einfaldlega ansi mikið af kolefni í mold svæða sem einkennast af *eldfjallajörð*, uppsöfnunin er einn hinna sérstæðu eiginleika hennar.

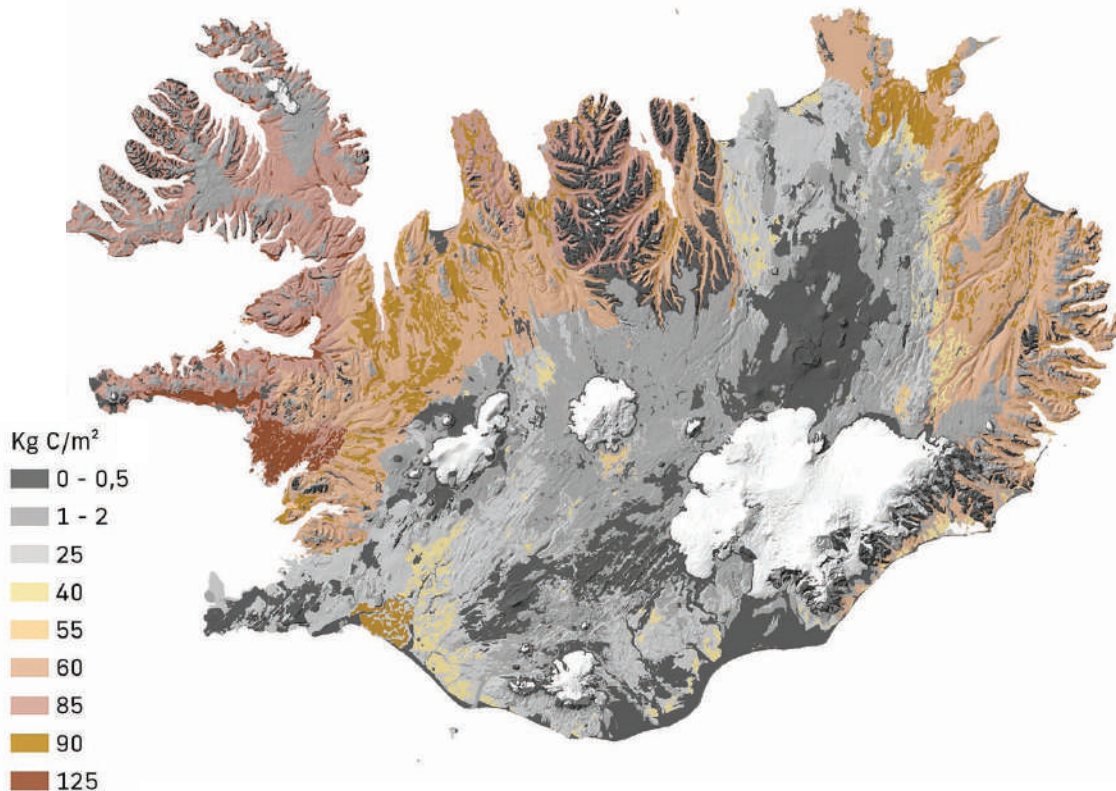
Moldin á Íslandi inniheldur afar misjafnlega mikið af kolefni. Dýpt jarðvegsins, grunnvatnsstaða, áfokshraði, landnýting o.fl. þættir móta lífrænt

innihald *sortujarðar* (*brúnjörð*, *votjörð*, *svartjörð*) sem og *mójarðar*. Djúp *mójarð* getur geymt meira en 300 kg af C undir hverjum fermetra, en meðaltal í gagnagrunni Landbúnaðarháskólans (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004) er 198 kg C/m² (tafla 5). Meðaltal fyrir *brúnjörð* í gagnagrunni Lbhí er mikið lægra, eða 23–30 kg/m², en í gagnagrunninum er einkum að finna mólendi með fremur lágt kolefnisinnihald vegna mikillar nýtingar – að meðaltali 3% C í yfirborðslögum. Innihald í yfirborðslögum þar sem gróskumikill gróður er á yfirborðinu er 6–12% að jafnaði, en mólendi á Íslandi er yfirleitt í hnignuðu ástandi – það hefur misst hluta kolefnisforðans.

Höfundur þessa rits og samstarfsfélagar hafa áætlað heildarforða hvers jarð-

Tafla 22.4. Kolefnisforði helstu jarðvegsflokka á Íslandi, byggt á jarðvegskortu Lbhí (vor 2020). Flokkar gróins lands eru grænritaðir en mold auðna grálituð. Oft eru flákar kortlagðir sem fleiri en einn jarðvegsflokkur vegna margbreytileika í landslaginu (mósaík). Skammstöfun (lykill) endurspeglar alþjóðleg heiti flokkanna. Heildarmagn kolefnis er gefið upp í milljónum tonna (M t). Gríðarlegur munur er á milli eininga sem innihalda mikið af kolefni og þeirra sem eru kolefnissnauðar. Samtals er kolefnisforði í mold á Íslandi talinn vera um 3 milljarðar tonna kolefnis, eða 11 milljarðar tonna CO₂-ígilda.

Jarðvegsflokkur / mósaík	Lykill	kg C/m ²	km ²	M t C	M t CO ₂
Mójarð	H	125	1341	168	615
Mójarð-Brúnjörð	H-BA	90	6	0,5	2
Svartjörð	HA	90	4707	424	1553
Brúnjörð-Svartjörð-Mójarð	BA-HA-H	85	9989	849	3113
Brúnjörð-Svartjörð-Votjörð	BA-HA-GA	60	18.041	1082	3969
Frerajörð-Votjörð	C-GA	55	140	7,7	28,2
Votjörð-Brúnjörð	GA-BA	40	2377	95,1	349
Brúnjörð	BA	25	13.352	334	1224
Melajörð-Malarjörð (Glerjörð)	MV-GV	2	17.528	35,1	128
Melajörð-Sandjörð (Glerjörð)	MV-SV	1	5830	5,8	21,4
Sandjörð (Glerjörð)	SV	0,5	4480	2,2	8,2
Sandjörð-Bergjörð	SV-L	0,5	4890	2,4	9
Bergjörð	L	0,2	7341	1,5	5,4
Vikurjörð (Glerjörð)	PV	0,1	248	0	0,1
Samtals				3007	11.025



Mynd 22.5. Tilgátukort af kolefnisforða í jarðvegi. Byggt á nýjstu útgáfu af grófu jarðvegskorti sem er endurskoðað reglulega í gagnagrunnum Lbhí. Kortið sýnir ljóslega að mest kolefni er í moldinni á vel grónum svæðum á Vesturlandi og Norðvesturlandi, en einnig á Austurlandi.

vegsflokks með endurbættri útgáfu af jarðvegskorti Landbúnaðarháskóla Íslands sem er í sífellri þróun (tafla 22.4). Niðurstaðan er kolefnisforði sem telur 3007 milljónir tonna af C í íslenski mold (11 026 milljón tonn CO₂). Áður höfðu Hlynur Óskarsson o.fl. (2004) áætlað að forðinn væri um 2100 milljónir tonna af C, byggt á eldri útgáfu jarðvegskorts Lbhí. Vitaskuld eru þetta einvörðungu grófar áætlanir, það vantar ítarlegri rannsóknir og jarðvegskort í nákvæmari mælikvarða til að bæta um betur. Það er afar brýnt að auka gæði gagna um kolefni í íslenski mold í framtíðinni, enda varða þau framtal losunar, bindingar og kolefnisbókhald landsins sem og skipulag sjálfbærrar landnýtingar.

Það er afar mikilvægt að fá mynd af dreifingu kolefnis um landið og hvar það er að losna eða bindast í vistkerfum. Mynd 22.5 sýnir tilgátukort fyrir kolefnisforða landsins (sjá töflu 22.4). *Mójröð* á Vesturlandi og *svartjörð* á Vestur- og Norðvesturlandi eru stærstu

kolefnisgeymarnir. Illa gróið land, m.a. á gosbeltum landsins, geymir lítið kolefni.

22.4. Hve mikið hefur tapast af kolefni úr íslenskum vistkerfum?

- 1) **Jarðvegsrof.** Kolefni í mold tapast með jarðvegsrofi sem flytur mold t.d. til sjávar með vatni og vindum.
- 2) **Framræsla votlenda.** Kolefni tapast við framræslu votlenda – þau taka að losa kolefni í stað þess að binda það. Losun CO₂ og N₂O eykst en losun á CH₄ minnkar. Í heild eykst losun í CO₂-ígildum talið.
- 3) **Landnýting – landhnignun.** Minna verður eftir af kolefni í þurrlandi og votlendum vegna landnýtingar sem raskar kolefnishringrás kerfanna.
- 4) **Kolefnisbinding.** Gróið land bindur kolefni vegna þess að jarðvegurinn verður smám saman dýpri vegna áfoks steinefna, uppsöfnunar kolefnis í mýrum og aðgerða til að bæta ástand lands sem leiða til þess að kolefnisforði byggist upp.

Moldin losar mest!

Ætla má að yfir 2000 milljónir tonna af CO₂ hafi tapast úr íslenski mold á umliðnu árbúsundi vegna hnignunar vistkerfa. Losun af mannavöldum nú er undir 5 milljónum tonna af CO₂ ef losun frá landi er undanskilin. Mikilvægi moldar í samhengi við hlýnun loftslags er augljóst.



Mynd 22.6. Efri mynd: Land í slæmu ástandi hefur tapað gríðarlegum kolefnisforða, sem m.a. eykur á styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Land í góðu ástandi geymir mikið af kolefni og með endurheimt vistkerfa má minnka styrk CO₂ í lofthjúpunum. Neðri mynd: Illa farið land getur enn haft umtalsvert magn kolefnis í moldinni sem smám saman er að losna sem CO₂ út í andrúmsloftið.

Líta þarf til fjögurra meginþátta eða ferla er varða tap eða bindingu kolefnis í jarðvegi.

Jarðvegsrof. Hlynur Óskarsson og félagar (2004) áætla að 120–500 milljónir tonna kolefnis hafi tapast á síðustu u.þ.b. 1000 árum vegna jarðvegsrofs og þá einkum með tilliti til útbreiðslu og virkni rofabarða (mynd 22.6), sem samsvarar 440–1 833 milljónum tonna af CO₂. Sé tapinu deilt

jafnt á þúsund ár nemur það 0,4–1,8 milljónum tonna af CO₂ á ári. Þetta gríðarlega magn sem hefur tapast úr vistkerfunum endar þó alls ekki allt í andrúmsloftinu, sumt grefst sem set í höfunum eða er tekið upp í vistkerfi sjávar og getur þar bundist í kalki. En í þessar tölur vantar tap vegna áfoksgeira, rofdíla o.fl. ferla sem einnig stuðla að myndun auðna, rétt eins og rof sem tengist rofabörðum.

Framræst votlendi. Tap frá framræstum mýrum er áætlað um 8,4 milljónir tonna CO₂-ígilda árið 2017 samkvæmt framtali Íslands til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (Keller o.fl. 2019). Hér eru notaðir stuðlar Vísindanefndar Loftslagssamningsins (ICPP) en þeir eru umdeildir þegar þetta er ritað (2022), enda er losunin örugglega mjög breytileg frá einum stað til annars, en frekari rannsóknir skortir. Framræsla votlendis hófst fyrir alvöru upp úr lokum heimsstyrjaldarinnar síðari. Með hliðsjón af því að búið var að grafa meirihluta skurða fyrir árið 1980 (fyrir 40 árum síðan) er ljóst að losun frá framræstum votlendum nemur tugum eða hundruðum milljóna tonna CO₂-ígilda eftir árið 1940, en hér verður ekki farið út í að áætla heildarlosunina nákvæmar en það.

Minnkun kolefnisforða í brúnjörð (gróin þurrlendi). Minnkun kolefnisforða í mold

vegna landnýtingar (myndir 22.7 og 22.8) leiðir til samsvarandi losunar á CO₂ út í andrúmsloftið (stundum einnig N₂O). Með öðrum orðum: kolefnisinnihald efsta hluta jarðvegsins minnkar miðað við náttúrulegt kolefnismagn við eðlilegar aðstæður. Það verður að segjast að óvissan sem fylgir mati á þessum þætti á Íslandi er mikil. Til að fá hugmynd um stærðargráðu þessarar minnkunar má gefa sér að minnkun vegna landnýtingar hafi orðið á a.m.k. 45 000 km² lands (u.þ.b. stærð gróðurlendis nú en það var mun útbreiddara), og þá er tap á kolefni vegna jarðvegsrofs ekki talið með.

Minnkunin er vitaskuld æði misjöfn á milli einstakra svæða. Hér verður aðeins miðað við virkasta lag jarðvegsins: efstu 30 sentimetrana. Heilbrigð birkivistkerfi hafa iðulega 6–14% C að meðaltali í efstu 30 cm jarðvegs, með rúmpyngd 0,6 t/m³, metin út frá kolefnishlutfallinu.



Mynd 22.7. Úr sér genginn úthagi á Norðvesturlandi. Talsvert er af ógrónum blettum í yfirborðinu sem verða meira áberandi ef horft er á landið ofan frá. Land sem þetta losar líklega mikið af gróðurhúsalofttegundum. Beitarálag er mikið en kerfið ennþá að mestu gróið.

Nú er kolefnisinnihaldið iðulega 3–6% en rúmþyngdin meiri: 0,75 t/m³. Miðað við 10% meðalinnihald kolefnis í upphafi en 4,5% meðalinnihald nú í efstu 30 cm jarðvegsins hefur minnkunin verið sem hér segir:

Í upphafi: 0,3 m x 10/100 C x 0,6 t/m³ x 1 000 000 m²/km² x 45 000 km²
= 810 milljón tonn C

Nú: 0,3 m x 4,5/100 C x 0,75 t/m³ x 1 000 000 m²/km² x 45 000 km²
= 456 milljón tonn C

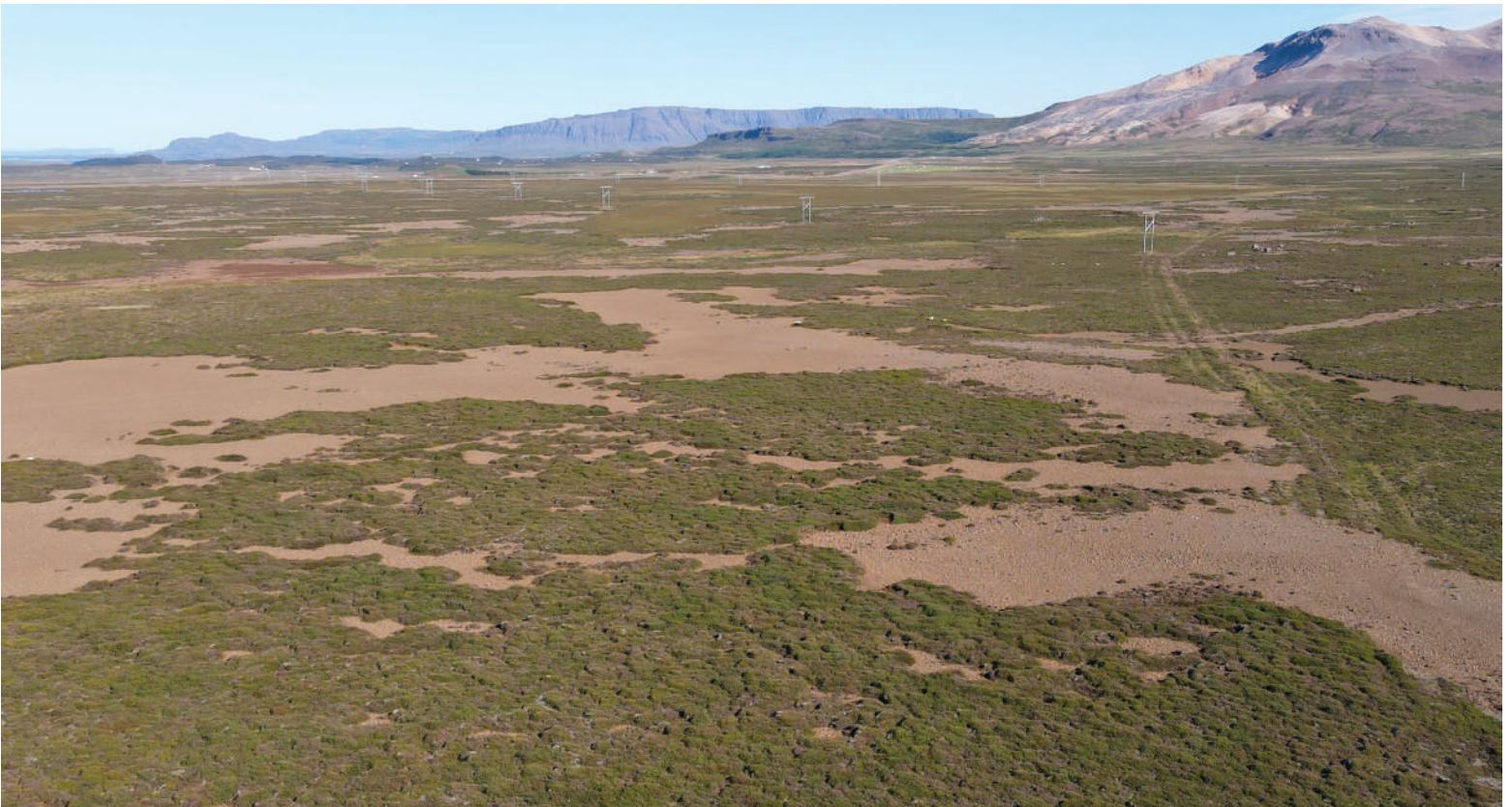
Munurinn: 354 milljón tonn C eða 1298 milljónir tonna af CO₂

Mismunur á eðlilegu náttúrulegu ástandi og því sem nú ríkir er gróflega reiknaður sem 354 milljónir tonna af C í kolefnisforða í efstu 30 cm jarðvegs, sem samvarar **1298 milljónum tonna af CO₂**. Talan gefur til kynna stærðargráðuna. Sé þessari lækkun deilt á 1000 ár er niðurstaðan að um **1,3 milljónir tonna**

af CO₂ hafi tapast á ári að meðaltali í þúsund ár. Enda þótt mikil óvissa fylgi útreikningum af þessu tagi lýsa þeir stærðargráðunni hvað varðar áhrif af minnkun kolefnis í yfirborðslögum vegna landnýtingar, sem vert er að gefa nánari gaum.

22.5. Áfok og kolefnisuppsöfnun

Stöðugt áfok veldur því að yfirborðið hækkar: kolefnið grefst í moldina í dýpri jarðlögum undir áfokinu. Algengur „áfokshraði“ (þykkun moldar) er á bilinu 0,025–0,4 mm á ári (ÓA 2010) en kolefnisinnihaldið 2–8% (Hlynur Óskarssono.fl.2004,Lbhígagnagrunnur), en rúmþyngd er því minni sem meira er af kolefni, þ.e. moldin verður léttari (Rannveig Anna Guicharnaud 2002). Uppsöfnun kolefnis í mold gæti verið á bilinu 0,005–0,03 kg af C á fermetra á ári af þessum sökum (ÓA 2015, 8.



Mynd 22.8. Illa farið land á Snæfellsnesi. Moldir eru í yfirborði ógróna landsins og rofdílar í gróðurþekjunni þar sem losun CO₂ á sér stað. Kolefni moldarinnar brotnar niður en ekkert kemur á móti frá gróðri. Endurheimt birkiskógar á þessu svæði gæti bundið mikið kolefni eins og síðar verður rætt um.

kafli). Út frá þessum tölum má áætla að binding CO₂ gæti auðveldlega numið um 1 milljón tonna á ári í óröskuðum jarðvegi með gróðurhulu á Íslandi.

Unnt er að áætla þátt áfoks með öðrum hætti: Gefum okkur að 45 000 km² af grónu yfirborði hafi hækkað um 15 cm á 1000 árum að meðaltali (afar misjafnt eftir landshlutum). Ennfremur að hlutdeild kolefnis sé 3% C og rúmþyngdin 0,75 t/m³. Slíkur útreikningur leiðir til þess að 557 milljónir tonna af CO₂ hafi bundist, og ef reiknað er miðað við 1000 ár er bindingin 557 þúsund tonn af CO₂ á ári. Sú tala getur verið töluvert hærri ef kolefnisinnihaldið er herra en 3% í efstu cm moldarinnar (t.d. 6–10% en minni rúmþyngd), m.a. þar sem beitarálag er hóflegt eða land friðað fyrir beit (mynd 22.9). Óvissan er mikil en stærðargráðan virðist samsvara 0,5–1 milljón tonna af CO₂ á ári.

Það er alveg ljóst að áfokið eitt og sér er mikilvirkt í að grafa kolefni úr andrúmsloftinu í íslenskan jarðveg. Þessar tölur eru afsvipaðri stærðargráðu og rannsóknir á mikið beittum svæðum gefa til kynna, t.d. í Krísuvík þar sem

hafa safnast upp 0,017–0,030 kg af C á fermetra á ári síðan á 12. öld eftir því sem jarðvegurinn þykknaði (Guðrún Gísladóttir o.fl. 2010). Eva Ritter (2007) fékk um 0,023 kg af C á fermetra á ári þar sem skógi var plantað í rýrt mólendi. Gildin fyrir Ísland eru hærri en þau sem birt voru í yfirliti Zehetner (2010) fyrir *eldfjallajörð* í heiminum (meðaltal 0,01 kg af C á fermetra á ári). Við alla þessa bindingu í moldinni, raunverulega og mögulega, bætist binding í gróðri.

22.6. Binding kolefnis í þurrlendismold við friðun gróins lands eða bættu landnýtingu

Áður var greint frá því að kolefni binst smám saman í jarðvegi vegna áfoks; moldin þykknar – yfirborðið hækkar. Kolefni er einnig að skila sér aftur í moldina þar sem land hefur verið tekið úr beitarnotum, t.d. þar sem land er tekið til skógræktar, frístunda og útivistar eða þar sem búskapur er aflagður.



Mynd 22.9. Ríkt mólendi nærri þjóðgarðinum í Jökulsárgljúfrum. Hlutdeild blómplantna og gulvíðis fer vaxandi sem gefur til kynna bætt næringarástand og minnkaða beit. Birkir eru tekið að nema land. Hér er að safnast fyrir kolefni bæði vegna minnkandi beitar og áfoks frá hálendinu sem veldur því að moldin er að þykkna og grefur um leið umtalsvert kolefni.



Mynd 22.10. Land í framför eftir ofbeit þegar fé var sem flest á Suðurlandi. Rofsár eru gróin saman að mestu. Slíkt land getur verið að binda mikið kolefni þar sem aðstæður eru góðar, rakt og hlýtt og gróðurhula á yfirborðinu, sem þó er mjög háð beitarálagi. Bæði þurrlendið og votlendið binda kolefni.

Moldin jafnar sig á áratugum eða árhundruðum eftir aðstæðum.

Kolefnið safnast misjafnlega hratt fyrir í moldinni eftir friðun, m.a. eftir ástandi landsins í upphafi sem og öðrum aðstæðum. Þar sem ástandið er slæmt gerist lítið í fyrstu. En ef miðað er við 2% uppsöfnun að meðaltali á fjölbreytilegu landi á 50 ára tímabili, sem væri fremur hæg uppsöfnun, næmi hún sem samsvarar 71,5 t CO₂ á ha. Væri henni deilt á 50 ára tímabil er uppsöfnunin 1,43 t CO₂/ha á ári. Þegar stór svæði eru undir, t.d. þúsundir ferkílómetra, fer þessi binding að segja verulega til sín, t.d. 715 þúsund tonn af CO₂ á ári á 5000 km² svæði (miðað við 0,65 t/m³ rúmþyngd, efstu 15 cm moldar og að 50 ár taki að hækka kolefnisgildi um 2%, t.d. úr 4 í 6%).

Á svæðinu milli Hólmsár og Skeiðarársands eru t.d. afréttarsvæði sem sitja lágt þar sem beitarálag hefur minnkað, land er gróið og loftslag er bæði hlýtt og rakt og hagstætt gróðri (mynd 22.10). Ætla má að umtalsverð kolefnisbinding fari þar fram, sem þó er háð aðstæðum

á hverjum stað. Öðru máli gegnir um þau svæði sem sitja hærra, þar sem jafnvel lítil beit kemur í veg fyrir uppsöfnun, enda hitiastig lægra og vöxtur minni, sem og gróðurþekja.

22.7. Framræsla votlendis – geigvænleg losun gróðurhúsalofttegunda

22.7.1. Votlendi

Framræst votlendi eru afar öflug uppspretta gróðurhúsalofttegunda, stundum nefnd „heitir reitir“ (e. hot-spots) fyrir losun. Á milli 10 og 20% votlenda heimsins hafa verið þurrkuð upp vegna landbúnaðar og skógræktar (FAO 2014, Crump o.fl. 2017). Það er ekki aðeins á Íslandi þar sem stórum hluta votlenda hefur verið raskað, t.d. hefur 53% votlenda Bandaríkjanna utan Alaska verið raskað – og yfir 90% í Kaliforníu og Ohio (Mitch og Gosselink 2007). Það er mikilvægt að taka losun

gróðurhúsalofttegunda frá framræstum votlendum alvarlega við skipulag mót-vægisáðgerða vegna hlýnunar loft-hjúpsins – en það er enn sem komið er yfirleitt ekki gert.

Þegar vatnsstaða í votlendunum lækkar vegna framræslu á súrefni greiðan aðgang að lífrænum efnum sem safnast hafa upp í moldinni. Við það tekur hinn lífræni forði að brotna niður og kolefnið losnar sem CO₂. Þegar votlendin þorna við framræsluna og taka að brenna lífræna forðanum gengur á efnin í moldinni. Við það losnar iðulega um nitur og landið verður því frjósamt til ræktunar til að byrja með.

Yfirborðið tekur víðast hvar að lækka ef moldin er lífræn og þar sem langt er um liðið síðan landið var ræst fram getur yfirborðið hafa sigið um margra metra. Sums staðar á Bretlandseyjum er aðeins eftir grunnur forði (tugir cm) þar sem áður var marga metra þykkur votlendisjarðvegur. Á Flórída hafa mikil flæmi verið ræst fram vegna byggðar og þar síga nú umfangsmiklir

flákar lands með tilheyrandi losun gróðurhúsalofttegunda. Á láglandi við strendur getur land jafnvel lækkað niður fyrir sjávarmál með tilheyrandi kostnaði við að verja landið fyrir ágangi sjávar.

Land virðist síga hægar hér á landi en víða annars staðar en þó skortir verulega á mælingar á landsigi í framræstum mýrum (sjá þó B.Sc.-ritgerð Ingu Völu Gísladóttur 2010). Greinileg ummerki þessa sigs má sjá víða, t.d. í Norðurmýrinni í Reykjavík þar sem steiptar girðingar ná ekki niður á yfirborðið og sökklar húsa standa ómúraðir upp úr jarðvegi (mynd 22.12). Minna sig hérlendis má að hluta til rekja til þess hve stór þáttur ösku og áfoks er í moldinni, sem heldur henni saman (Bartoli og Burtin 2007).

Rotnunarstig hefur líka áhrif, en lítið rotnaðar, kaldar mýrar síga líklega hægar en ef lífræna efnið væri meira rotnað. Þess má geta að mýrar hér á landi eru að miklu leyti orðnar til úr leifum háplantna sem leiðir til annarrar jarðvegsbyggingar (e. structure) en í mýrum sem eru að



Mynd 22.11. Framræst votlendi. Súrefni kemst að lífrænum efnum moldarinnar, hún tekur að anda og losar um leið kynstrin öll af CO₂. Smám saman lækkar hlutfall kolefnis í moldinni ef bergefni (áfok og aska) eru til staðar, en einnig tekur yfirborðið að síga.



Mynd 22.12. Landsig í Norðurmýrinni í Reykjavík vegna framræslu. Mýrin hefur sigið við húsið og unnið er að viðgerð (fyrir ofan) en landið hefur sigið niður fyrir girðinguna á myndinni fyrir neðan svo að gapir undir hana.

mestu orðnartil úr mosa (*sphagnum*) (t.d. Christensen o.fl. 2003). Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir (2017) gerði ráð fyrir að lækkun kolefnisforðans samsvaraði því að um 0,5 cm lag oxaðist árlega, en sigið er væntanlega nokkru hægara af áðurgreindum ástæðum.

Votlendi Íslands eru á bilinu 9 000 km² (ÓA o.fl. 2016) til 10 300 km² (Keller o.fl. 2020) eftir því hvaða gagnagrunnar og forsendur fyrir skilgreiningu á votlendi eru lagðir til grundvallar. Svæði með mold sem hafa stöðu votlendis í moldarfræðum – þar sem grámi er til staðar (e. gleyic) vegna þess að vatn stendur uppi í jarðveginum í umtalsverðan tíma – eru væntanlega mun umfangsmeiri hérlendis.

Mjög skortir á kortlagningu jarðvegs er þetta varðar. Um helmingi votlendis á landinu hefur verið raskað og um 70% votlendis neðan 200 m yfir sjávarmáli (Hlynur Óskarsson 1998b, Þóra Ellen Þórhallsdóttir o.fl. 1998, ÓA o.fl. 2016). Miklu af því landi sem var ræst fram fyrir u.þ.b. 1970 var ætlað að auka heyframleiðslu, en draga má þá ályktun af því sem ritað hefur verið um framræsluna (Sólveig Ólafsdóttir 2013) að hvatinn að hluta hennar eftir 1970 hafi verið ríkisstyrkir sem veittir voru til verkefnisins. Umtalsverður hluti þess lands sem ræstur var fram eftir 1970 er aðeins nýttur til beitar eða er ekki nýttur til landbúnaðar (sjá Sólveig Ólafsdóttir 2013, einnig ÓA o.fl. 2016).

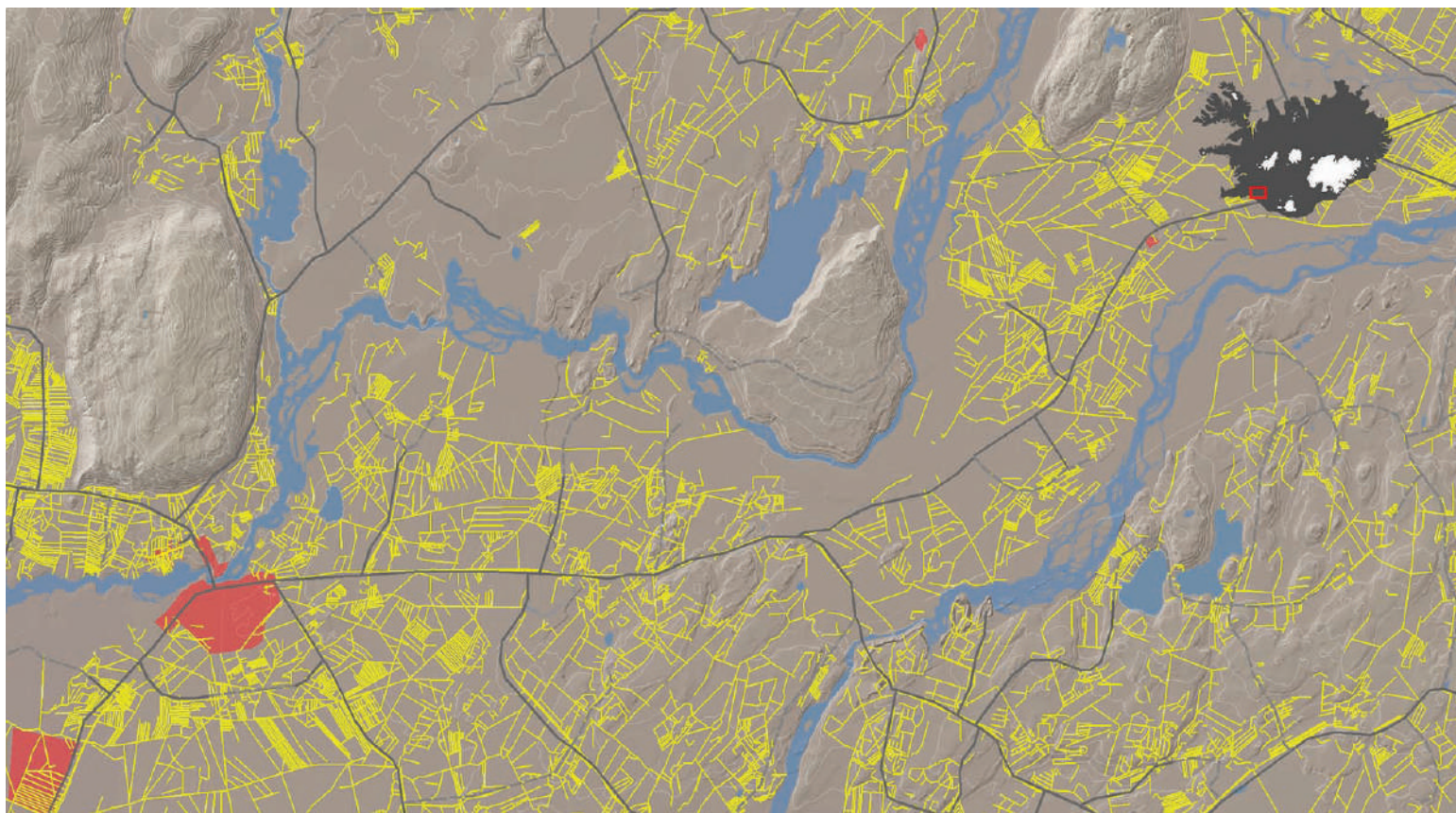
Framræsluskurðir eru um 30 000 km langir og síðan eru um 60 000 km af svokölluðum kílræsum sem hefur verið bætt við (Áslaug Helgadóttir o.fl. 2013, Fanney Gísladóttir o.fl. 2010; myndir 22.11, 22.13 og 22.14). Tölur um heildarlengd skurða eru í stöðugri endurskoðun eftir því sem landfræðileg gagnasett batna. Röskunin er vitaskuld mjög mismunandi eftir þéttleika skurðanna og hve langt frá skurði hið raskaða land er.

Losun CO₂ úr framræstu landi er að hluta til háð því hve lækkun grunnvatns er mikil, sem m.a. fer eftir fjarlægð frá skurðum, dýpt þeirra og moldarinnar, hvort kílræsing er til staðar, vatnsleiðni o.fl. þáttum. En jafnvel aðeins 10 cm lækkun vatnsborðs leiðir til öflugrar losunar, þótt hún sé minni en t.d. ef vatnsborð lækkaði um 100 cm. Þá hefur hitastig áhrif á losunina; því meiri hiti, þeim mun örrari getur losunin orðið. Því getur verið að votlendi á köldum annesjum hérlendis losi minna en t.d.

votlendi inn til dala eða á Suðurlandi. Dýptin, jarðvegsgerðin, landnýtingin o.fl. atriði koma einnig til álita: breytileikinn er örugglega mikill. Hér er þó ekki rúm til að ræða þessi atriði frekar en þeim verða vonandi gerð góð skil af öðrum í framtíðinni.

22.7.2. Óröskuð votlendi losa líka

Mýrar safna smám saman í sig lífrænum efnum – þær eru að binda kolefni. En málið er þó flóknara en svo að hægt sé að líta til þessarar uppsöfnunar kolefnis einvörðungu. Sérhæfðar örverur sem hafa aðlagast súrefnisfirrð moldarinnar nýta sér orkuforðann sem er í lífrænum efnum og losa metan – CH₄. Metan er öflug gróðurhúsalofttegund og því telst vera nettólosun CO₂-ígilda jafnvel þótt votlendin séu að binda kolefni á móti þessari metanlosun. Á Íslandi er gert ráð fyrir að losun gróðurhúsalofttegunda frá óröskuðum votlendum samsvari 2,8 t CO₂-ígilda á ha á ári (Keller o.fl. 2020).



Mynd 22.13. Framræslu- og áveituskurðir á Suðurlandi, Ölfusá til vinstri, Þjórsá til hægri. Þéttleiki og heildarlengd skurðanna er gríðarlegur og lítið um óraskað votlendi. Skurðirnir hafa verið hnitaðir inn í landfræðilegan gagnagrunn (GIS-kerfi) hjá Landbúnaðarháskóla Íslands í tengslum við LULUCF-verkefnið og framtal Íslands til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna.



Mynd 22.14. Dæmi um skurði við bæ á Suðurlandi – framræst votlendi eru víða undirstaða heyframleiðslu til vetrarfóðurs auk þess sem hluti þeirra er nýttur til beitar.

Hér er búið að taka tillit til losunar á metani (CH_4) sem og uppsöfnunar kolefnis. Tölur af þessu tagi munu væntanlega taka breytingum eftir því sem þekking eykst með fleiri rannsóknum og einnig er þess að vænta að mikill breytileiki sé bæði innan svæða og á milli þeirra.

22.8. Losun frá framræstum votlendum hérlendis

22.8.1. Losun á flatarmálseiningu

Við framræslu taka lífræn efni í votlendunum að oxast – þau „brenna“ og losa þar með CO_2 út í andrúmsloftið með margföldum hraða en fyrir framræsluna. Þau losa einnig CH_4 (mest úr sjálfum skurðunum) og N_2O en langmest af losuninni er á formi CO_2

(Jón Guðmundsson 2016). Vísindanefnd Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (e. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) kemur á samstarfi vísindamanna um heim allan og er ábyrg fyrir vísindastarfi samningsins. Vísindanefndin hefur gefið út leiðbeinandi tölur um losun frá votlendum sem byggðar eru á rannsóknum víða um lönd.

Leiðbeinandi tala fyrir losun kolefnis fyrir íslenskar aðstæður er 5,7 t C/ha, eða 20,9 t CO_2 á hektara umfram náttúrulega losun (IPCC 2014; sjá einnig Jón Guðmundsson 2016, Keller o.fl. 2020). Leiðbeinandi tölur fyrir tún eru nokkru hærrí því þar er þéttleiki skurða meiri. Mælingar á losun CO_2 frá framræstu votlendi á Íslandi sýna losun upp á 4–8,25 t C/ha (Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson 2014) sem er af sömu stærðargráðu og IPCC-gildið (5,7 t C/ha). Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir (2017) fékk heldur lægri losunartölur

við rannsóknir á Vestur- og Suðurlandi, en þær tóku aðeins til efsta hluta jarðvegsins niður að öskulagi frá því um 1500 og því eru niðurstöður hennar sambærilegar við losunargildi IPCC. Þóroddur Sveinsson o.fl. (2022) mældu einnig losun í efstu lögum (um 20 cm) jarðvegs með sömu aðferð (niður á H1104) á tveimur stöðum í grunnum jarðvegi á Norðurlandi sem gaf 0,95 og 5,1 tonn af CO₂ í losun á ha á ári, en lægri talan fékkst í yfirborði lands sem var í kornrækt. Ekki er ljóst hvernig unnt er að yfirfæra þessar tölur á heildarlosun og allra síst á framræst votlendi í úthaga án kornræktar.

Niðurstöðurnar taka einungis til efsta hluta jarðvegsins þar sem áhrif ræktunar eru mikil. Hærrí talan yfirfærð á 1 m dýpi gefur svipaða tölu og IPCC-gildið fyrir votlendi utan ræktarlands. Af öllu þessu er ljóst að mikilvægt er að auka rannsóknir á losun úr framræstum votlendum á Íslandi, m.a. með tilliti til mismunandi jarðvegsgerða, landnýtingar, dýptar, loftslags o.fl. þátta.

22.8.2. Heildarlosun frá framræstum votlendum

Losun og binding gróðurhúsalofttegunda frá landi á Íslandi er talin fram til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (UN-FCCC) í svokallaðri „Landsskýrslu“ (e. National Inventory Report – NIR) sem er á höndum Umhverfisstofnunar. Þar er vitaskuld talin losun frá samgöngum, skipum, landbúnaði, iðnaði og svo mætti lengi telja.

Losun gróðurhúsalofttegunda án „landnýtingar“ nam 4,956 milljónum tonna CO₂-ígilda árið 2018 (Keller o.fl. 2020). Síðan er einnig tilgreindur kolefnisjöfnuður fyrir landið og landnýtingu. Sá hluti gengur undir heitinu „LULUCF“ sem stendur fyrir „Land Use, Land Use Change and Forestry“. Losun vegna LULUCF á Íslandi 2018 var 9,009 milljónir tonna CO₂-ígilda (Keller o.fl. 2020). Skógræktin, Landgræðslan og fleiri stofnanir koma að því verkefni að safna saman tölum er lúta að landinu og landnýtingu. Leggja



Mynd 22.15. Endurheimt votlendi að Hesti í Borgarfirði. Með slíkum aðgerðum snarminnkar losun CO₂ og N₂O en losun á metangasi eykst (CH₄). Losunin verður fljótt svipuð og frá öröskuðu votlendi eftir að fyllt hefur verið upp í skurðina.

þarf saman landstærðir og losunartölur og í sumum tilfellum bindingu kolefnis, t.d. á svæðum þar sem skógrækt og landgræðsla er stunduð, til þess að fá heildarmynd af kolefnisjöfnuði og losun gróðurhúsalofttegunda frá landi.

Hér er valin sú leið að hnýta saman losunartölur fyrir framræst votlendi og flatarmálstölnar sem áður voru gefnar í töflu 22.5.

Framræstu votlendin losa nú um 8,430 milljónir tonna CO₂-ígilda samkvæmt stuðlum IPCC. Hins vegar þarf að draga frá hvað þessi votlendi væru að losa væru þau óröskuð (2,84 t CO₂-ígilda/ha/ári), sem er gert í neðstu línu töflunnar. Þar er niðurstaðan fyrir áhrif framræslu 7,448 milljónir tonna CO₂-ígilda á ári. Sú losun er meiri en um 5 milljóna tonna losun frá öðrum þáttum sem taldir eru fram til Loftslagsbókhaldsins (samgöngur, iðjuver, landbúnaður, skip o.fl.). Það er til mikils að vinna að reyna að minnka þessa losun.

22.8.3. Deilur um losun votlenda á Íslandi

Ekki eru allir á einu máli um losun gróðurhúsalofttegunda frá framræstum votlendum. Gagnrýni og rök fela m.a. í sér að votlendin hafi mun hærra hlutfall steinefna héraendis, að losunarstuðlar

kunni að vera ofmetnir, að flatarmál votlendis sé ofmetið, að breytileiki á milli svæða sé mjög mikill, að losun sé minni á kaldari svæðum landsins, að ræktun kunni að skila kolefni í moldina á móti losuninni og að inni í skurðaþekjunni séu m.a. gamlir, hálfylltir skurðir. Hér er ekki dregið úr mikilvægi þeirra sjónarmiða sem endurspeglar þessar efasemdir. Stuðst hefur verið við bestu fánlegu gögn hvers tíma, en mikilvægt er að bæta þau, t.d. gögn um lengd skurða, stærð framræsts lands, mismunandi jarðvegsgærðir og dreifingu þeirra (m.a. jarðvegskort), losun frá mismunandi landeiningum, sem og skurðaþéttleika, stærð áhrifasvæðis, kílræsingum o.s.frv.

Rök sem færð eru fyrir því að íslensk votlendi losi ekki eins mikið kolefni og erlendar mómyrar vegna þess að minna sé af lífrænum efnum í þeim, talið í prósentum, standast þó alls ekki, heildarmagnið er það sem skiptir máli (kg C/m³) sbr. rammagrein á næstu blaðsíðu.

Hluti deilnanna er e.t.v. sprottinn af flóknu framtali gagna til Loftslags-samningsins, en þörf er á einfaldari framsetningu fyrir almenning og fagfólk sem reynir að fóta sig í þessum fræðum. Tekið er undir þau sjónarmið að það sé afar brýnt að efla rannsóknir á Íslandi á losun og bindingu gróður-

Tafla 22.5. Losun gróðurhúsalofttegunda frá óröskuðum og röskuðum votlendum á Íslandi. Tölurnar eru í CO₂-ígildum þar sem tekið hefur verið tillit til bindingar kolefnis í votlendum og losunar CH₄ og N₂O. Ekki er tekið tillit til bindingar í gróðri, m.a. í skógrækt (ÓA og Jón Guðmundsson 2020).

	Landgerð	Stærð	Losun á ári	Samtals á ári
		ha	t CO ₂ -ígildi/ha	milljón t CO ₂ -ígildi
A	Óröskuð votlendi	681 720	2,84	1,936
B	Röskuð votlendi, beit o.fl. not	290 310	23,04	6,689
C	Röskuð votlendi í ræktun	55 600	31,32	1,741
B+C	Samtals röskuð votlendi	345 910		8,430
A+B+C	Samtals votlendi	1 027 000		10,366
(B-A)+(C-A)*	Aukin losun vegna framræslu			7,448

*: losun nú að frádreginni losun frá samsvarandi óröskuðu votlendi; aukin losun vegna framræslu.

húsalofttegunda frá landi, votlendi sem þurrlandi. Breytileiki er eflaust mikill á milli jarðvegsgerða og landsvæða. Rannsóknir eiga eflaust eftir að leiða í ljós breytingar á þessum tölum er varða losun, stærð lands o.fl. Þó er ólíklegt með hliðsjón af bestu fáanlegum gögnum nú að stærðargráðan breytist verulega: losun sem telst í milljónum tonna CO₂-ígilda á ári. Það er þessi stærðargráða sem er mergur málsins. Jafnvel þótt komi í ljós að losunin sé helmingi minni en gert er ráð fyrir skv. stuðlum IPCC er losun CO₂ frá framræstum votlendum á Íslandi geigvænleg.

22.9. Landnýting og kolefnisspor

Með aukinni umhverfisvitund vex áhugi neytenda á kolefnisspori fæðunnar og öðrum neysluvörum. Hér er einkum hugað að kjötframleiðslu, sem hefur mun hærra kolefnisspor („sótspor“) en aðrar fæðutegundir almennt, ekki síst nautakjöt og lambakjöt, iðulega um 25 kg CO₂-ígilda á hvert kíló kjöts (sjá Environice 2017, FAO 2020 – vefsíða). Þetta teljast há gildi. Kolefnisspor lambakjöts hefur verið metið sem

Losað íslensk votlendi minna af CO₂ en erlendar mómyrar vegna lægra kolefnishlutfalls?

Mold íslenskra votlenda inniheldur áfok og gjóskulög og þau eru sannarlega með lægra hlutfall kolefnis í hverju jarðvegslagi en gengur og gerist í mómyrum norðurslóða. Því er gjarnan haldið fram að þá hljóti losun íslenskra votlenda að vera minni en t.d. finnskra mómyra.

Í þessu felst algengur misskilningur, heildarmagn kolefnis er ekki endilega minna í íslensku votlendunum. Það má ekki gleyma því að gera ráð fyrir rúmþyngd jarðvegsins, sem er meiri í votlendum á Íslandi en í arktískum mómyrum almennt. Tökum dæmi þar sem borið er saman arktískt votlendi með 30% C og rúmþyngd 0,2 t/m³ annars vegar og hins vegar *votjörð* á Suðurlandi með 10% C (sem telst lágt kolefnishlutfall í votlendi) en rúmþyngdina 0,6 t/m³:

$$\text{Þyngd kolefnis í rúmmetra moldar (kg)} = \text{\% C/100} \times \text{BD t/m}^3 \times 1000 \text{ kg/t}$$

$$\begin{aligned} \text{Arktísk mójörð:} & \quad 30/100 \times 0,2 \times 1000 = 60 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Sunnlensk votjörð:} & \quad 10/100 \times 0,6 \times 1000 = 60 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Niðurstaðan er því sú að það er jafnmikið kolefni í rúmmetra af íslensku *votjörðinni* og í finnskri arktískri *mójörð* í þessu dæmi.

Því er almennt ekki hægt að nota þá röksemdafærslu að íslensk votlendi hljóti að losa minna af gróðurhúsalofttegundum vegna þess að þau séu ekki eins lífræn, heildarmagn kolefnis er sambærilegt. Hins vegar er örugglega afar misjafnt hve mikið þau losa, breytileiki í landslagi er mikill sem og grunnvatnsstaðan.

28,6 kg CO₂-ígildi á hvert kg kjöts á Íslandi (Environice 2017). En þá á eftir að meta áhrif nýtingarinnar á landið: losar landið gróðurhúsalofttegundir við nýtinguna? Eða er það jafnvel að binda þær? Slíkir útreikningar hafa verið gerðir í öðrum löndum, m.a. fyrir dilkakjöt, en niðurstöður eru ákaflega misjafnar eftir aðstæðum hverju sinni (t.d. Ripoll-Bosch o.fl. 2013).

Hluti framleiðslu nautakjöts, mjólkurafurða og dilkakjöts nýtir framræst land til fóðurframleiðslu. Því getur kolefnisspor þessarar framleiðslu verið mun hærra en talið er þegar landið er ekki tekið með í reikninginn. Ein ástæða þess að landið hefur ekki verið tekið með er sú að það er talið flókið eða erfitt að færa landnýtinguna inn í reikningsskil gróðurhúsalofttegunda fyrir framleiðsluna. Það gefur þó beinlínis ranga mynd af kolefnissporinu að sleppa landnýtingarþættinum. Það er ekki rétt að erfitt sé að taka losun við fóðurframleiðslu á votlendi með í reikninginn, það er hægt með því að nota fyrirliggjandi stuðla um losun frá votlendi og stærð túna á framræstum

votlendum. Unnt er að reikna losun vegna fóðurframleiðslu fyrir hvert býli fyrir sig en jafnframt er hægt að reikna eins konar landsmeðaltal. Erfiðara er að taka beit sauðfjár á úthaga með inn í myndina því þar er óvissan meiri. Hér á eftir eru sýndir útreikningar fyrir dilkakjöt sérstaklega, en færa má rök fyrir því að kolefnisspor nautakjötsframleiðslu sé á svipuðu róli er varðar landnýtingu, en að víðfeðmu mólendi og framræstum úthaga undanskildum. Þá er vikið lítillega að kolefnisspori hrossa.

22.9.1. Kolefnisspor (sótspor) við framleiðslu á lamba- og nautakjöti

Lambakjöt

Rétt er að leggja á það áherslu að flestir þeir er stunda búskap nú tóku við búi áður en loftslagsspor landnýtingar komst á dagskrá samfélagsins. Viðbrögð og úrlausnir hljóta að taka mið af því. Hér verða færð rök fyrir því að losun gróðurhúsalofttegunda vegna beitar og fóðurframleiðslu geti verið gríðarlega mikil, en hún er m.a. tengd



Mynd 22.16. Hér er heyframleiðsla að stærstum hluta á framræstu votlendi og mólendið að hluta í slæmu ástandi með tilheyrandi losun CO₂ út í andrúmsloftið. Kolefnisspor framleiðslu við þessar aðstæður er ansi stórt.

nýtingu framræstra votlenda sem áður var rætt um. Mikilvægt er að hafa í huga að margvíslegar lausnir koma til greina til að draga úr þessari losun – m.a. breytingar á beitarháttum en ekki síður landgræðsla, skógrækt og endurheimt votlenda á bújörðum, ekki síst á framræstum votlendum sem ekki eru nýtt til fóðurframleiðslu. Unnt væri að breyta stuðningsgreiðslum til landbúnaðar með markvissum hætti til að auðvelda nauðsynlega þróun.

Útreikningar ÓA og Jóns Guðmundssonar (2020) benda til þess að kolefnisspor dillkjöts – miðað við núverandi stuðla IPCC fyrir losun úr framræstum votlendum – geti numið hundruðum kg CO₂-ígilda á hvert kg dillkjöts ef stór hluti vetrarfóðurs er framleiddur á framræstu votlendi. Það samsvarar flugferð til Evrópu. Ef mikið er af framræstu landi sem ekki er nýtt til túnræktar á sauðfjárbúum og beitt er á haglendi sem er í slæmu ástandi verða gildin ansi „skrautleg“, jafnvel hærri en 1 000 kg CO₂-ígilda á hvert kíló kjöts, sem sýnir svo ekki verður um

villst að ekki ætti að framleiða dillkjöt þar sem losunin er mest og alls ekki þar sem hagar eru í slæmu ástandi. Þá er kolefnisspor lambkjötsframleiðslu einnig mjög hátt þar sem vetrarfóður er einvörðungu ræktað á framræstu landi og mikið af öðru landi er einnig framræst.

Á mörgum stöðum væri unnt að færa kolefnisbindingu til tekna í kolefnisbókhaldi dillkjöts. Sum sauðfjárbú nýta einvörðungu þurrlandi til heyframleiðslu eða beitar og sums staðar eru hagar það góðir að landið er að binda kolefni. Í þeim tilfellum gæti framleiðsla dillkjöts verið kolefnishlutlaus – binding í landi vegur þá upp á móti um 29 kg CO₂-ígilda losun á hvert kg kjöts þegar landið er ekki talið með. Mikilvægt er að neytendur hafi innsýn í losun sem fylgir framleiðslu vörunnar sem þeir kaupa – þeir ættu að eiga rétt á að fá slíkar upplýsingar. Munurinn á kolefnishlutlausri framleiðslu og kjöti sem hefur sótspor sem nemur hundruðum kg CO₂-ígilda á hvert kg kjöts er afgerandi!



Mynd 22.17. Beit nautgripa á framræstu votlendi. Losun úr framræstu votlendi er mikil og sums staðar er gengið ansi nærri landinu sem eykur væntanlega verulega á losun úr rofni yfirborðinu.

Nautakjöt

Mikil losun er úr framræstu votlendi sem notað er til fóðurframleiðslu og fyrir beit nautgripa (mynd 22.17). Telst sú losun til kolefnisspors við nautakjötsframleiðslu? Já, það gerir hún. Yfirleitt er minna land undir og oft einsleitara í samanburði við framleiðslu dilkakjöts. Niðurstaða fyrir losun í nautakjötsframleiðslu yrði af sambærilegri stærðargráðu og í framleiðslu dilkakjöts (að hágildunum sem fylgja stórum framræstum svæðum og illa förnu mólendi undanskildum).

Gildin eru afar breytileg eftir eðli túna og beitilands. Það þýðir að lægri mörk væru frá um 25 kg CO₂-ígilda losun þar sem einvörðungu þurrlandi og óframræst land er nytjað við framleiðsluna og án þess að gengið sé nærri landinu. Efri mörk væru við hundruð kg CO₂-ígilda losun þar sem framræst votlendi væru undirstaða framleiðslunnar. Þá myndi

það auka verulega á losunina ef gengið væri nærri beitilandi sem tæki þá að losa ennþá meira – en því miður eru dæmi um slíkt (mynd 22.17). Mikilvægt er að framleiðslugreinin fái aðgang að reiknivélum fyrir kolefnisspor mismunandi framleiðsluhátta nautakjöts þar sem eðli landsins og landnýting eru tekin með í reikninginn. Þá er mikilvægt að neytendur verði upplýstir um kolefnisspor kjötsins sem í boði er.

22.9.2. Hesturinn

Kolefnisspor hrossa er ákaflega misjafnt eftir því hvernig beit og óflun vetrarfóðurs er háttað. Ef hagaganga byggist á beit á framræstu votlendi er kolefnissporið ansi stórt (mynd 22.18). Sem dæmi má miða við 1–4 ha beitilands á framræstum mýrum fyrir hvern hest og losun upp á um 20,2 t CO₂ á ha (heildarlosun mínus náttúruleg losun – núverandi IPCC-gildi).



Mynd 22.18. Hross á beit á framræstu votlendi sem ekki er notað til heyframleiðslu nema að litlu leyti. Kolefnisspor hvers hests er mjög stórt þegar beitt er á framræst votlendi, jafnvel mælt í tugum tonna miðað við 1–4 ha á hvert hross. Hér er sauðfé einnig á beit svo að kolefnissporið dreifist einnig á dilkakjötið. Mikilvægt er að opna umræðu um kolefnisspor sem afleiðingu af því að eiga hesta.

Kolefnissporið verður þá 20 til 81 tonn (20 000–81 000 kg) CO₂-ígilda á hvert hross sem beitt er á slíkt land. Þessi losun er margföld losun fólksbifreiðar sem nýtir jarðefnaeldsneyti (2000–3000 kg CO₂-ígilda á ári). Mikil óvissa fylgir útreikningum af þessu tagi og breytileikinn er ansi mikill. En útreikningarnir benda sterklega til þess að losun vegna hrossaeignar geti verið gríðarlega há. Mikilvægt er að meta og mæla losun vegna hrossaeignar af meiri nákvæmni og taka síðan tillit til hennar við umsýslu á kolefnisbúskap landsins. Þá er þekking á þessari losun mikilvæg við mat á vistspori einstaklinga, m.a. þeirra sem stefna að því að kolefnisjafna neyslu.

22.10. Efnaveðrun í mold, efnarof og kolefnisbinding

Regnvatn inniheldur koltvísýring úr andrúmsloftinu sem myndar bíkarbónat (HCO₃⁻) í moldinni sem stuðlar að efnaveðrun í jarðvegi og skilar að lokum kolefnissamböndum til sjávar. Hluti þessa kolefnis binst sem kalk í setlögum á sjávarbotni fyrir tilstuðlan sjávarlífvera á borð við kalkþörungar, skeljar og kóralla. Úr verður hringrás kolefnis á milli andrúmslofts, moldar og hafs. Þessi hringrás er afar viðkvæm fyrir breytingum á sýrustigi sjávar, sem þegar hefur súrnað vegna losunar gróðurhúsalofttegunda. Við súrnun minnkar geta sjávar til að binda CO₂ úr andrúmsloftinu. Hringrásinni sem tengist efnaveðrun í mold voru gerð góð skil í riti Sigurðar Reynis Gíslasonar (2012) um kolefnishringrásina.

Sem fyrr segir í þessu riti er efnaveðrun á Íslandi afar hröð. Plagíóklas er ein helsta steindin í íslensku bergi. Hún inniheldur umtalsvert magn af kalsíum (Ca) og það gerir einnig illa kristallað gler

(oft 6–8% Ca, Bergrún Arna Óladóttir o.fl. 2011, Sveinn P. Jakobsson o.fl. 2008) og fleiri bergefni. Við efnaveðrun í moldinni losnar um Ca⁺⁺ og til verður bíkarbónat (HCO₃⁻) auk allófans og fleiri efnasambanda (sjá bók Sigurðar Reynis Gíslasonar 2012, bls. 61). Kalsíum og bíkarbónat berast með vatni til sjávar þar sem kalsíum myndar að lokum kalk (CaCO₃) – kolefnið hefur þá bundist í seti sjávar. Efnaveðrun í mold veldur því „efnarofi“ á uppleystum efnum frá mold til sjávar.

Efnarof er talið binda um 3,1 milljón tonna CO₂-ígilda á ári vegna efnaveðrunar á Íslandi (Sigurður Reynir Gíslason 2012). Þetta gildi er því af svipaðri stærðargráðu og losun vegna bruna jarðefnaeldsneytis, iðnaðar o.fl. í landinu (landið ekki talið með). Líkur eru á að þessi binding aukist með hlýnandi loftslagi því rannsóknir sýna að efnarofið eykst ört með hækkandi meðalhita (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2009). Þá er einnig ljóst að efnarofið er örara undir gróðri en á berangri – jafnvel 2–4 sinnum virkara. Efnarofið eykst einnig með aukinni ákomu vatns og afrennsli þess af landi (sjá Sigurð Reyni Gíslason 2012).

Binding vegna efnarofs er ekki talin fram í loftslagsbókhalda í samningi Sameinuðu þjóðanna, ekki frekar en losun vegna eldgosa, því talið er að maðurinn hafi lítil áhrif á hana, hún sé eins konar fasti. Það er hins vegar ekki alveg rétt því efnarofið eykst með gróðurhulu og kannski ekki síst þar sem úrkoma er mikil á láglandi (hlýrra) og auðveðruð glerkorn eru í jarðveginum. Það á við mjög víða á Íslandi.

Sá eiginleiki basalts að hvarfast við koltvísýring og mynda torleystar steindir er nýttur í verkefnum við jarðhitasvæði þar sem CO₂ er dælt niður í bergið. Þar má nefna svokallað CarbFix-verkefni á Hellisheiði.

22.11. Kolefnisjöfnun – álitaefni

Skógrækt, landgræðsla og vistheimt geta bundið umtalsvert kolefni í jarðveginum allt þar til jafnvægi er náð á milli moldar og umhverfis. Vitaskuld skiptir máli hver upphafsstaðan er – hve mikið er af kolefni í kerfinu þegar aðgerðir hefjast. Við uppgræðslu á auðnum er byrjað með mjög rýran forða kolefnis sem hægt er að auka verulega. Þegar endurheimt eru öflug vistkerfi safnast mikið af kolefni fyrir í moldinni. Auk þess safnast kolefni fyrir í gróðrinum, t.d. í trjám við skógrækt, en hér er athyglinni fyrst og fremst beint að moldinni. Endurheimt votlendis minnkar hins vegar losun CO₂ út í andrúmsloftið, og þar sem mjög mikill munur er á losun framræsts votlendis og þess sem er náttúrulegt er ávinningur af endurheimt votlendis mikill og áhrifin koma fljótt fram.

22.11.1. Tíminn

Það tekur mislangan tíma að binda það magn kolefnis sem lofað er við sölu kolefnisjöfnunar. Tré eru áratugi að binda hið tiltekna magn eða ná þeim vaxtarhraða sem dugir til að binda ákveðið magn á ári. Með öðrum orðum: það tekur langan tíma frá því að trjágróður vex úr grasi, jafnvel áratugi, þar til hann hefur náð að fjarlægja hið skaðlega CO₂ úr andrúmsloftinu, hvort heldur sem það er ákveðið magn á ári eða heildarmagn – þ.e. að veita þá þjónustu sem neytandinn keypti. Þetta á einnig við um bindingu í jarðvegi með landgræðslu ef seld er ákveðin binding sem tekur áratugi að ná. Því eru þessar aðferðir háðar því hversu mikil „þolinmæði“ er byggð inn í kerfið: hvað má líða langur tími þar til ákveðinni bindingu er náð. Öðru máli gegnir um bindingu þar sem skógur er þegar vaxinn upp eða landgræðsluaðgerðir þegar teknar að skila árangri – og þetta þarf að hafa í huga þegar höndlað er

með kolefnisjöfnun. Endurheimt votlendis minnkar hins vegar fljótt losun á gróðurhúsalofttegundum frá kerfinu, jafnvel á 1–3 vikum. Þá kemur einnig til álita til hvað langs tíma minnkuð losun er seld: minnkuð losun til eins árs (um 19 t CO₂-ígildi/ha á ári samkvæmt núverandi IPCC-stuðlum) eða t.d. til 10 ára (um 190 t CO₂-ígildi á 10 árum). Af þessu er ljóst að skilgreina þarf vel markmið aðgerða og tímunn sem það tekur að ná settum markmiðum, en það hefur m.a. áhrif á kostnað á hvert CO₂-ígildi sem er jafnað. Neytandi sem kaupir kolefnisjöfnun á netinu fær iðulega afar litlar upplýsingar um meginforsendur af þessu tagi.

22.11.2. Kostnaður

Aðgerðir sem binda kolefni eru misdýrar á hvert bundið kíló eða tonn CO₂-ígildis. Ekki er nóg að taka tillit til hraða bindingar á tiltekinni flatarmálseiningu (t CO₂-ígildi/ha á ári) heldur þarf einnig að skoða kostnað við bundin CO₂-ígildi og þá eftir tiltekinn tíma. Kostnaður við gróðursetningu á um eins ha skógi er umtalsverður en venjulega mun minni en við að hefja landgræðsluaðgerðir á hvern ha (t.d. 50–150 þúsund kr. eftir eðli inngripa; mat byggt á gögnum frá Landgræðslunni, 2020). Heildarmagn bundins kolefnis verður mun meira í stórvöxnum skógi samanborið við endurheimt mólendis á hvern hektara, svo dæmi sé tekið. Kostnaður við bundið t CO₂-ígildis virðist svipaður fyrir landgræðslu og skógrækt (ÓA og Jón Guðmundsson 2020). Útkoma úr slíkum samanburði fer að vísu nokkuð eftir því við hvaða tímaspönn er miðað (20 ár, 50 ár, 100 ár, 200 ár) og hvers kyns skógrækt og landgræðsla er stunduð.

Kostnaður við endurheimt votlendis er ákaflega misjafn en er að jafnaði minni en útplöntun á skógarplöntum á jafnstóru svæði. Minnkuð losun í votlendinu (ábatinn) er meiri en í skógrækt og landgræðslu að öllu jöfnu



Mynd 22.19. Sjálfræðsla birkis á svæði þar sem áður var líklega mikil losun CO₂ úr ógrónum moldum og melum. Endurheimt birkiskóga er hagkvæm leið til að binda kolefni og felur jafnframt í sér mikinn umhverfisávinning, sem er ekki síður mikilvægt. Myndin er tekin á Þórsmerkursvæðinu árið 2022.

á hvern hektara og því er kostnaður á hvert kolefnisjafnað tonn CO₂-ígilda yfirleitt lægri fyrir votlendi, auk þess sem ábatinn næst strax en getur tekið áratugi í landgræðslu eða skógrækt.

Friðun samfelldra svæða fyrir búfjarbeit með uppsöfnun á kolefni í mold getur á tíðum verið ódýrasta og hagkvæmasta aðgerðin á mælikvarða kostnaðar í krónum á bundið tonn CO₂-ígildis ásamt endurheimt birkiskóga þar sem sjálfræðsla er hluti aðgerða (mynd 22.19). Slíkar aðgerðir eru ekki einungis hagkvæmar heldur fylgir þeim mikill umhverfisávinningur, sem er ekki síður mikilvægt, rétt eins og landgræðslu og skógrækt! Gera þarf ráð fyrir að taka kostnað vegna eftirfylgni til að aðgerðirnar heppnist með í reikninginn, sé aðgerðum sem þessum beitt til kolefnisjöfnunar.

22.11.3. Umhverfisáhrif kolefnisbindingar

Margar þeirra aðgerða sem notaðar eru til að binda kolefni hafa sannarlega umhverfislegan ávinning í för með sér – meiri frjósemi moldar, líffjölbreytileika og í sumum tilfellum endurheimt landgæða eftir vistkerfishrun (Ása L. Aradóttir 2009), sbr. endurheimt birkiskógarins í Þórsmerk (mynd 22.19). Mikilvægt er að aðgerðir til kolefnisjöfnunar valdi ekki umhverfisskaða að öðru leyti – það stoðar ekki að leysa eitt umhverfisvandamál með því að búa til annað! Slíkt hefur verið nefnt rangsnúin aðferðafræði (e. perverse methods). Alþjóðlegar rannsóknir sýna að rangsnúnum aðferðum og hvötum hefur iðulega verið beitt í nafni kolefnisbindingar (Jackson o.fl. 2005, Lindenmayer o.fl. 2012).



Mynd 22.20. Lúpína við línuveginn á Uxahryggjum. Um er að ræða umdeilda aðferð við uppgræðslu. Kostirnir eru fremur litlir og héðan mun hún dreifa sér um ógróið land., Útkoman er þó umdeilanleg og getur haft neikvæð umhverfisleg áhrif. Einnig er hugsanlegt að svæði sem þessi taki að losa N₂O vegna niturofauðgi og þá er loftslagsávinningur enginn.

Hvatarnir geta m.a. lotið að styrkja-kerfum, niðurgreiðslum, skattaívilnunum, stefnumótun stjórnvalda, og geta einnig verið beinar aðgerðir til kolefnisbindingar eða aðgerðir sem hafa óbein áhrif á flæði gróðurhúsalofttegunda. Í samningi Sameinuðu þjóðanna um líffræðilega fjölbreytni er beinlínis mælt gegn aðferðum til kolefnisbindingar til að draga úr hlýnun lofthjúpsins ef þær eru skaðlegar fyrir umhverfið að öðru leyti. Hér má sérstaklega nefna notkun ágengra plöntutegunda og einræktun í skógrækt (e. monoculture), sem er ekki talin réttlæt看anleg aðferðafræði til kolefnisjöfnunar (mynd 22.20).

Einræktun og notkun ágengra trjátegunda gengur einnig gegn Heims-markmiðum Sameinuðu þjóðanna (e. Sustainable Development Goals) sbr. viðamikla úttekt frá 2019 (IPBES 2019). Alþjóðlegur vísindahópur á vegum Evrópusambandsins varaði við skógrækt þar sem notaðar væru hraðvaxta tegundir og einrækt vegna neikvæðra umhverfisáhrifa, m.a. fyrir vatnshag, líffjölbreytileika, alvarlegri afleiðingar skógarelda og þurrka og hugsanlega breytingu á frjósemi og samsetningu

jarðvegs (Jackson o.fl. 2005). Samskonar ályktun var birt í skýrslu IPBES (2019), vísindaarms samningsins um verndun líffræðilegrar fjölbreytni (sjá einnig Wang og Cao 2011). Þessi álitamál hafa komið upp hérlandis, m.a. í tengslum við gerð Skógræktaráætlunar 2022.

Stórfelld landgræðsla og endurheimt vistkerfa þurfa að miða að endurheimt fjölbreyttra búsvæða. T.d. má ekki ganga of nærri opnu gróðurlendi sem er mikilvægt búsvæði vaðfugla (Tómas Grétar Gunnarsson 2020), sem er áhyggjuefni þegar kemur að áætlunum um stórfellda nytjaskógrækt á Íslandi (Aldís Erna Pálsdóttir o.fl. 2022). Þá er rétt að hafa í huga að endurheimt á stórum samfelldum svæðum gæti m.a. haft endurheimt votlendissvæða í för með sér, sem eykur fjölbreytni búsvæða þar sem nú eru auðnir auk annarra mikilvægra búsvæða fugla. Markmiðssetning, góður undirbúningur og vönduð eftirfylgni eru nauðsynlegir þættir fyrir aðgerðir af þessu tagi.

22.12. Kolefnisbinding í skógrækt og landgræðslu

22.12.1. Núverandi binding

Unnt er að binda mikið magn kolefnis með landgræðslu aðgerðum og skógrækt. Bindistuðlar á hverja flatarmálseiningu eru háir fyrir skógrækt, allt frá um 3 t CO₂-ígilda/ha á ári upp í >20 t CO₂-ígilda/ha á ári í hraðvaxta alaskaasparteigum. Meðaltal fyrir sitkagreni er 8,3 t CO₂-ígildi/ha, um 7 t CO₂-ígildi/ha fyrir stafafuru (sbr. grein Arnórs Snorrasonar og Sigríðar Júlíu Brynleifsdóttur 2018), en lægri stuðlar eru gefnir upp fyrir birki. Viðamiklar rannsóknir hafa verið gerðar á bindingu í skógrækt, sem og kolefnisflæði í skógum, m.a. hér á landi (Brynhildur Bjarnadóttir o.fl.

2007, 2009, Valentini o.fl. 2000). Með skógrækt er fyrst og fremst verið að binda kolefni í viði sem er ekki til umræðu að öðru leyti í þessu riti en er getið hér til samanburðar. Þó er skógrækt einnig stunduð á lítt grónu landi og þá verður binding í mold sambærileg og í landgræðslu auk bindingar í viði.

Endurheimt vistkerfa í slæmu ástandi safnar kolefni bæði í gróðri og jarðvegi. Hér er bindingin lægri á hverja flatar- málseiningu en yfirleitt er unnið með mun stærri svæði í einu samanborið við skógrækt. Lítum fyrst til landgræðslu á illa grónu landi. Rannsóknir sem gerðar voru um síðustu aldamót á misgömlum rannsóknasvæðum með samanburði við óuppgrædd svæði á sömu slóðum gáfu til kynna bindihraða sem var yfirleitt nálægt 0,06 kg C/m² á ári, eða 2,2 t CO₂-ígilda/ha á ári (ÓA o.fl. 2000, 2002).

Landgræðslan notar gildið 0,051 kg C/ m² á ári fyrir landgræðslu við skýrslu- gjöf til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna, sem einnig byggist á mæl- ingum Landgræðslunnar sem ekki hafa verið birtar ennþá. Þessi stuðull samsvarar 1,9 CO₂-ígildum á ha á ári (fyrir árið 2017; Keller o.fl. 2020, bls. 147), en einnig hefur stuðullinn 2,1 t CO₂-ígildi á ári verið notaður og er þá aukning í gróðri tekin með.

Landgræðsla og skógrækt skila nú tæplega 1 milljón t CO₂-ígilda á ári í bindingu kolefnis, sem er afar mikilsvert og gefur áheiti um hvað unnt væri að gera með aukinni áherslu á líffræðilegar aðferðir við bindingu kolefnis.

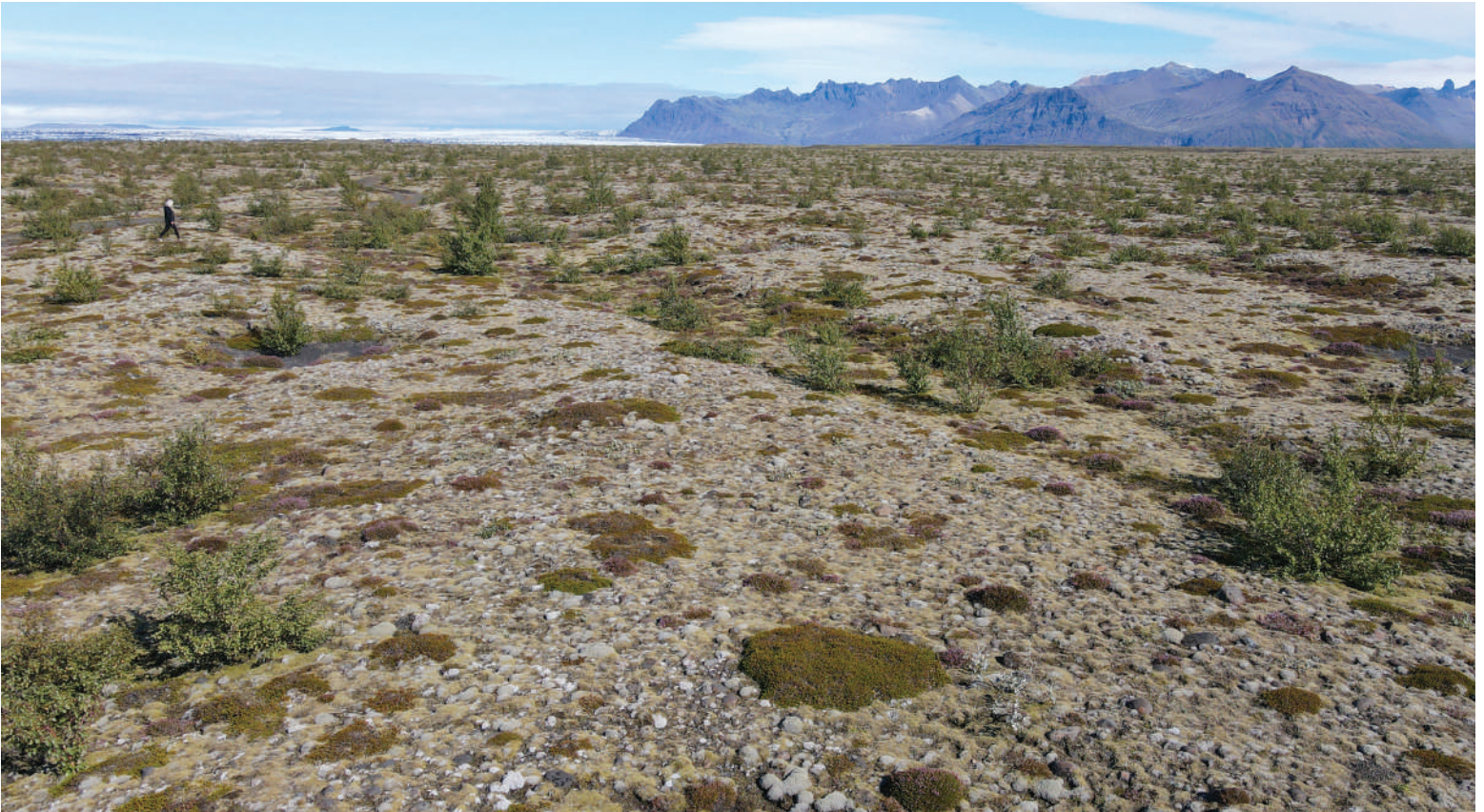
22.12.2. Breytt landnýting og vistheimt á stórum samfelldum svæðum

Það hefur legið fyrir lengi að stór svæði landsins eru í bágbornu ástandi, sum illa gróin þrátt fyrir að næg úrkoma og hlý sumur gefi tilefni til annars. Þetta á m.a. við um heilu afréttina, svo sem Biskupstungnaafrétt (mynd 22.21), Landmannafrétt og Rangárvallafrétt, svo dæmi séu tekin af Suðurlandi. Þá hefur kolefnisforði lækkað verulega í mörgum þurrlendisvistkerfum vegna langvarandi nýtingar og líklegt er að losun slíkra kerfa nemi nú um 1–8 milljónum t CO₂-ígilda á ári, eins og áður var rætt um. Mikilvægt er að leggja aukna áherslu á að stöðva þessa losun og auka bindingu í illa förnum vistkerfum.

Þörf er á nýrri sýn á nýtingu lands í slæmu ástandi. Fyrsta skrefið er að viðurkenna vandann og átta sig á því að hagaðilar sem láta sig varða um nýtingu stórra afréttarsvæða eru ekki einvörðungu sauðfjárbændur sem reka á fjall. Bætt



Mynd 22.21. Illa farið afréttarsvæði á Suðurlandi. Biskupstungnaafréttur er ennþá nýttur til beitar (árið 2022). Hér væri unnt að binda gríðarlega mikið kolefni með hagkvæmum hætti með vistheimtarverkefnum. Svæðið er þjóðlenda og nýting þess, sem og endurheimt landgæða, varðar samfélagið í heild – alls ekki einvörðungu þá sem nýta svæðið nú til beitar.



Mynd 22.22. Birkiskógur sem vex upp á Skeiðarársandi er dæmi um aukna kolefnisbindingu á landslagsskala. Manneskjan til vinstri er til viðmiðunar en myndin er tekin í um 15 m hæð. Mjög öflugar fræuppsprettur innan þjóðgarðsins í Skaftafelli valda því að nægt fræregn fellur á stóru svæði. Framvindan er framarlega á kúrfunni fyrir framvindu kerfisins, en vænta má þess að hraðinn aukist stigvaxandi eftir því sem þau tré sem hér sjást fara að dreifa meira af fræi um nágrennið. Þarna er kominn vísir að einum víðfeðmasta skógi landsins. Myndin er tekin árið 2020.

ástand landsins, vistheimt og fjölbætt nýting á borð við bindingu kolefnis ættu að verða meginmarkmið nýtingar þessara svæða. Slík sýn er mjög í anda alþjóðlegrar þróunar og er fullkomlega tímabær á áratug Sameinuðu þjóðanna um vistheimt (e. ecological restoration, áratugurinn 2021–2030).

Umfangsmikil vistheimtarverkefni geta haft ómældan umhverfisávinning og jákvæð áhrif á samfélög í dreifbýli. En hverju geta verkefni af þessu tagi skilað í kolefnisbindingu? Áður var fjallað um að binding í jarðvegi landgræðslusvæða væri af stærðargráðunni 0,051 kg C/m² í mold á ári sem samsvarar 1,9 t CO₂-ígilda á ha á ári, sem er bindistuðull sem notaður er við loftslagsbókhald landsins (Keller o.fl. 2020).

En nú er rétt að lyfta mælikvarðanum upp á stærri landsvæði, þ.e. á hvern ferkílómetra, og þá verður gildið 190 t CO₂-ígilda á km² á ári og binding í gróðri

er þó ekki meðtalin. Hér er hugsunin sú að klæða landið birkiskógi (þó með opnum graslendissvæðum og votlendum þar sem við á). Meðaltalsstuðlar í ofanjarðarvexti birkis hafa verið tilgreindir sem 3–4 t CO₂-ígilda/ha á ári (Arnór Snorrason og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir 2018), sem nemur 300–400 t CO₂-ígilda á hvern ferkílómetra á ári.

Heildarbinding í gróðri og mold er því 490–590 CO₂-ígildi á km² á ári. Vistheimt á 1 000 km² afréttarsvæði getur bundið 490–590 þúsund tonn CO₂-ígilda á ári í mold og gróðri en 190 000 tonn CO₂-ígilda á ári í moldinni einni saman þegar binding er hafin á öllu svæðinu. Það markmið næðist í hæfilegum áföngum eftir því sem landgræðslustarfi miðaði áfram. Sum illa farin svæði tækju þegar að binda mikið kolefni við friðun fyrir sauðfjárbreit. Mikilvægt er að fylgjast með breytingum og mæla þær þegar frá upphafi aðgerða.



Mynd 22.23. Vistheimt í Þórsmörk. Svæðið sem sést á myndinni var að mestu orðið skóglaut áður en Mörkin var friðuð. Sums staðar var sáð og borið á moldir, víðistíklum stungið niður á nokkrum svæðum o.fl., en inngrip voru þó fremur takmörkuð miðað við heildarstærð svæðisins. Þróunin tók kipp eftir að friðun svæðisins fyrir beit var aukin með beitarfriðun Almenninga um 1990 (Hreinn Óskarsson, munnleg heimild). Myndin er tekin árið 2020.

22.13. Lokaorð

Andrúmsloft jarðar fer hlýnandi og því fylgir vá. Nauðsynlegt er að þjóðir heimsins bregðist við af fullum þunga með því að draga úr losun og binda CO₂ eftir því sem tækifæri gefast. Ísland er í einstakri stöðu hvað þetta varðar. Endurheimt vistkerfa er meðal mikilvægustu aðgerðanna sem unnt er að hagnýta til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og binda þær. Jafnframt þarf að stíga löngu tímabær skref til að laga beitarnýtingu að landgæðum: kolefnisspor beitar á illa förnu landi er „stjarnfræðilega“ þungt. Landið er langsamlega stærsti losunarpátturinn á Íslandi og þar bjóðast líka möguleikar til að ná árangri. Um leið er stuðlað að endurheimt landgæða – komandi kynslóðum til hagsbóta.

Bætt landnýting getur bundið ókjörin öll af kolefni í vistkerfum án mikils tilkostnaðar sem iðulega væri hægt að ná fram með nauðsynlegum breytingum á stuðningskerfi þjóðarinnar við landbúnað. Áherslur stuðningsins gætu í auknum mæli miðast við bindingu og að minnka losun gróðurhúsalofttegunda og styðja við vistheimt. Hér var lögð áhersla á að forðast neikvæð umhverfisáhrif vegna aðgerða sem ætlað er að stuðla að kolefnisjöfnun. Með því að draga úr bruna jarðefnaeldsneytis ásamt markvissum aðgerðum til að endurheimta votlendi og minnka losun gróðurhúsalofttegunda frá þurrlendi með bættri landnýtingu – og með aukinni skógrækt og vistheimt á landslagskala (þúsundir km²) – má fara langt á þeirri braut að gera Ísland að kolefnis-hlutlausri þjóð. Til mikils er að vinna.

Heimildir

Rétt er að benda á tvö íslensk rit sem eru gott ítarefni fyrir þá sem vilja kynna sér kolefnishringrás og gróðurhúsaáhrif. Sigurður Reynir Gíslason gaf út bók árið 2012 sem nefnist *Kolefnishringrásin* þar sem m.a. er fjallað um losun gróðurhúsalofttegunda á Íslandi og áhrif efnaveðrunar og annarra jarðfræðilegra þátta á hringrásina. Ólífrænt kolefni fær talsvert rými í bókinni, en þar er bæði litið til forsögulegs tíma og nútíðar. Þá er bók Halldórs Björnssonar (2008), *Gróðurhúsaáhrif og loftslagsbreytingar*, mikilvæg fyrir þá sem vilja kynna sér hvernig andrúmsloftið fer hlýnandi. Hluti efnis þessa kafla var birtur áður í riti LbhÍ nr. 133, *Loftslag, kolefni og mold* (ÓA og Jón Guðmundsson 2020).

Arnór Snorrason og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir 2018. Áhrif fjórföldunar nýskógræktar á Íslandi. *Skógræktarritið* 2018:36–47.

Aldís Erna Pálsdóttir, J.A. Gill, J.A. Alves, Snæbjörn Pálsson, V. Méndez, H. Ewing og Tómas G. Gunnarsson 2022. Subarctic afforestation: effects of forest plantations on ground-nesting birds in lowland Iceland. *Journal of Applied Ecology* doi:10.1111/1365-2664.14238

Ása L. Aradóttir 2009. Landgræðsla, líffræðileg fjölbreytni og náttúruvernd. *Náttúrufræðingurinn* 78:21–28.

Áslaug Helgadóttir, Emma Eyþórsdóttir og Torfi Jóhannesson 2013. Agriculture in Iceland – A grassland based production. *Grassland Science in Europe* 18:30–43.

Bergrún Arna Óladóttir, Olgeir Sigmarsson, Guðrún Larsen og J-L. Devidal 2011. Provenance of basaltic tephra from Vatnajökull subglacial volcanoes, Iceland, as determined by major- and trace-element analyses. *The Holocene* 21:1037–1048.

Bartoli, F. og G. Burtin 2007. Organo-mineral clay and physical properties in COST-622 European volcanic soils. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops, E. García-Rodeja (ritstj.), *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer, Heidelberg, Þýskaland. Bls. 469–491.

Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D. Sigurðsson og A. Lindroth 2007. Estimate of annual carbon balance of a young Siberian larch (*Larix sibirica*) plantation in Iceland. *Chemical and Physical Meteorology* 59:891–899.

Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D. Sigurðsson og A. Lindroth 2009. A young afforestation area in Iceland was a moderate sink to CO₂ only a decade after scarification and establishment. *Biogeosciences* 6:2895–2906.

Christensen, T.R., A. Ekberg, L. Ström, M. Mastepanov, N. Panikov, M. Öquist, B.H. Svensson, H. Nykänen, P.J. Martikainen og Hlynur Óskarsson 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters* 30:1414, doi:10.1029/2002GL016848.

Crump, J. (ritstj.) 2017. Smoke on Water – Countering Global Threats From Peatland Loss and Degradation. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi, Kenya. www.grida.no.

Environice 2017. Losun gróðurhúsalofttegunda frá sauðfjárbúum á Íslandi og aðgerðir til að draga úr losun. Unnið fyrir Landsamtök sauðfjárbænda. Birna Sigrún Hallsdóttir og Stefán Gíslason, Umhverfisráðgjöf Íslands ehf/ Environice, Borgarnes.

Fanney Ósk Gísladóttir, Jón Guðmundsson og Sunna Áskelsdóttir 2010. Mapping and density analyses of drainage ditches in Iceland. Mapping and monitoring of Nordic Vegetation and landscapes, Conference proceedings. Í: B. Anders, W. Dramstad, W.J. Fjellstad (ritstj.), *Viten fra Skog og landskap*. Norsk Institutt for Skog og Landskap, -1/10., Ás, Noregur. Bls. 1431:115.

FAO 2014. Towards climate-responsible peatlands management. Í: R.A.A. Biancalani (ritstj.), *Mitigation of Climate Change in Agriculture*. FAO, Róm, Ítalía. Bls. 497–540.

Guðrún Gísladóttir, Egill Erlendsson, R. Lal og J. Bigham 2010. Erosional effects on terrestrial resources over the last millennium in Reykjanes, southwest Iceland. *Quaternary Research* 73:20–32.

Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir 2017. A novel approach to estimate carbon loss from drained peatlands in Iceland. MS-ritgerð, Háskóli Íslands, Líf- og umhverfisvísindadeild, Reykjavík.

Halldór Björnsson 2008. Gróðurhúsalofttegundir og loftslagsbreytingar. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.

Hlynur Óskarsson 1998a. Icelandic Peatlands: Effects of draining on trace gas release. Doctoral dissertation, University of Georgia, Athens, Georgia, USA.

Hlynur Óskarsson 1998b. Framræsla votlendis á Vesturlandi. Í: Jón S. Ólafsson (ritstj.), *Íslensk votlendi. Verndun og nýting*. Háskólaútgáfan, Reykjavík. Bls. 121–129.

Hlynur Óskarsson, Ólafur Arnalds, Jón Guðmundsson og Grétar Guðbergsson 2004. Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion. *Catena* 56:225–238.

Inga Vala Gísladóttir 2010. Athugun á hentugleika WIV votlendisvísitölnunnar við íslenskar aðstæður. BSc-ritgerð, Umhverfiseild, Landbúnaðarháskóli Íslands.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Í: S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth og 22 fleiri (ritstj.), *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK og New York, USA.

IPCC 2014. 2013: Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Í: T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (ritstj.), *Wetlands*. IPCC, Genf, Sviss.

Jackson, R.B., E.G. Jobbágy, R. Avissar, S. Baidya Roy, D.J. Barrett, C.W. Cook, K.A. Farley, D.C. le Maitre, B.A. McCarl og B.C. Murray 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science* 310:1944–1947.

Jón Guðmundsson 2016. Greining á losun gróðurhúsalofttegunda frá íslenskum landbúnaði. Greinargerð unnin fyrir Umhverfis- og auðlindaráðuneytið. Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson 2014. Carbon dioxide emission from drained organic soils in West-Iceland. Proceedings of the international conference: Soil carbon sequestration for climate, food security and ecosystem services, European Commission, Joint Research Centre and the Icelandic Soil Conservation Service, Ispra, Italy. Bls. 155–159.

Keller, N., M. Stefani, Sigríður R. Einarsdóttir, Ásta K. Helgadóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson og Leone Tinganelli 2020. National Inventory Report 2020. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2018; Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, Umhverfisstofnun, Reykjavík.

- Lindenmayer, D.B., K.B. Hulvey, R.J. Hobbs, M. Colyvan, H. Possingham, W. Steffen, K. Wilson, K. Youngtob og P. Gibbons 2012. Avoiding bio-perversity from carbon sequestration solutions. *Conservation Letters* 5:28–36.
- Mitsch, W.J. og J.G. Gosselink 2007. *Wetlands*. 4. útg. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 23:3–21.
- Ólafur Arnalds 2015. *The Soils of Iceland*. Springer, Dordrecht, Holland.
- Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit Lbhí nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Ólafur Arnalds, Grétar Guðbergsson og Jón Guðmundsson 2000. Carbon sequestration and reclamation of severely degraded soils in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 13: 87–97.
- Ólafur Arnalds, Ása L. Aradóttir og Grétar Guðbergsson 2002. Organic carbon sequestration by restoration of degraded areas in Iceland. Í: J.M. Kimble, R. Lal o.fl. (ritstj.), *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. CRC Press, New York, USA. Bls. 267–280.
- Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Ósk Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. *Wetlands* 36:759–769.
- Rannveig Anna Guicharnaud 2002. Rúmþyngd í íslenskum jarðvegi. BS-ritgerð, Jarð- og landfræðiskor, Háskóli Íslands, Reykjavík.
- Ripoll-Bosch, R., I.J.M. de Boer, A. Bernues og T.V. Vellinga 2013. Accounting for multi-functionality of sheep farming in the carbon footprint of lamb: A comparison of three contrasting Mediterranean systems. *Agricultural Systems* 116:60–68.
- Ritter, E. 2007. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (*Betula pubescens*) and introduced larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Plant and Soil* 295:239–251.
- Sigurður Reynir Gíslason 2012. *Kolefnishringrásin*. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.
- Sigurður Reynir Gíslason, E.H. Oelkers, Eydís Sigurdís Eiríksdóttir, M.I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir O. Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P. Torssander og Niels Ö. Óskarsson 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth and Planetary Science Letters* 277: 231–222.
- Sólveig Ólafsdóttir 2013. Ástæður og áhrif framræslu í Mýrasýslu 1930–1990. BS-ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Umhverfisdeild. Hvanneyri.
- Sveinn P. Jakobsson, Kristján Jónasson og Ingvar A. Sigurðsson 2008. The three igneous rock series of Iceland. *Jökull* 58:117–138.
- Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova og S. Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23: GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.
- Tómas Grétar Gunnarsson 2020. Búsvæði og vernd íslenskra vaðfugla. *Náttúrufræðingurinn* 90:145–162.
- Valentini, R., G. Matteucci, A. Dolman, E. Schulze, C. Rebmann, E. Moors og 24 fleiri 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404:861–865.
- Wang, Y. og S. Cao 2011. Carbon sequestration may have negative impacts on ecosystem health. *Viewpoint. Environmental Science & Technology* 45:1759–1760.
- Zehetner, F. 2010. Does organic carbon sequestration in volcanic soils offset volcanic CO₂ emissions? *Quaternary Science Reviews* 29:1313–1316.
- Þóra Ellen Þórhallsdóttir, Jóhann Þórsson, Svafa Sigurðardóttir, Kristín Svavarsdóttir og Magnús H. Jóhannsson 1998. Röskun votlendis á Suðurlandi. Í: Jón S. Ólafsson (ritstj.), *Íslensk votlendi. Verndun og nýting*. Háskólaútgáfan, Reykjavík. Bls. 131–142.
- Þóroddur Sveinsson, Teitur Sævarsson, María Svavarsdóttir, Bergún Arna Óladóttir, Þorbjörg Helga Sigurðardóttir, Eiríkur Loftsson og Þórarinn Leifsson 2022. Langtímatap kolefnis í framræstu ræktarlandi. Rit Lbhí nr. 149. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.