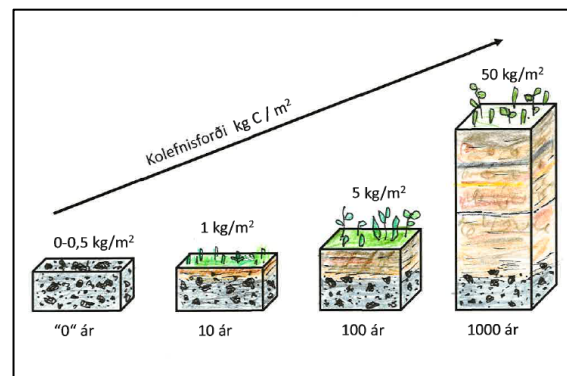
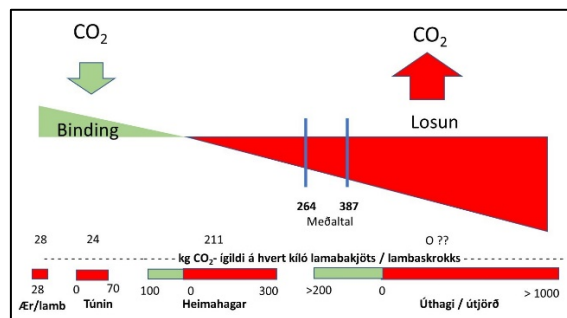
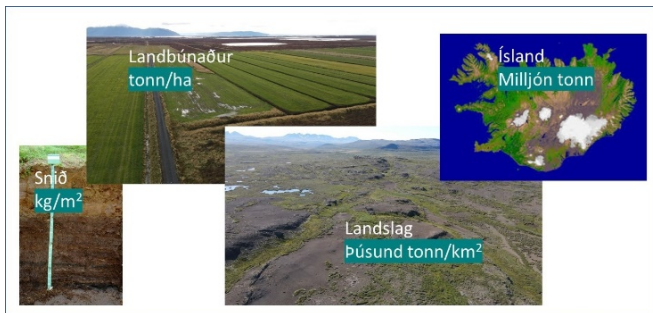


Loftslag, kolefni og mold

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson



Landbúnaðarháskóli Íslands, 2020.
Rit Lbhí nr. 133
ISSN 1670-5785
ISBN 978-9935-512-07-9

Myndir á forsíðu: Ólafur Arnalds

Efnisyfirlit

Efnisyfirlit	1
Loftslag, kolefni og mold	2
1. Moldin er miðlæg í kolefnishringrásinni	4
2. Gróðurhúsaáhrif – hvað er það?	5
3. Kolefni í jarðvegi.....	7
3.1. Moldin og aðrir hnattrænir geymar.....	7
3.2. Hvað er mikið kolefni í hverri „moldareiningu“?	8
3.3. Útreikningar á losun eða bindingu.....	9
4. Kolefni í íslenskum jarðvegsflokkum	11
4.1. Núverandi forði kolefnis	11
4.2. Hve mikið hefur tapast af kolefni úr Íslenskum vistkerfum?	13
4.3. Áfok og kolefnisuppsöfnun	16
4.4. Binding kolefnis í þurrlendismold við friðun gróins lands eða bætta landnýtingu.....	17
5. Framræsla votlendis – geigvænleg losun gróðurhúsalofttegunda	19
5.1. Votlendi.....	19
5.2. Óröskuð votlendi losa líka.....	22
5.3. Röskuð votlendi	23
5.4. Heildarlosun frá framræstum votlendum.....	23
5.5. Deilur um losun votlenda á Íslandi	25
6. Þurrlendi.....	26
7. Landnýting og kolefnisspor	27
7.1. Kolefnisspor dillakjöts	27
7.1.1. Almennt	27
7.1.2. Útreikningar.....	28
7.1.3. Gríðarlegur munur á kolefnisspori lambakjötsframleiðslu!	31
7.2. Kolefnisspor nautakjöts	32
7.3. Hesturinn	33
8. Efnaveðrun í mold, efnarof og kolefnisbinding.....	34
9. Kolefnisjöfnun – álitæfni	35
9.1. Tíminn	35
9.2. Kostnaður.....	36
9.3. Umhverfisáhrif kolefnisbindingar	37
10. Kolefnisbinding í skógrækt og landgræðslu	40
10.1. Núverandi binding	40
10.2. Breytt landnýting og vistheimt á stórum samfelldum svæðum	41
10.3. Peningar	43
11. Lokaorð.....	44
Heimildir.....	46

Loftslag, kolefni og mold

Stóra myndin

Losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum á Íslandi þegar landið er ekki meðtalið er um 5 milljón tonna CO₂-ígilda á ári (tafla 1). Losun gróðurhúsalofttegunda frá landi vegna nýtingar og lélegs ástands vistkerfa (votlendi og þurrlandi) er meiri en öll önnur losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum á Íslandi, líklega yfir 10 milljón CO₂-ígilda á ári. Tap á kolefni úr vistkerfum landsins frá landnámi telst í þúsundum milljóna tonna CO₂-ígilda. Eitt mikilvægasta verkefnið sem þjóðin hefur tekist á hendur er að minnka losun gróðurhúsalofttegunda vegna athafna manna, en ekki síður að minnka losun frá landi og binda gróðurhúsalofttegundir í vistkerfum. Fjallað er nánar um alla þessa þætti í ritinu, en gott er að hafa samhengi og stærðargráður í huga við lestur ritsins (Tafla 1).

Tafla 1. Yfirlit um losun og binding gróðurhúsalofttegunda á Íslandi. Losun sem venjulega er gefin upp er um 5 milljón tonna CO₂-ígilda, en þá er önnur losun ekki talin.

Aðgerð - ferlar	Milljón tonn CO ₂ -ígildi á ári	Athugasemdir
Losun án landnýtingar (samgöngur, iðnaður o.s.frv.)	Um 5	Losun talin fram af Íslandi til Loftslagssamnings SP, landið ekki meðtalið
Losun frá votlendum, óframræstum og framræstum	Um 10	Hægt að minnka frá framræstum votlendum með endurheimt
Losun frá þurrlandi (hnignun vistkerfa)	1 – 8	Getur verið >8 milljón tonn samkvæmt sumum sviðsmyndum
Binding í mold vegna áfoks – nú	0,5 – 1	Háð beitarálagi
Binding í mold við beitarfriðun – nú	0,2 – 1	Óljóst. Háð því hve mikið friðað
Binding við bættu landnýtingu – nú	0,5 – 1	Óljóst. M.a. minnkuð beit
Binding í landgræðslu – nú	0,61	Framtal til Loftslagssamnings SP
Binding í skógrækt – nú	0,35	Framtal til Loftslagssamnings SP
Binding vegna veðrunar og efnarofs	3,1	Endar í hafi. Ekki talið fram til SP Takmörkuð áhrif mannsins
Möguleg binding í mold við vistheimt á landslagsskala	2 – 10	Háð áræðni við friðun útjarðar í slæmu ástandi og inngrípum



Mynd 1. Land í tötrum í Sandvatnshlíðum á Biskupstungnaafrétti. Þetta land var áður skógivaxið fram eftir öldum. Gróðureyja til hægri er til vitnis um horfna landkosti – maður vinstra megin við barðið gefur mælikvarða. Jaðrar barðsins hafa verið græddir upp. Tap á 1-2 m þykku jarðvegslagi af hundruðum km² þannig að auðnin ein situr eftir er ótrúleg gjöreyðing sem á sér fáar hliðstæður á jörðinni. Hér hafa glatast ókjörin af kolefni, sem má áætla að samsvari til um 50 000 tonnum C á km² (um 180 000 tonn CO₂ á hvern ferkílómetra). Tapið reiknað á hundruð ferkílómetra er af geigvænlegri stærðargráðu (tugir milljóna tonna CO₂-ígilda). Myndin er tekin árið 2020.

1. Moldin er miðlæg í kolefnishringrásinni

Vaxandi álag er á vistkerfi hnattarins með fólksfjölgun og aukinni neyslu. Meðal mikilvægustu áskorana mannkynsins er að bæta ástand lands og minnka styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Hrun og ástand vistkerfa og hlýnun andrúmsloftsins eru nátengd fyrirbrigði: stór hluti þeirra gróðurhúsalofttegunda sem losaðar eru út í andrúmsloftið á rætur að rekja til hnignunar vistkerfa og þá einkum moldarinnar (mynd 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 á landi og þar er hægt að binda aftur mikið kolefni.

Í þessu riti verður einkum fjallað um kolefni (C) og koltvísýring (CO₂) og ferð kolefnis á milli vistkerfa og andrúmslofts. Kolefnið er á ýmsum formum í lífríkinu, í moldinni og síðan einnig í andrúmsloftinu sem CO₂ og CH₄. Aðrar gróðurhúsalofttegundir en koltvísýringur koma við sögu er varðar hlýnun andrúmsloftsins, svo sem tvínituroxíð (hláturgas - N₂O), metan (CH₄), óson (O₃), og brennisteins-hexaflúoríð (SF₆) auk vatnsgufu (H₂O) (sjá Halldór Björnsson 2008). Umfjöllun um hringrás kolefnis hefur einatt verið bundin við losun gróðurhúsalofttegunda vegna bruna á jarðefnaeldsneyti og leiðir til að draga úr þeirri losun – sem er skiljanlegt. Þessi áhersla gerir það þó að verkum mikilvægi vistkerfa í þessu samhengi er iðulega vanmetið. Verulega skortir á almenna þekkingu á mikilvægi vistkerfa fyrir kolefnishringrásina og það endurspeglast í umræðu um loftslag og umhverfismál.

Rétt er að benda á tvö íslensk rit hér í upphafi máls 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, áhrif efna-veðrunar og annarra jarðfræðilegra þátta á hringrásina. Ólífrænt kolefni fær talsvert rými í bókinni þar er bæði litið til forsögulegs tíma sem og nútíðar. Þá er bók Halldórs Björnssonar (2008), *Gróðurhúsaáhrif og loftslagsbreytingar* mikilvæg þeim sem vilja kynna sér hvernig andrúmsloftið fer hlýnandi. Halldór rekur áhrif margra þátta sem móta flókið samspil jarðar, andrúmslofts og loftslagsbreytinga – þar sem vatnsgufa, ský, ís, hafstraumar o.fl. þættir koma við sögu. Hér er hringrás lífræns kolefnis og þáttur moldarinnar í henni áhersluatriðið. En rétt er að árétta að margir þættir aðrir en þeir sem hér eru ræddir hafa áhrif á styrk koltvísýrings, ekki síst upptaka og binding kolefnisefnasambanda í hafinu.

Ísland er aðili að Parísarsamkomulagi Loftslagssamningsins, en á þeim vettvangi hefur þjóðin gengist undir kvaðir og sett sér markmið til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda. Hér er ekki verið að fjalla um þessar alþjóðlegu skuldbindingar heldur er athyglin á landvistkerfi og kolefnissporinu sem getur fylgt nýtingu þeirra. Rannsóknir á kolefnishringrásinni í landvistkerfum eru tiltölulega nýjar af nálinni bæði hér og annarsstaðar. Margt er því enn ókannað, bæði hvað varðar ferli losunar og bindingar og áhrif mismunandi umhverfisþátta á ferlin. Eðli málsins samkvæmt verður því nokkuð um að ályktanir séu byggðar á áætluðum gildum fyrir kolefnishringrásina. Vonandi verða rannsóknir á þessum þætti vistkerfa landsins margfaldaðar á næstu árum, því það er nauðsynleg forsenda fyrir skynsamlegum ákvörðunum um aðgerðir til að sporna við loftslagsvánni.

2. Gróðurhúsaáhrif – hvað er það?

Sólin skilar feykilega mikilli orku til jarðar sem gróður nýtir brot af með ljóstillífun og orkunni er síðan miðlað um vistkerfin, á formi lífrænna sameinda. Gjaldmiðill orku vistkerfanna er kolefni á mismunandi formi. Orka sólar er notuð til að afoxa koltvísýring (CO_2) með ljóstillífun plantna sem vistkerfin nota síðan – kolefnið oxast þegar orkan er notuð; það „brennur“ og skilar CO_2 aftur til andrúmsloftsins. Þetta ferli er algjörlega sambærilegt við bruna á trjáviði í eldi og bruna jarðefnaeldsneytis.

Orka sólar nálgast 1000 vött á hvern fermetra (W/m^2) skíni hún lóðrétt ofan á flötinn, en er meiri efst í lofthjúpinum ($1370 \text{ W}/\text{m}^2$). Inngeislunin á flatareiningu minnkar ef sólskínið er ekki lóðrétt, auk þess sem áhrif lofthjúpsins á geislunina eru afar misjöfn (sjá Halldór Björnsson 2008). Þetta er eigi að síður ótrúlega mikil inngeislun – sólarorka er sannarlega nægjanleg til að mæta stórum hluta orkuþarfar jarðarbúa, væri hún nýtt sem slík. Inngeislunin hitar yfirborð jarðar og hluti hennar endurkastast á margvíslegum bylgjulengdum eftir eðli yfirborðsins m.a. á innrauðu sviði ljósgeislunar.

Gróðurhúsalofttegundir gleypa orku á þessum innrauðu bylgjulengdum og minna sleppur því út og þar með tekur lofthjúpurinn að hitna. Þess má geta að þessi staðreynd er notuð við mælingar og á magni kolefnis í jarðvegssýnum; þau eru brennd og CO_2 sem losnar er ákvarðað með innrauðum geislum. Það er eðli CO_2 og CH_4 að gleypa innrauða geisla og við það eykst hreyfiorka þessara sameinda – þær hitna. Endurkast gróðurs á inngeislun að sumri er misjafnt er varðar magn og bylgjulengdir, en þar þarf einnig að taka upptöku kolefnis í gróður og jarðveg með í reikninginn þegar loftslagsáhrif yfirborðs eru metin. Svart yfirborð auðna á Íslandi endurkasta minna af ljósgeislum en ljósleitt yfirborð og við það hitnar yfirborðið og geisar meiru af innrauðum geislum en ljósleitt yfirborð. Styrkur gróðurhúsalofttegunda sem gleypa þessa hitaútgislun jarðar hefur farið hraðvaxandi undanfarna áratugi. Þegar jafnvægið á milli losunar gróðurhúsalofttegunda og bindingar þeirra á yfirborðinu raskast breytist loftslagið: andrúmsloft jarðar er að hitna.

Kolefni, CO₂ og flatarmál

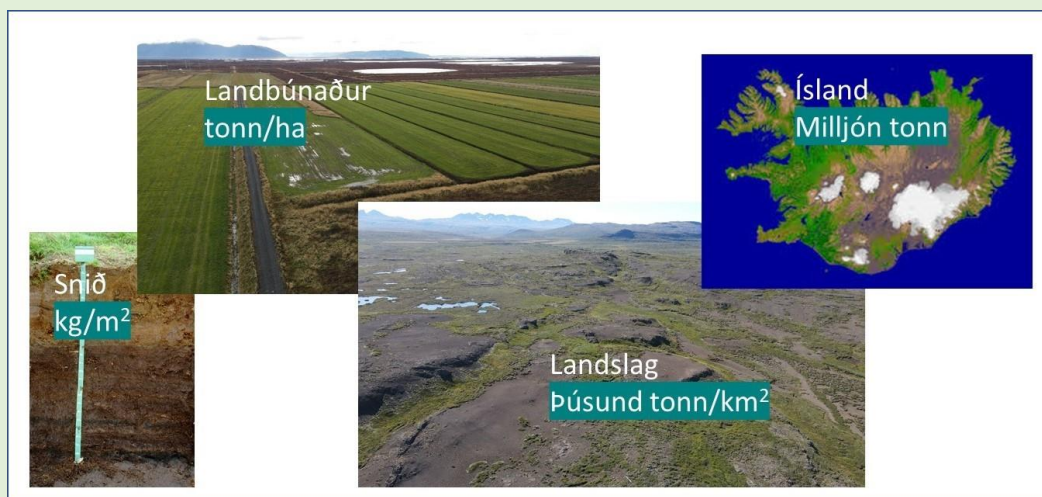
C eða CO₂. Það er eðlilegt að loftslagsvísindin miði við koltvísýring (CO₂) því það er það efni umfram önnur sem veldur hlýnuninni. En í öðrum náttúruvísindum er algengt að nota frumefnaformið kolefni (C), enda getur C verið í afar mörgum myndum eða efnasamböndum í hringrás kolefnis og orku.

Til þess að umbreyta 1 g af kolefni (C) yfir í g CO₂-ígildi er margfaldað með stuðlinum $44/12 = 3,667$. Hver CO₂ sameind inniheldur eitt C atóm (mólmassi = 12) og tvö O atóm (mólmassi 16). Mólmassi CO₂ er því =44. Hvert kíló kolefnis (C) sem losnar úr mold verður að 3,667 kílóum CO₂ ef það er brotið niður að fullu. Aðrar gróðurhúsa lofttegundir eins og CH₄ eru umreiknaðar í CO₂-ígildi út frá þeim áhrifum sem þau hafa til hlýnunar í andrúmsloftinu. Hlýnunar áhrif CH₄ eru 25-föld á við CO₂ og svarar 1 g af CH₄ því til 25 g CO₂-ígilda, þ.e.a.s. 1 g CH₄ hefur sömu áhrif og 25 g CO₂.

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

Einingar – flatarmál. Annað sem flækir oft umfjöllun um losun og bindingu gróðurhúsalofttegunda er hve misjafnar flatarmálseiningar eru notaðar í útreikningum. Vettvangsrannsóknir styðjast iðulega við fermetra (m²), t.d. kg kolefnis undir hverjum fermetra. Ferkílómetrar (km²) eru gjarnan notaðir þegar unnið er á landslagsskala. Landbúnaðarvísindi hallast mest að hektaranum (ha) sem einingu, enda er t.d. áburðargjöf og uppskera yfirleitt mæld á hvern hektara. Þessi eining hentar vel til að fjalla um landstærðir einstakra búa og ræktarland. Það eru 10 000 m² í hverju hektara og 100 hektarar í hverjum ferkílómetra.

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 um kolefni (C) eða koltvísýring (CO₂-ígildi) á landsvísu (einnig gefið sem 1000 kílótonn, þúsund kt).



Mynd 2. Mismunandi einingar fyrir kolefni (C) eða koltvísýring (CO₂) annars vegar og flatarmál lands hins vegar.

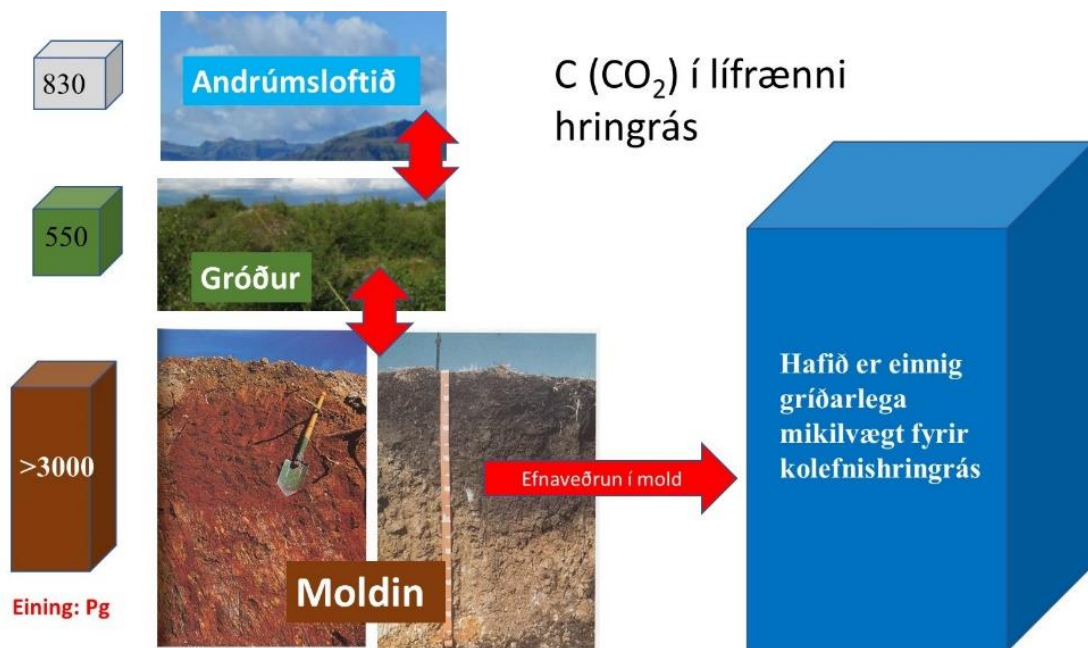
3. Kolefni í jarðvegi

3.1. Moldin og aðrir hnattrænir geymar

Lífræn efni taka þátt í sívirkri hringrás lífsins. Meginuppistaða lífrænu efnanna eru kolefnisefnasambönd. Heildarmagn kolefnis í hnattrænni (e. global) hringrás skiptist á nokkra megingeyma. Hafið er langsamlegast stærsti geymirinn með um 40 000 Pg (peta grömm, milljarðar tonna eða gígtatonn Gt), en jarðvegurinn kemur þar á eftir, með 1500 – 3500 Pg eftir því hver telur hverju sinni (Tafla 2.). Höfundar 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 í gróðri jarðar (450 - 650 Pg). Stærstu geymarnir eru þó í kalksteini (CaCO_3) sem fellur út í hafinu sem og í 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 það fellur út sem kalk (sem inniheldur C). Það á sérstaklega við hérlendis og er því gefið rými hér á eftir (sjá einnig Sigurð Reyni Gíslason 2012). Breytingar á kolefni í einum forða hafa alltaf í för með sér gagnstæða breytingu á öðrum forða, kolefni sem frumefni er hvorki að verða til né eyðast. Ætla mætti af umræðu um gróðurhúsalofttegundir að meira væri af kolefni í andrúmsloftinu eða þá í gróðri, miðað við moldina. En svo er alls ekki heldur þvert á móti. Moldin geymir meira kolefni en andrúmsloftið og gróður samanlagt.

Tafla 2. 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, Tala fyrir úthaf telur lífrænt set með).

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



Mynd 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 fyrir ofan).

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

Það er mikilvægt að þeir sem eru að huga að kolefnisjöfnuði, t.d. með kolefnisbindingu í landbúnaði, skógrækt eða landgræðslu, geti reiknað út magn kolefnis í jarðvegi. Hér er stuttur kafli til að auðvelda þeim sem vilja fóta sig í slíkum útreikningum. Magn kolefnis í jarðvegi undir hverjum fermetra er talið í kílóum kolefnis (kg C/m^2). Eyðimerkurjörð hefur fá kg C/m^2 en magn kolefnis í mójörð getur numið yfir 200 kg C/m^2 . Magn kolefnis í jarðvegi er afar breytilegt eftir dýpt. Í jarðvegsfræði er jarðveginum frá yfirborði niður á berggrunninn skipt í einstök lög sem hvert hefur sína eiginleika. Jarðvegssemi er þverskurður af jarðvegi frá yfirborði niður að berggrunni eða upprunaefni jarðvegsins. Í öðrum greinum þar sem fjallað er um kolefnisforða er oft stuðst við dýptarbil. Til að fá út heildarmagnið þarf að leggja saman magn kolefnis í hverju jarðvegslagi (dýptarbili) fyrir sig, því það getur verið mikill breytileiki innan hvers sniðs. Yfirleitt er mest af kolefni í efstu lögunum og stundum beinast útreikningar aðeins að yfirborðslögunum, t.d. efstu 30 cm. Niðurstöður mælinga á jarðvegskolefni eru yfirleitt gefnar sem %C þ.e.a.s. t C í 100 t þurrs jarðvegs. Til að reikna kolefnisforða á rúmmálseiningu er hlutfallsgildi kolefnis (% deilt með 100; gefur t C/t jarðvegs) margfaldað með rúmpýngd jarðvegsins ($\text{t jarðvegs/m}^3 \text{ jarðvegs}$) og niðurstaðan er þá tonn kolefnis í hverjum rúmmetra; $\text{t C/m}^3 \text{ jarðvegs}$. Síðan þarf að laga þá tölu að þykktinni. Ef lagið er t.d. 10 cm þykkt, þ.e. 0,1 metri, þá er niðurstaðan $\text{t C/m}^3 \text{ jarðvegs} \times 0,1 \text{ m jarðvegs} = \text{t C/m}^2 \text{ jarðvegs}$. Margfaldað er með 1000 til að breyta tonnum í kg. Dæmi: ef jarðvegslagið er 20 cm þykkt, rúmpýngdin $0,8 \text{ t/m}^3$ og hlutfall kolefnis 8% er heildarmagn kolefnis í kg/m^2 í þessu lagi:

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

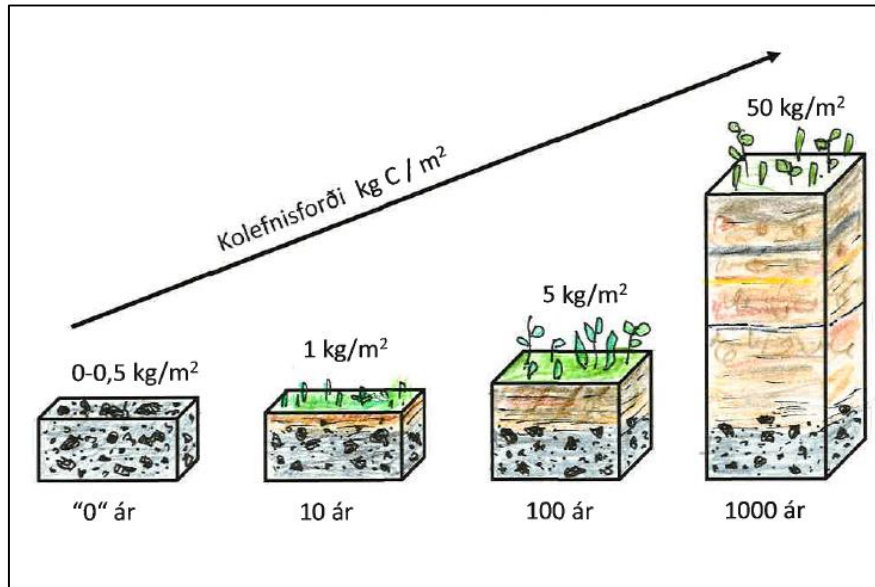
Hafa ber í huga að hér er miðað við moldarefni og því þarf að draga frá þyngd og rúmmál steina sem eru stærri en 2 mm í þvermál. Sé mikið af steinum í jarðveginum verða mælingar á kolefnisforða því tafsamari. Finna þarf rúmmál steinanna (margar aðferðir) og reikna síðan þyngd og magn kolefnis í því rými sem eftir er, það er hið „virka“ rými sem inniheldur kolefnið. Þannig fæst heildarmagn kolefnis fyrir hið tiltekna jarðvegsbil samkvæmt formúlunni hér fyrir ofan. Steinar eru einkum viðfangsefni slíkra útreikninga á illa grónu landi og skriðujarðvegi, en yfirleitt ekki í þurrlendisjarðvegi sem myndast í áfoksefnum (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 á tíðum er rúmpýngdin samt ekki þekkt, en með þekkingu á moldinni á hverju svæði fyrir sig, sem og tengslum rúmpýngdar og kolefnis, er iðulega hægt að áætla rúmpýngdina, enda þótt niðurstaðan verði ekki fullkomlega nákvæm. 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 kolefnisinnihaldi hvers svæðis.

3.3. Útreikningar á losun eða 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 á CO₂ með tækjabúnaði sem mælir breytingar á styrk CO₂, í lokuðu rými eða loftstreymi, en það er fremur dýrt og tímafrekt og þær þurfa að ná yfir langan tíma, helst nokkur ár, því breytileikinn er mikill. Slíkar mælingar eru engu 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 nýtt er á Íslandi í tengslum við Loftslagssamning Sameinuðu þjóðanna (Keller o.fl. 2019). Þar sem ráðist er í landgræðslu er hægt að fylgjast með hversu hratt kolefni safnast fyrir í moldina með því að mæla það 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. Ólaf Arnalds o.fl. 2000). Við slíkar mælingar er mikilvægt að mæla alltaf rúmpýngd, því hún fer lækandi 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 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.

Binding í náttúrulegum vistkerfum við bættu landnýtingu og við 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 til 370 t CO₂ á km² á ári. Fyrir þá sem kjósa hektarann sem viðmið: 0,1-1 t C/ha/ári eða 0,37 – 3,7 t CO₂ á ha á ári (yfirlit í töflu 3).



Mynd 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 tapið, þegar jarðvegsrof hefur fjarlæggt mold af yfirborðinu. Með tímanum lækkar rúmpyngd efsta lagsins, sem mikilvægt er að taka tillit til við útreikninga.

Tafla 3. 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

4. Kolefni í íslenskum jarðvegsflokkum

4.1. Núverandi forði kolefnis

Íslensk mold tilheyrir að mestu þremur yfirflokkum jarðvegs (heiti jarðvegsflokka á íslensku er skáletruð í þessu riti): (i) Sortujörð (sem skiptist í *brúnjörð* – jarðvegur á þurrlandi, *svartjörð* – lífræn og /eða votlend *sortujörð*, og *votjörð* – votlendi með mikið af ösku), (ii) mójjörð (Histosol, lífræn mómold) og (iii) glerjörð (Vitrisol), jarðveg auðna (sjá Ólaf Arnalds og Hlynur Óskarsson 2008). Bæði *sortujörðin* og *glerjörðin* tilheyra jarðvegsgerðinni *eldfjallajörð* (Andosol) sem er samheiti fyrir jarðvegs sem þróast í virkum eldfjallasvæðum, með afar sérstæða eiginleika. *Eldfjallajörð* safnar mun meira kolefni en aðrir jarðvegsflokkar heimsins að *mójjörð* undanskilinni – sé gróðurhula til staðar – en hana skortir í *glerjörðinni*. Oft er talað um að kolefnisforði *eldfjallajarðar* sé um 30 kg C á fermetra að meðaltali, sem svarar 300 tonnum á hektara og 30 000 tonnum af C á ferkílómetra. Samsvarandi magn CO₂ væri 110 kg CO₂ á fermetra, 1100 t CO₂/ha og 110 000 t CO₂/km² (yfirlit í töflu 4). Þetta eru há gildi – það er einfaldlega mikið af kolefni í mold svæða sem einkennast af *eldfjallajörð*, uppsöfnunin er ein hinna sérstæðu eiginleika *eldfjallajarðar*. *Eldfjallajörð* sem er 1 m djúp með rúmpýngd 0,7 t/m³ og 10 %C í efstu 30 cm jarðvegsins en 6% í neðri 70 cm, sem víða gæti verið „eðlilegt“ ástand kerfisins hérlandis, t.d. undir birkiskógi, myndi innihalda um 50 kg C/m², þar af 21 kg í efstu 30 cm jarðvegsins.

Tafla 4. Dæmigerð gildi um 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	1100 tonn/ha	110 000 tonn/km ²

Moldin á Íslandi inniheldur mismikið af kolefni. Dýpt jarðvegsins, grunnvatnsstaða, áfokshraði, landnýting o.fl. þættir móta lífrænt innihald *sortujarðar* (*brúnjörð*, *votjörð*, *svartjörð*) sem og í *mójjörðinni*. Djúp *mójjörð* getur geymt allt að 300 kg C undir hverjum fermetra, en meðaltal í gagnagrunni Landbúnaðarháskólans (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004) er 198 kg C/m² (Tafla 5). Meðaltal fyrir *brúnjörðina* 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.

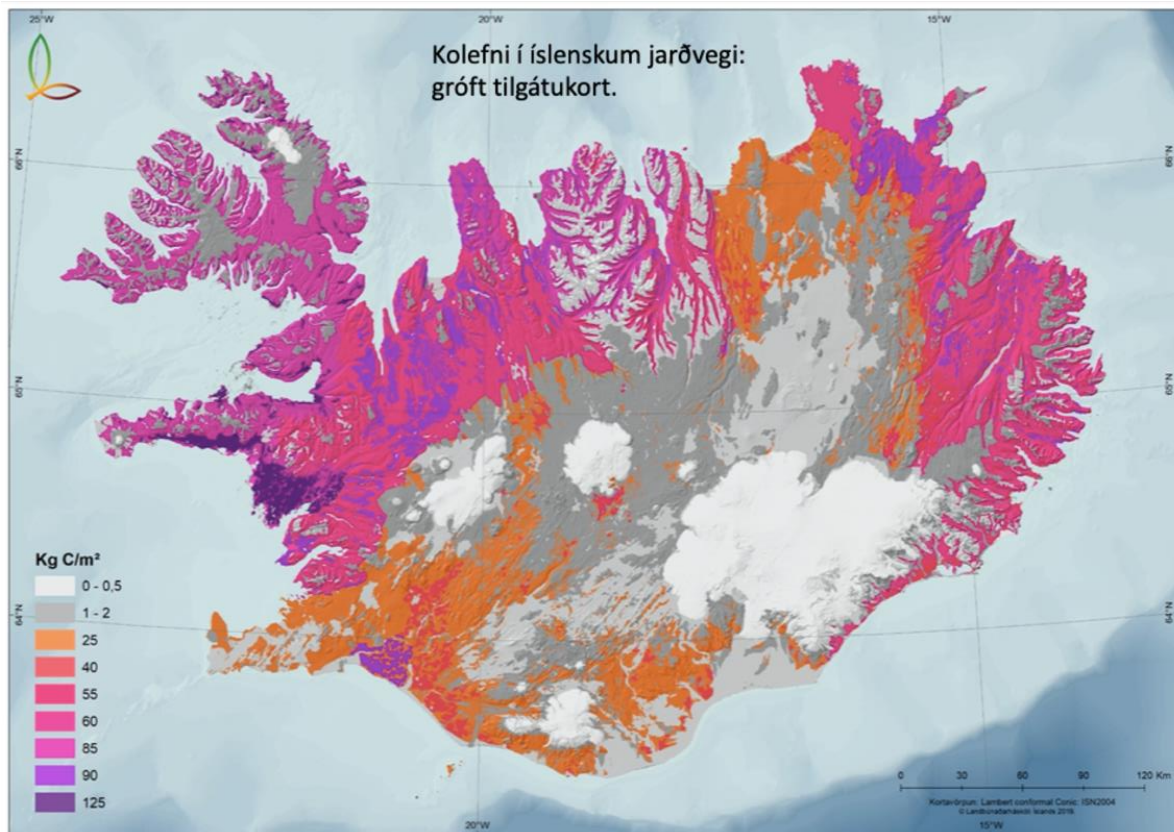
Ólafur Arnalds og samstarfsfélagar hafa áætlað heildarforða hvers jarðvegsflokks með endurbættri útgáfu af jarðvegskort Landbúnaðarháskóla Íslands, sem er í sífelldri þróun (tafla 5). Niðurstaðan er kolefnisforði sem telur 3007 milljónir tonna C í íslenskri mold (11 026 milljón tonn CO₂). Áður höfðu Hlynur Óskarsson o.fl. (2004) áætlað að forðinn væri um 2100 milljón tonn C, byggt á eldri útgáfu jarðvegskorts Lbhí. Vitaskuld eru þetta einvörðungu grófar áætlanir, það vantar einfaldlega ítarlegri rannsóknir og jarðvegskort í nákvæmari mælikvarða til að bæta um betur. Það er afar mikilvægt að auka gæði gagna um kolefni í íslenskri mold í framtíðinni, enda varða þau framtal losunar, bindingar og kolefnisbókhald landsins sem og skipulag sjálfbærrar landnýtingar.

Tafla 5. Kolefnisforði helstu jarðvegsflokka á Íslandi, byggt á jarðvegs korti Lbhí (vor 2020). Flokkar gróins lands grænilitaðir, 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 gefið upp í milljónum tonna (M t). Gríðarlegur munur er á milli eininga sem innihalda mikið af kolefni og þeirra sem eru kolefnissnauðir. Samtals er kolefnisforði í mold á Íslandi metinn 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
Mójörð	H	125	1341	168	615
Mójörð-Brúnjörð	H-BA	90	6	0,5	2
Svartjörð	HA	90	4707	424	1553
Brúnjörð-Svartjörð-Mójörð	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 (Gerjörð)	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

Munurinn á kolefnisforða moldar á illa grónu landi annars vegar (grálitað í töflunni) og á fullgrónu landi hins vegar er sláandi (sjá einnig mynd 4). Sumt af því landi sem nú er illa gróið var áður frjótt land með mikinn kolefnisforða. Land með *melajörð* og *sandjörð* hefur mikið minna af kolefni í moldinni en mold á grónum svæðum (2 kg/m² í *melajörð* og 0,5 kg/m² í *sandjörð* að meðaltali). Það má orða þetta sem svo að það hefur tapast stjarnfræðilega mikið af kolefni úr íslenskum vistkerfum – sem endurspeglast í mjög lágum gildum fyrir kolefni í lítt grónu landi, auk þess sem gróið land, einkum *brúnjörð*, hefur nú mun lægra kolefnisinnihald vegna hnignaðs ástands, en gæti verið miðað við gott ástand landsins.

Það er afar mikilvægt að fá mynd af dreifingu kolefnis um landið sem og hvar það er að losna eða bindast í vistkerfum. Mynd 5 sýnir tilgátukort fyrir kolefnisforða landsins (sjá töflu 5). *Mójörð* á Vesturlandi og *svartjörð* á Vesturlandi og á Norðvesturlandi eru stærstu kolefnisgeymarnir. Illa gróið land, m.a. á gosbeltum landsins, geymir lítið kolefni.



Mynd 5. Tilgátukort af kolefnisforða í jarðvegi. Byggt á nýjustu 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.

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

Það er augljóst að feikilegt magn kolefnis hefur tapast úr íslenskum vistkerfum síðan land byggðist. Líta þarf til fjögurra meginþátta eða ferla er varðar tap eða bindingu kolefnis í jarðvegi.

- 1) Jarðvegsrof. Kolefni í mold tapast með jarðvegsrofi sem flytur mold t.d. til sjávar með vatni og vindum.
- 2) Framræsla á votlendum. Kolefni tapast við framræslu á votlendum – votlendin taka að losa kolefni í stað þess að binda það. Losun CO₂ og N₂O eykst en á losun á CH₄ minnkar. Í heild eykst losun í CO₂-ígildum talið.
- 3) Landnýting – landhnignun. Það verður lækkun á 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 og þar sem aðgerðir til að bæta ástand lands leiða til þess að kolefnisforði byggist upp.



Mynd 6. Land í slæmu ástandi hefur tapað gríðarlegum kolefnisforða, sem m.a. eykur á styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Land í góðu ástandi geymir mikið magn kolefnis og með endurheimt vistkerfa má minnka styrk CO₂ í lofthjúpunum.

Jarðvegsrof

Hlynur Óskarsson og félagar (2004) áætluðu að 120 – 500 milljón tonn kolefnis hafi tapast á síðustu u.þ.b. 1000 árum vegna jarðvegsrofs og þá einkum með tilliti til útbreiðslu og virkni rofabarða (mynd 6), sem samsvarar 440-1833 milljón tonnum CO₂. Sé tapinu deilt jafnt á þúsund ár nemur það 0,4 – 1,8 milljón tonnum CO₂ á ári, sem er heldur lægra, en þó af sömu stærðargráðu, en núverandi losun af mannavöldum á Íslandi, þegar moldin og landið eru ekki meðtalin (um 5 milljón CO₂-ígilda 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 vistkerfum sjávar og getur þar bundist í kalki. Í áður nefndri grein Hlyns Óskarssonar og félaga frá 2004 var áætlað að um 50% þessa kolefnis hefði losnað sem CO₂. 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 milljón tonn CO₂-ígilda árið 2017 samkvæmt framtali Íslands til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (Keller o.fl. 2019). Framræsla votlendis hófst fyrir alvöru upp úr lokum heimstyrjaldarinnar síðari. Með hliðsjón af því búið var að grafa meirihluta skurða fyrir árið 1980 (fyrir 40 árum síðan) er ljóst að losun frá framræstum votlendum nemur einhverjum hundruðum milljónum tonna CO₂-ígilda síðan eftir árið 1940, en hér verður ekki farið út í að áætla heildarlosunina nákvæmar en það.

Lækkun kolefnisforða í brúnjörð (gróin þurrlendi). Lækkun kolefnisforða í mold vegna landnýtingar (myndir 7 og 8) leiðir til samsvarandi losunar á CO₂ út í andrúmsloftið (stundum einnig N₂O). Með öðrum orðum: kolefnisinnihald efsta hluta jarðvegsins lækkar miðað við náttúrulegt kolefnishlutfall 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 lækkunar má gefa sér að lækkun vegna landnýtingar hafi orðið á a.m.k. 45 000 km² lands (u.þ.b. stærð gróðurlendis nú en var mun útbreiddara), en þá er tap á kolefni vegna jarðvegsrofs ekki talið með. Lækkunin 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 rúmþyngd 0,6 t/m³, metin út frá kolefnishlutfallinu. 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 lækkunin verið sem hér segir:

Í upphafi: $0,3 \text{ m} \times 10/100 \text{ C} \times 0,6 \text{ t/m}^3 \times 1\,000\,000 \text{ m}^2/\text{km}^2 \times 45\,000 \text{ km}^2 = \mathbf{810 \text{ milljón tonn C}}$

Nú: $0,3 \text{ m} \times 4,5/100 \text{ C} \times 0,75 \text{ t/m}^3 \times 1\,000\,000 \text{ m}^2/\text{km}^2 \times 45\,000 \text{ km}^2 = \mathbf{456 \text{ milljón tonn C}}$

Munurinn: **354 milljón tonn C (1298 milljón tonn CO₂)**

Þetta er fremur varfærin áætlun. Mismunur frá eðlilegu náttúrulegu ástandi og núverandi ástandi er gróflega reiknaður sem 354 milljón tonn C í kolefnisforða í efstu 30 cm jarðvegs sem samvarar 1298 milljón tonnum af CO₂. Talan gefur til kynna stærðargráðuna. Sé þessari lækkun deilt á 1000 ár er niðurstaðan um 1,3 milljón tonna CO₂ sem tapast á ári að meðaltali í þúsund ár. Aftur fæst tap af sömu stærðargráðu en heldur lægri en öll árleg losun án landnýtingar, sem er um 5 milljón tonn CO₂ á ári (árið 2017, Keller o.fl. 2019). Mest af því kolefni sem tapast úr jarðvegi með þessum hætti endar í andrúmsloftinu sem CO₂. Á móti kemur að yfirborðið hefur hækkað vegna áfoks, sem vegur upp á móti lækkun forðans, sem fjallað um hér síðar. Enda þótt mikil óvissa fylgi útreikningum af þessu tagi lýsa þeir stærðargráðunni fyrir áhrif lækkunar kolefnis í yfirborðslögum vegna landnýtingar, sem vert er að gefa nánari gaum.



Mynd 7. Úr sér genginn úthagi á Norðvesturlandi. Talsvert af ógrónum blettum í yfirborðinu sem verða meira áberandi ef horft er á landið ofan frá. Land sem þetta er líklega að losa mikið af gróðurhúsalofttegundum. Beitarálag er mikið en kerfið ennþá að mestu gróið.



Mynd 8. Illa farið land á Snæfellsnesi. Moldir eru í yfirborði ógróna landsins og rofdíllar í gróðurþekjunni og þar á sér stað losun CO₂. Kolefni moldarinnar brotnar niður en ekkert kemur á móti frá gróðri. Endurheimt birkiskógar á þessu svæði getur bundið mikið kolefni eins og síðar er rætt.

4.3. Áfok og kolefnisuppsöfnun

Hér á undan var fjallað um losun vegna framræslu, landnýtingar og rofs. Fleira kemur til og næst er fjallað um áfok. Stöðugt áfok veldur því að yfirborðið hækkar: kolefnið grefst í moldinni í dýpri jarðlögum undir áfokinu. Algengur „áfokshraði“ (þykkun moldar) er á bilinu 0,025- 0,4 mm á ári (Ólafur Arnalds 2010) en kolefnisinnihaldið 2-8% (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004, Lbhí gagnagrunnur), en því minni rúmþyngd sem meira er af kolefni, þ.e. moldin verður léttari (Rannveig Anna Guicharnaud 2002). Uppsöfnun kolefnis í mold gæti verið á bilinu 0,005 til 0,03 kg C á fermetra á ári af þessum sökum (Ólafur Arnalds 2015 kafli 8). Út frá þessum tölum má áætla að binding CO₂ gæti auðveldlega numið um 1 milljón tonna á ári í óroskuðum 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 (er afar misjafnt eftir landshlutum). Ennfremur að hlutdeild kolefnis sé 3%C og rúmþyngdin sé 0,75 t/m³. Slíkur útreikningur leiðir til þess að 557 milljón tonn CO₂ hafi bundist og reiknað á 1000 ár er bindingin 557 þúsund tonn CO₂ á ári. Þetta er tæplega helmingi lægra gildi en fékkst hér á undan. Sú tala getur verið töluvert hærri þegar kolefnisinnihaldið er hærra en 3% í efstu cm moldarinnar (t.d. 6-10 % en lægri rúmþyngd), m.a. þar sem beitarálag er hóflegt eða land friðað fyrir beit (mynd 9). Óvissan er mikil en stærðargráðan virðist samsvara 0,5-1 milljón tonnum CO₂ á ári.



Mynd 9. Ríkt mólendi nærri þjóðgarðinum í Jökulsárgljúfrum. Hlutdeild blómplantna og gulvíðis fer vaxandi sem gefur til kynna bætt næringarástand og minnkaða beit. Birki tekið að nema land. Hér er að safnast fyrir kolefni bæði vegna minnkandi beitar sem og vegna áfoks frá hálandinu sem veldur því að moldin er að þykkna og grefur um leið umtalsvert kolefni.

Það er alveg ljóst að áfokið eitt og sér er virkur miðill í að grafa kolefni úr andrúmsloftinu í íslenskum jarðvegi (sjá umfjöllun Jóns Guðmundssonar 2016). Þessar tölur eru af svipaðri stærðargráðu og rannsóknir á mikið beittum svæðum gefa til kynna, t.d. í Krísuvík þar sem söfnuðust upp 0,017-0,030 kg 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 C á fermetra á ári þar sem skógi var plantað í rýrt mólendi. Gildin fyrir Ísland eru hærri en birt var í yfirliti Zehetner (2010) fyrir *eldfjallajörð* í heiminum (meðaltal 0,01 kg C á fermetra á ári). Ofan á alla þessa bindingu í moldinni, raunverulega og mögulega, bætist við bindingu í gróðri (ekki síst í skógrækt, sjá Brynhildi Bjarnadóttur o.fl. 2007, 2009 og Arnór Snorrason o.fl. 2002). Síðan er efnaveðrun á bergefnunum sem skilar bindingu sem er af sömu stærðargráðu, eins og rætt verður hér á eftir.

4.4. Binding kolefnis í þurrlandismold við friðun gróins lands eða bætta landnýtingu

Áður var greint frá því að kolefni binst smá saman í jarðvegi vegna áfoks; moldin er að þykkna – yfirborðið að hækka (kafla 4.3). Kolefni er einnig að skila sér aftur sér 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. Moldin jafnar sig á áratugum eða árhundurðum eftir aðstæðum. Minnkuð beit á landi þar sem gróður er til staðar sem og friðun stórra samfelldra svæða leiðir því til uppsöfnunar á miklu af kolefni á meðan kolefnisforði moldarinnar eykst á ný. Þessi aukning er ekki tekin saman eða talin fram til Loftslagssamnings S.þ. enn sem komið er. Beinar aðgerðir við landgræðslu og skógrækt eru aftur á móti taldar fram til samningsins.

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 fyrst. En ef miðað er við 2% uppsöfnun að meðaltali fyrir fjölbreytilegt land á 50 ára tímabili, sem væri fremur hæg uppsöfnun, næmi uppsöfnunin 19 tC /ha eða sem samsvarar 71,5 t CO₂ á ha. Deilt á 50 ára tímabil er uppsöfnunin 1,43 t CO₂ á ári. Þegar stór svæði eru undir, t.d. þúsundir ferkílómetra, fer þessi binding að telja verulega, t.d. 715 þúsund tonn CO₂ á ári fyrir 5000 km² svæði (miðað er 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%). Reiknuð binding verður heldur minni sé lækun rúmþyngdar á tímabilinu er tekin með í reikninginn. Þessar tölur sýna hve stærðargráðan er mikil og um leið mikilvægi moldar í samhengi við styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Á svæðinu í milli Hólmsár og Skeiðarársands eru t.d. afréttarsvæði sem sitja lágt þar sem beitarálag hefur minnkað mikið, land er gróið og þar sem loftslag er bæði hlýtt og rakt og hagstætt gróðri (mynd 10). Ætla má að umtalsverð kolefnisbinding eigi sér þar stað, sem þó er háð aðstæðum á hverju stað. Öðru máli gegnir um þau svæði sem sitja hærra, þar sem jafnvel lítil beit kemur í veg fyrir uppsöfnun, enda hiti lægri og vöxtur minni, sem og gróðurþekja.



Mynd 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 eru að binda kolefni.

5. Framræsla votlendis – geigvænleg losun gróðurhúsalofttegunda

5.1. Votlendi

Framræst votlendi eru afar öflugar uppsprettur gróðurhúsalofttegunda, stundum nefndar „heitir reitir“ (e. hot-spots) fyrir losun. Á milli 10 og 20% votlenda heimsins hafa verið þurrkuð vegna landbúnaðar og skógræktar (FAO 2014, Crump o.fl. 2017). Það er ekki aðeins á Íslandi þar sem stórum hluta votlenda hefur verið raskað, þannig 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 mótvægisáðgerða vegna hlýnunar loftþjúpsins – en það er enn sem komið er yfirleitt ekki gert.



Mynd 11. Framræst votlendi. Súrefni kemst af lífrænum efnum moldarinnar, hún tekur að anda og losar um leið kynstrin öll af CO₂. Smám saman lækkar hlutfall kolefnis í moldinni ef bergefni (áfök og aska) eru til staðar, en einnig tekur yfirborðið að síga.

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. Þetta nitur umbreytist einnig fyrir tilstuðlan örvera og hluti þess losnar sem hláturgas (N₂O), sem er mjög öflug gróðurhúsalofttegund (hvert kg samsvarar 300 kg CO₂-ígilda) Yfirborðið tekur víðast hvar að lækka ef moldin er lífræn og þar sem langt er liðið síðan landið var ræst fram getur yfirborðið 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 láglendi 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 þó víða sjá, t.d. í Norðurmýrinni í Reykjavík, þar sem steypar girðingar ná ekki niður á yfirborðið og sökklar húsa standa ómúraðir upp úr jarðvegi. Minna sig héraðs má að hluta rekja til þess hve stór þáttur ösku og áfoks er í moldinni, sem heldur henni saman (Bartoli og Burtin 2007). Rotnunarstig hefur líka áhrif, lítið rotnaðar kaldar mýrar síga líklega hægar en ef lífræna efnið er 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 mýrar sem eru að mestu orðnar til úr mosa (*sphagnum*) (t.d. Cristensen o.fl. 2003). Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir (2017) gerði ráð fyrir að lækun kolefnisforðans samsvaraði því að um 0,5 cm lag oxaðist árlega, en sigið er væntanlega nokkru hægar af áðurgreindum ástæðum.

Votlendi Íslands eru á bilinu 9000 km² (Ólafur Arnalds o.fl. 2016) til 10 300 km² (Keller o.fl. 2019) eftir því hvaða gagnagrunnar og forsendur fyrir skilgreiningu á votlendi eru lagðir til grundvallar. Umfjöllun hér á eftir ber þess merki að vitnað er í mismunandi gagnagrunna og því eru flatarmálstölur ekki meitlaðar í stein. Um helmingi votlendis hefur verið raskað og um 70% votlendis neðan 200 m yfir sjávarmáli (Ólafur Arnalds o.fl. 2016). Miklu af því landi sem var ræst fram fyrir u.þ.b. 1970 var ætlað að auka heyframleiðslu en það má draga þá ályktun af ritum um framræsluna (Sólveig Ólafsdóttir 2013, sjá einnig Ólaf Arnalds 2015 bls. 167) að hvatinn að hluta framræslunnar 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 Ólaf Arnalds o.fl. 2016).

Meginhluta votlenda á láglendi hefur verið raskað (Hlynur Óskarsson 1998b, Þóra Ellen Þórhallsdóttir o.fl. 1998) með um 30 000 km af framræsluskurðum og síðan eru um 60 000 km af svokölluðum kílræsum sem hefur verið bætt við (Áslaug Helgadóttir o.fl. 2013, Ólafur Arnalds o.fl. 2016; Fanney Gísladóttir o.fl. 2010; myndir 11 12 og 13). 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. Yfirlit reiknað upp úr skurðakorti Landbúnaðarháskólans og Landmælinga Íslands sýnir að stærsti hluti framræsts votlendis hefur minnsta þéttleika skurða (0,1-5 km á ferkílómetra). Mesti þéttleikinn með >10 km á ferkílómetra tekur til tæplega 10% framræsts lands, sem trúlega er einkum nýtt við ræktun túna.

Tafla 6. Þéttleiki skurðanets, lengd skurða, stærð raskaðra svæða og hlutfallsleg dreifing þeirra eftir þéttleika skurða. Byggir á grein Ólafs Arnalds o.fl. (2016) um votlendi og röskun þeirra sem m.a. byggir á mælingum Ingu Völu Gísladóttur 2010.

Þéttleiki skurða	Lengd skurða [§]	Röskuð svæði vegna framræslu	Hlutfall raskaðra svæða
km/km ²	km	km ²	%
0,1-5	1818	2300	66,6
5-10	11.462	858	54,7
10-15	8479	231	6,7
15-20	5337	63	1,8
>20	2585	15	0,4
Samtals	29.680 [§]	3468	100

§: Byggir á eldri skurðapækju sem unnið er að bæta. Ætla má að þessar tölur taki breytingum á næstunni eftir því sem gæði gagnagrunna fyrir skurði landsins batna

Losun er að hluta 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, þó hún sé minni en t.d. ef vatnsborð lækkar um 100 cm. Rannsóknir sýna þó að lækkun umfram 60 cm breytir ekki miklu um gildi fyrir losunina (Hlynur Óskarsson 1998a). Þá hefur hitastig áhrif á losunina, því meiri hiti, þeim mun örari getur losunin orðið. Hér er þó ekki rúm til að ræða þessi atriði frekar, sem vonandi verða gerð góð skil af öðrum á næstunni. Þær tölur sem hér fylgja á eftir eru meðaltöl, þar sem m.a. er tekið tillit til skurðapéttleika og breytilegs grunnvatnsborðs.



Mynd 12. Framræsluskurðir á Suðurlandi, Ölfusá til vinstri, Þjórsá til hægri. Þéttleik 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 13. Dæmi um skurði við bæ á Suðurlandi – framræst votlendi eru víða undirstaða heyframleiðslu til vetrarfóðurs en auk þess sem hluti hins framræsta lands er nýttur til beitar.

5.2. 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 eru aðlagðar að súrefnisfirrð moldarinnar nýta sér orkuforðann sem er í lífrænum efnum og losa metan – CH_4 . Metan er öflug gróðurhúsalofttegund og því telst vera nettó losun CO_2 -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 CO_2 -ígilda á ha á ári (Keller o.fl. 2019). 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 breytileika sé bæði innan svæða og á milli svæða. Þessi óröskuðu svæði eru metin um 6810 km² að flatarmáli.



Mynd 14. Endurheimt votlendi að Hesti í Borgarfirði. Með slíkum aðgerðum snarminnkar losun CO_2 og N_2O en losun á metan gasi eykst (CH_4). Losunin verður fljótt svipuð og frá óröskuðu votlendi eftir að fyllt er í skurðina.

5.3. Röskuð votlendi

Við framræslu taka lífræn efni í votlendunum að oxast – þau „brenna“ og losa þar með CO₂ út í andrúmsloftið með margföldum hraða en áður var fyrir framræsluna. Þau losa einnig CH₄ (mest úr sjálfum skurðunum) og N₂O en langmest af losuninni er á formi CO₂ (Jón Guðmundsson 2016). Vísindanefnd Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (e. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) tengir saman vísindamenn 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 CO₂ fyrir íslenskar aðstæður er 5,7 t C/ha, eða 20,9 t CO₂ á hektara (IPCC 2014; sjá einnig Jón Guðmundsson 2016, Keller o.fl. 2019.). Mælingar á losun CO₂ 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 Vesturlandi og Suðurlandi, en þær rannsóknir tóku aðeins til efsta hluta jarðvegsins niður að öskulagi frá því um 1500.

Fyrrgreindar rannsóknir, sem og alþjóðlegar rannsóknir sem endurspeglast í ráðlögðu losunargildi IPCC eru lagðar til grundvallar fyrir þau gildi sem notuð eru fyrir Ísland í tengslum við Loftslagsamning S.þ. (byggt á Keller o.fl. 2019).

- A. Gildið sem notað er fyrir framræst votlendi utan túna og skógræktar er 23,04 t CO₂-ígildi á ha á ári. Þá er tekið tillit til þriggja lofttegunda (CO₂, CH₄ og N₂O) og þeirra upptöku og losunarferla sem skilgreindir eru í leiðbeiningum IPCC þau svæði eru metin um 2900 km², (Keller et al. 2020).
- B. Þar sem framræst land er nýtt til ræktunar á fóðri gerir IPCC ráð fyrir meiri losun en á óræktuðu landi. Gert er ráð fyrir að þessi svæði losi 31,32 t CO₂-ígilda á ha á ári. Þessi svæði eru metin 556 km² 2018 (Keller o.fl. 2019) – flatarmál sem er í sífelldri endurskoðun.

Vissulega getur verið mikill munur á losuninni, hér er um að ræða meðaltalstölur. Svo virðist að nota megi þá þumalputtareglu að kolefnishlutfallið helmingist í hinum þurrkaða hluta moldarinnar hver 50 ár samkvæmt rannsóknum Gunnhildar Evu G. Gunnarsdóttur (2017), a.m.k. þar til ítarlegri upplýsingar liggja fyrir. Athyglisvert er að við þessa lækkingu getur flokkun jarðvegsins breyst þegar kolefnishlutfallið minnkar, t.d. úr *mójrörð* (ef lækkar niður fyrri 20% C) í *svartjörð* (12-20% C) eða úr *svartjörð* í *votjörð* (<12% C) (sjá einnig Gunnhildi Evu G. Gunnarsdóttur 2017).

5.4. Heildarlosun frá framræstum votlendum

Losun og binding gróðurhúsalofttegunda frá landi á Íslandi eru 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 milljón tonnum CO₂-ígilda 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 milljón tonn 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 þarf saman landstærðir og losunartölur og í sumum tilfellum bindingu kolefnis, t.d. á svæðum þar sem skógrækt og landgræðsla eru 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 flatarmálstölurnar sem áður voru gefna í Töflu.7.

Tafla 7. 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.

	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.

Framræstu votlendin losa nú um 8,430 milljón tonn CO₂-ígilda. 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 milljón tonna CO₂-ígilda á ári. Sú losun er meiri en um 5 milljón 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.

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

Mold íslenskra votlenda inniheldur áfok og gjóskulög og eru sannarlega með lægra hlutfall kolefnis í hverju jarðvegslagi en gengur og gerist í mómýrum norðurlóða. Því er gjarnan haldið fram að þá hljóti losun íslenskra votlenda vera minni en t.d. finnskra mómýra. Í þessu felst algengur misskilningur, heildarmagn kolefnis er ekki endilega lægra í íslensku votlendunum. Það má ekki gleyma að gera ráð fyrir rúmþyngd jarðvegsins, sem er meiri í votlendum á Íslandi en í arktískum mómýrum 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:

Þyngd kolefnis í rúmmetra moldar (kg) = %C/100 x BD t/m³ x 1000 kg/t

Arktísk mójörð: $30/100 \times 0,2 \times 1000 = 60 \text{ kg/m}^3$

Sunnlensk votjörð: $10/100 \times 0,6 \times 1000 = 60 \text{ kg/m}^3$

Niðurstaðan er því sú að það er jafnmikið kolefni í rúmmetra af íslensku votjörðinni og í finnskri arktískri mójörð í þessu dæmi. Almennt er ekki hægt að nota þá röksemdafærslu fyrir því að íslensk votlendi hljóti að vera 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 eru að losa, breytileiki í landslagi er mikill sem og grunnvatnsstaðan.

5.5. 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 hélendis, að losunarstuðlar kunni að vera ofmetnir, að flatarmál votlendis sé ofmetið, að breytileiki á milli svæða sé mjög mikill og að inn 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 jarðvegsgerðir og dreifingu þeirra (m.a. jarðvegskort), losun frá mismunandi landeiningum, sem og skurðaþéttleika, stærð áhrifasvæðis, kílræsingu o.s.frv. Rök sem færð eru fyrir því að íslenskt votlendi losi ekki eins mikið kolefni og erlendar mómyrar vegna þess að minna sé af lífrænum efnum, talið í prósentum, standast þó alls ekki, heildarmagnið er það sem skiptir máli (kg C/m^3) sbr. ramma sem hér fylgdi.

Hluti deilnanna er e.t.v. sprottinn upp úr flóknu framtali gagna til Loftslagssamningsins, 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 gróðurhúsalofttegunda frá landi, votlendi sem þurrlandi. Rannsóknir sem eflaust eiga eftir að leiða í ljós breytingar á þessum tölum er varðar losun, stærð lands o.fl. Það er þó ólíklegt með hliðsjón af bestu fánlegum gögnum nú að stærðargráðan breytist: losun sem telst í milljónum tonna CO_2 -ígilda á ári. Það er þessi stærðargráða sem er mergur málsins.

6. Þurrlandi

Sem fyrr sagði eru nú 20-30 kg af kolefni bundið í hverjum fermetra þurrlandisjarðvegs að meðaltali (*brúnjörð*), en það er þó afar breytilegt. Við mikla, langvarandi og samfellda beit rýrnar gróðurfarið og þar með upptaka kolefnis úr andrúmsloftinu á sama tíma og gengur á forðann í moldinni. Slík nýting skilar því CO₂ upp í andrúmsloftið. Hófleg eða létt beit á öflug vistkerfi getur hins vegar aukið kolefnisforða í mold, ekki síst á láglandi. Í kafla 4.2 voru gerðir útreikningar sem benda til þess að stærðargráða losunar úr þurrlandi síðustu 1000 ár hafi verið um 1,3 milljón t CO₂ á ári. Losunin hefur vitaskuld ekki verið jöfn síðasta árpúsundið og óvissa í tölum af þessu tagi er mikil – þær gefa einungis til kynna mat á stærðargráðu losunarinnar. Jón Guðmundsson (2016) reiknaði losun frá þurrlandi út frá öðrum forsendum fyrir greiningar á losun gróðurhúsalofttegunda frá íslenskum landbúnaði. Hann fékk út gildin 0,4 – 60 milljón tonna CO₂-ígilda losun á ári frá þurrlandi (mólandi) eftir því hvaða sviðsmynd var notuð. Líkur eru á að losun gróðurhúsalofttegunda frá þurrlandi á Íslandi séu umtalsverð, en óvissan er eigi að síður mjög mikil. Við teljum að líkleg spönn út frá þessum fyrirliggjandi gildum sé 1-8 milljónir tonna CO₂-ígilda á ári.



Mynd 15. Illa farið land þar sem mikið af kolefni hefur tapast við rof og einnig er hlutfall og heildarmagn kolefnis í jarðvegi þess mólandis sem eftir stendur mun lægra en við eðlilegar aðstæður (miðað við „vistgetu“ kerfisins). Ætla má að á þessu svæði standi eftir 10-20% þess kolefnis sem áður var á svæðinu (lækkað úr um 1 milljón tonna CO₂ ef svæðið er 10 ferkilómetrar, niður í 100 000 – 200 000 tonn CO₂). Stóran hluta þessa kolefnis má endurheimta í moldina með vistheimt á landslagsskala.

Losun sem nemur 1-8 milljónum tonna CO₂ á ári er geigvænlega mikil losun sem er af sömu stærðargráðu og losun frá samgöngum, iðnaði, landbúnaði, skipum o.s.frv. (um 5 milljón CO₂-ígildi). Frumskilyrði þess að geta tekist skipulega á við vandann er að hafa góð gögn um umfang og orsakir. Það er óásættanleg staða að hafa ekki áreiðanlegri upplýsingar um þessa losun en raun ber vitni (ritað í ágúst 2020).

7. Landnýting og kolefnisspor

Í þessum kafla eru til umræðu þættir er varða moldina og ástand lands, sem geta haft áhrif á loftslagið. Þar vega framræst votlendi og þurrlandisvistkerfi í slæmu ástandi afar þungt, en ekki síður kerfi í góðu ástandi sem geta bundið mikið kolefni. 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 2019, FAO 2020 - vefsíða). Þetta teljast há gildi. Kolefnisspor lambakjöts hefur verið metið sem 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? Slíkir útreikningar hafa verið gerðir í öðrum löndum, m.a. fyrir dillkakjöt, en niðurstöður eru ákaflega misjafnar eftir aðstæðum hverju sinni (t.d. Ripoll-Bosch o.fl. 2013).

Hluti framleiðslu nautakjöts, mjólkurafurða og dillkakjöts 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 einnig hægt að reikna eins konar landsmeðaltal. Erfiðara er taka beit sauðfjár á úthaga með inn í myndina því þar er óvissan meiri. Hér á eftir eru sýndir útreikningar fyrir dillkakjöt sérstaklega, en færa má rök fyrir því að kolefnisspor nautakjötsframleiðslu sé á svipuðu róli er varðar landnýtinguna, en að víðfeðmu mólendi og framræstum úthaga undanskildum. Þá er vikið lítillega að kolefnisspori hrossa.

7.1. Kolefnisspor dillkakjöts

7.1.1. Almenn

Segja má að framsetning á gildum fyrir losun gróðurhúsalofttegunda vegna beitar búfjár og fóðurframleiðslu sé nokkurt nýnæmi hérlendis. Í upphafi er rétt að leggja á það áherslu að flestir þeir er stunda búskap nú tóku við búi áður en loftslagsspor landnýtingarinnar 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 getur verið gríðarlega mikil, en losunin er m.a. tengd nýtingu framræstra votlenda sem áður var rædd. Mikilvægt er að hafa í huga að margvíslegar lausnir koma til greina til að minnka þessa losun – m.a. breytingar á beitarháttum en ekki síður landgræðsla, skógrækt og endurheimt votlenda á bújörðum, m.a. á framræstum votlendum sem ekki eru nýtt til fóðurframleiðslu. Unnt væri að breyta stuðningsgreiðslum til landbúnaðar með markvissum hætti til að auðvelda nauðsynlega þróun. Í öllu falli er afar mikilvægt að varpa ljósi á þessa losun eins og hér er reynt að gera, til þess að vega og meta ástandið – sem síðan er forsenda þess að finna hagkvæmar lausnir.

7.1.2. Útreikningar

Við útreikninga á kolefnisspori dillakjöts þarf að taka tillit til i) losunar í framleiðsluferlinu; ii) losunar frá framræstu landi til heyframleiðslu; iii) losunar frá öðru framræstu votlendi á viðkomandi búi, annars vegar þess sem er nýtt til beitar og hinsvegar þess sem ekki er nýtt til beitar; iv) losunar frá mólendi sem nýtt er til beitar; og v) bindingu í heimalöndum og úthaga þar sem það á við; vi) bindingar í túnum á óframræstu landi.

- i) Hér eru notaðar tölur frá Environice um losun í framleiðsluferli dillakjöts án þess að tekið sé tillit til lands. Þessar tölur voru reiknaðar voru sérstaklega fyrir Landssamtök sauðfjárbænda (Environice 2017), þar sem niðurstaðan var meðaltalið 28,6 kg CO₂-ígilda fyrir kg kjöts. Rétt er að benda á að aðrar tölur sem hér koma á eftir eru reiknaðar fyrir kg skrokks, en munurinn (kjöt vs skrokkur) breytir ekki miklu um heildarmyndina.
- ii) Sé gert ráð fyrir að túnin losi 28,48 t CO₂-ígilda á ha¹ vegna framræslu (umfram losun frá óframræstum votlendum) og að 0,07 ha tún² þurfi til öflunar heyja fyrir hverja lambá, þá er hægt að reikna losun vegna framleiðslu á vetrarfóðri. Ekki eru öll tún á framræstu landi og því er gert ráð fyrir að a) 1/3 heyframleiðslu sé á framræstu túni og b) helmingur heyframleiðslu sé á framræstu túni. Meðal fallþungi (skrokkur: kjöt, fita og bein) er áætlaður 27,8 kg³. Losun verður 23,9 kg CO₂-ígilda á hvert kg skrokks ef 1/3 framleiðslunnar er á framræstu túni, en 35,9 kg CO₂-ígilda á kíló skrokks ef helmingur er á framræstu landi. Ef allt heyið er ræktað á framræstu landi hækkar talan í > 70 kg CO₂-ígilda fyrir þennan þátt. Þessar tölur bætast við áðurtalin 28,6 kg losun á hvert kg kjöts í framleiðsluferlinu (liður i).
- iii) Annað framræst votlendi á viðkomandi býli, sem er nýtt til beitar er einnig að losa CO₂. Samtals eru um 5,8 milljónir tonna CO₂-ígilda losun frá slíku landi⁴ og hér er ætlað að 33-50% þessa lands falli á sauðfjárbylí eða sauðfjárhluta býla með blandaðan búskap. Niðurstaðan er þá 1,9 – 2,9 milljón tonn CO₂-ígilda sem falla á um 9 þúsund tonn⁵ sauðfjárafurða, þ.e. 9 milljón kg, eða 211 – 322 kg CO₂-ígilda á kg skrokks. Sama stærðargráða fæst ef miðað er við um 300 ær og 50 ha af framræstu landi utan túna.
- iv) Ástæða fyrir slæmu ástandi mólendis er oftast búfjárbætur í nútíð og fortíð. Annars væri landið iðulega að binda kolefni, sem á sér einmitt stað í vel grónum beitolöndum þar sem beit er afar hófleg. Sé miðað við 2 milljón tonn CO₂-ígilda á ári, að 50% losunar sé vegna sauðfjárbeitar⁶ og losunin færð jafnt á heildarframleiðsluna (um 9 þúsund tonn) er losun úr mólendi 111 kg CO₂-ígildi á hvert kg skrokks. Þetta er meðaltalsgildi fyrir allt sauðfé, þar sem aðeins helmingur mólendis sem er að losa kolefni er tekið með. Hér er sauðfjárbætur látin „njóta vafans“, meðalgildið er varlega áætlað. Vissulega dreifist sauðfé ekki jafnt á það land sem er illa farið. Hluti fjárens gengur á góðu landi sem losar lítið eða er jafnvel að binda, en þá myndi losunin á illa fögnu landi reiknast á minni hluta framleiðslunnar, þar sem sótsporið væri þá þeim mun hærra (reiknast á færri lambær), gæti jafnvel numið > 1000 kg CO₂-ígildi á hvert kg skrokks en lækkar tilsvarendi fyrir kjöt sem er framleitt á góðu landi. Í því felst tækifæri til að minnka losun framleiðslunnar með því að draga hana af landi í slæmu ástandi. Hér var notað varfærið gildi í spönn fyrir losun úr mólendi (1-8 milljón tonn CO₂-ígilda á ári), en reynist losunin meiri

¹ Hér gert ráð fyrir að losun frá túnum á framræstu landi sé 31,32 t CO₂-ígilda á ha, en síðan dregin frá 2,84 t CO₂-ígilda á ha sem er losun frá óframræstum votlendum. Aukning í losun vegna framræslu því 28,48 t CO₂-ígildi á ha, sem er notað hér.

² Oft er þó talið að stærri tún en 0,07 ha þurfi fyrir fóðrun hvers lambár, t.d. 0,1 ha /lambá, sem gæfi þá hærri niðurstöður, þ.e. 30% stærra kolefnisspor fyrir þennan þátt. Hér er m.a. einnig spurning um hvort landið er nýtt til vor og haustbeitar, sem hér er gert ráð fyrir að falli á næsta lið (iii). Ræktun fóðurkális o.fl. á framræstu landi er ekki tekið með í reikninginn.

³ Meðal fallþungi árið 2019 samkvæmt skýrsluhaldi bænda, Bændablaðið 2. apríl 2020.

⁴ 290 310 ha sem losa 23,04 t CO₂-ígilda á ha. Frá dregst 2,84 t CO₂-ígilda á ha sem er losun frá óframræstum votlendum. Nettólosun því 20,2 t CO₂-ígilda á ha. Samtals um 5,8 milljón CO₂-ígilda á ári.

⁵ Framleiðsla 2018, Bændablaðið 2020, 6. febrúar og 5. mars; ærkjöt ekki talið með.

⁶ Yfirgnæfandi hluti úthaga er nýttur til sauðfjárbeitar, en einnig kemur til hrossabeit og beit nautgripa. Hluti sauðfjárbeitar á mólendi sem losar CO₂ er áætlaður 50%, sem er varleg áætlun sem tekur mið af LuLuCf gagnagrunni Lbhí.

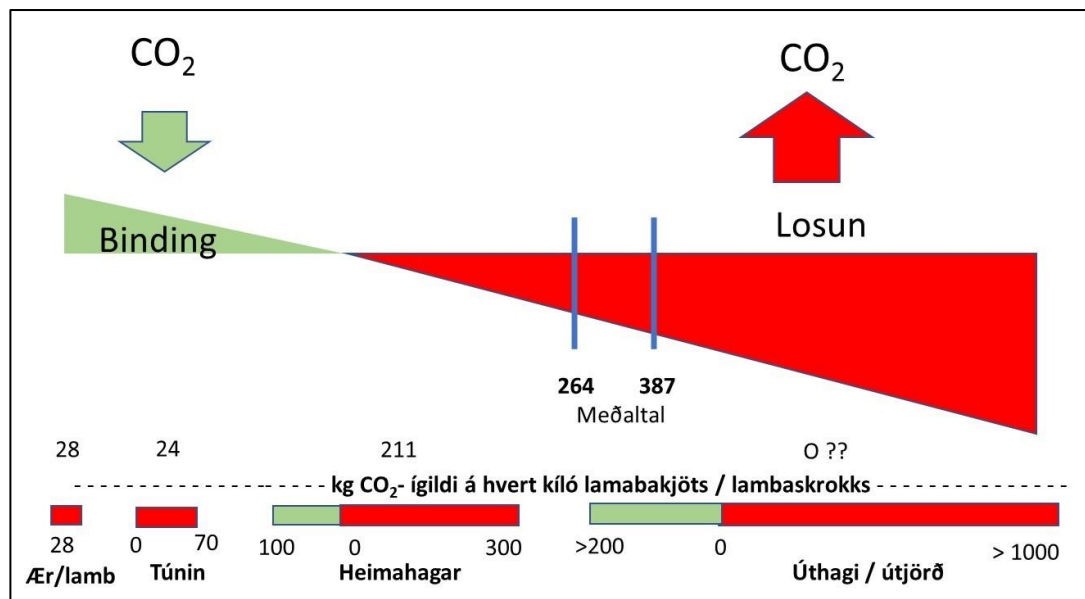
hækkar þetta gildi í samræmi við það. Þessar sviðsmyndir sýna það vel að gera verður ríkar kröfur um að sauðfé gangi einvörðungu á fullgrónu landi í góðu ástandi. Það skal ítrekað að með því að taka land sem er með mikla losun gróðurhúsalofttegunda úr beitarnýtingu batnar losun greinarinnar í heild mjög mikið, sem einnig bætir ímynd framleiðslunnar. Líkur aukast á meiri losun CO₂ frá landi sem telst sæmilega vel gróið ef fjárfjöldi er mjög mikill og því þarf að líta vel til þessa þáttar þar sem mikið er af fé á hverju búi (t.d. fleiri en 500 ærgildi).

- v) Víða finnst land í góðu ástandi sem er að binda kolefni. Hluti þess telst til beitilanda og annars staðar hefur útjörð verið friðuð sérstaklega. Binding á slíku landi lækkar meðaltalslosun framleiðslunnar (t.d. 1 milljón tonn CO₂-ígilda færð á 9000 tonna framleiðslu: 111 kg CO₂-ígildi á hvert kg skrokks – kjöt og bein). Bindingin getur því vegið upp á móti losun úr mólendi. Þessi aðferð hefur alvarlegan annmarka, framleiðslunni nú er ekki jafndreift á haga í góðu ástandi.
- vi) Sé kolefnisbinding í tünnum kemur hún til frádráttar, t.d. þar sem tún eru ræktuð upp á illa grónu landi, sem víða á sér stað á Suðurlandi. Bindingin gæti verið að sambærilegri stærðargráðu eða jafnvel talsvert örrari en binding við landgræðslu og gæti numið nokkrum kg CO₂-ígilda á kg dillakjöts.

Tafla 8. Kolefnisspor dillakjötsframleiðslu þegar landið er tekið með í reikninginn. Mismunandi sviðsmyndir fyrir hlutdeild votlendis í heyframleiðslu (ii) og öðru land býla (iii) sem og losun gróðurhúsalofttegunda frá mólendi (iv). Samtals er losunin að meðaltali 375-498 kg CO₂-ígildi á kg skrokks, en getur bæði verið hærri og lægri eftir þeirri landgerð og ástandi mólendis sem er nýtt til búskapar á hverjum stað.

Forsendur og sviðsmyndir (forsendur nánar raktar í texta)	kg CO ₂ -ígildi á kg kjöts/skrokks ¹
i) „Framleiðsla“ – Environice 2017; vantar landið	29
ii) Vetrarfóður, 33% á framræstu landi ²	24
iiib) Vetrarfóður, 50% á framræstu landi ²	36
iiia) Framræst land utan túna, 33% á landsvísu, 9000 t landsframleiðsla ³	211
iiib) Framræst land utan túna, 50% á landsvísu, 9000 t landsframleiðsla ³	322
iv) Mólendi, 50% af 2 milljón t CO ₂ -ígilda dreift á 9000 t landsframleiðslu	111
v) Binding á landi í góðu ástandi, 1 milljón tonn á 9000 t landsframleiðslu ⁴	– 111
Samtals losun framleiðslunnar að meðaltali (i + ii + iii + iv + v)	264 – 387

1: nándað í heilar tölur. 2: gert ráð fyrir 0,07 ha fyrir fóðurframleiðslu fyrir hverja á, gildi hækka ef gert ráð fyrir 0,1 ha/á. 3: heildarframleiðsla dillakjöts 2018 í tonnum samkvæmt Bændablaðinu 6. febrúar og 5 mars 2020, ærkjöt ekki meðtalið. 4: Áætluð binding í högum í góðu ástandi dreift á alla framleiðsluna (mikil óvissa).



Mynd 16. Einfölduð mynd af losun og binding við framleiðslu lamabakjöts (kg CO₂-ígilda á kg kjöts eða skrokks). Losun CO₂ vegna framleiðslu lamabakjöts fylgir i) framleiðsluferli (ærin /lambið), ii) losun frá framræstu landi við heyframleiðslu (túnin), iii) losun frá öðru framræstu landi á búinu eða binding í heimahögum (heimahagar); iv) losun frá illa fôrnu mólendi nýtt til beitar og/eða binding lands í góðu ástand (úthagi / útjörð). Við verstu skilyrði getur kolefnissporið orðið > 1000 kg CO₂-ígilda á kg kjöts eða skrokks en þar sem framleiðsla fer fram á þurrlandi í góðu ástandi og beitin mjög hófleg getur orðið binding í landinu samhliða framleiðslunni (jákvætt kolefnisspor).

Í heild sýna þessir útreikningar (liðir i-vi, tafla 8), að það gefur ekki rétta mynd af kolefnisspori að fjalla einvörðungu um losun í framleiðsluferli sem ekki tekur moldina með í reikninginn. Kolefnissporið er 264 – 387 kg CO₂-ígildi á hvert kíló skrokks að meðaltali samkvæmt þeim sviðsmyndum sem hér eru dregnar. Óvissan er umtalsverð sem og breytileiki á milli fjárbúa (sjá hér á eftir), en stærðargráðan fyrir losun frá landinu er slík að ómögulegt er annað en að taka losun frá landi við framleiðslu diilkakjöts alvarlega (mynd 17). Til samanburðar má geta þess að fólkubíll losar 2000-3000 kg CO₂-ígilda á ári eftir eyðslu og akstri (2,31 kg CO₂-ígildi á hvern lítra af bensíni). Kolefnisspor flugfars til Evrópu frá Íslandi er talið nema 250-350 kg CO₂-ígilda á hvern farþega (reiknivélar Ícelandair og Kolviðs, apríl 2020).



Mynd 17. 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.

7.1.3. Gríðarlegur munur á kolefnisspori lambkjötsframleiðslu

Hér á undan var unnið með meðaltalstölur. Þær sýna að ástand lands og aðstæður til framleiðslunnar eru afskaplega mismunandi á milli sauðfjárbúa. Sé mikið af framræstu landi sem ekki er nýtt til tún-ræktar á sauðfjárbúum og beitt er á haglendi sem er í slæmu ástandi verða gildin ansi „skrautleg“, jafnvel hærrí en 1000 kg CO₂-ígilda á hvert kíló kjöts, sem sýnir svo ekki verður um villst að ekki ætti að framleiða dillakjöt 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 dillakjöts (liðir v og vi hér að ofan). 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 dillakjöts verið kolefnishlutlaus – binding í landi vegur þá upp á móti um 29 kg CO₂-ígilda losun á hvert kg kjöts samkvæmt lið (i) hér að ofan. Mikilvægt er að neytendur hafi innsýn inn í losun sem fylgir framleiðslu vörunnar sem þeir kaupa – þeir ættu að eiga rétt á að fá slíkar upplýsingar. Munurinn á milli kolefnis-hlutlausrar framleiðslu og kjöts sem hefur sótspor sem nemur hundruðum kg CO₂-ígilda á hvert kg kjöts er afgerandi!

Hvað er til ráða þar sem sótspor framleiðslunnar er mjög hátt? Mikilvægt er að loka skurðum og endurheimta votlendi þar sem það er hægt – á svæðum sem ekki eru nýtt til fóðurframleiðslu (sviðs-myndir iiiia og iiib í töflu 8). Ennfremur er brýnt að beita einvörðungu á vel gróið land og þá hóflega, því þá getur landið tekið að binda, sem vegur upp á móti losuninni. Í tengslum við þróun gæðastýringar í sauðfjárrækt upp úr síðustu aldamótum var bent á hóflegt viðmiðið fyrir beit, 8 ha/lambá af vel grónu landi á láglandi, en ekki hefur verið farið eftir þeirri ábendingu við framkvæmdina og mun þyngra beitarálag tekið upp sem viðmið (Ólafur Arnalds 2019). Unnt væri að votta sérstaklega framleiðslu þar sem hagar eru sérlega rúmír – sem ætti að vera ríkjandi viðhorf í sauðfjárframleiðslu í dag en er það

ekki (sjá Ólaf Arnalds 2019, 2020). Brýnt er að efla vinnu við að afmarka hentug beitarsvæði svo hægt sé að hlífa öðrum svæðum. Breytingar á stuðningsgreiðslum samfélagsins eru öflugt tæki til að kalla fram aðlögun þannig að viðkvæmasta landið verði tekið úr beit en skógrækt, landgræðsla, vistheimt og endurheimt votlenda verði styrkt. Þar sem fjöldi fjár er mjög mikill á sauðfjárbúi er hætta á að landrými sé ekki í samræmi við fóðurþörfina (t.d. minna en 8 ha af vel grónu landi fyrir hverja lambá, sbr. mynd 8). Þá eru umtalsverðar líkur á að mold í úthaga sé að losa gróðurhúsalofttegundir út í andrúmsloftið.

7.2. Kolefnisspor nautakjöts

Mikil losun verður úr framræstu votlendi sem notað er til fóðurframleiðslu og beit nautgripa (mynd 18). Telst sú losun til kolefnisspors við nautakjötsframleiðslu? Já, það gerir hún. Yfirleitt er minna land undir og oft einsleitara í samanburði við framleiðslu dillkakjöts. Niðurstaða fyrir losun í nautakjötsframleiðslu yrði af sambærilegri stærðargráðu og framleiðsla dillkakjöts (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 þurrlandi og óframræst land einvörðungu 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 er nærri beitilandi, sem tæki þá að losa ennþá meira – en því miður eru dæmi um slíkt (mynd 18). Mikilvægt er að framleiðslugreinin fái aðgang að reiknivélum fyrir kolefnisspor mismunandi framleiðsluhátta nautakjöts þar sem eðli landsins og landnýting er tekin með í reikninginn. Þá er mikilvægt að neytendur verði upplýstir um kolefnisspor kjötsins sem í boði er.



Mynd 18. Beit nautgripa á framræst votlendi. Losun úr framræstu votlendi er mikil og sums staðar er gengið ansi nærri landinu og þá eykur losun úr rofnu yfirborði væntanlega verulega á losunina.

7.3. Hesturinn

Kolefnisspor hrossa eru ákaflega misjafnt eftir því hvernig beit og öflun vetrarfóðurs er háttað. Ef haga-ganga byggist á beit á framræst votlendi þá er kolefnissporið ansi stórt (mynd 19). Sem dæmi má miða við 1-4 ha beutilands á framræstum mýrum fyrir hvern hest og losun upp á um 20,2 t CO₂ á ha (heildar-losun mínus náttúruleg losun; sjá töflu 7). 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). Tökum annað mjög einfaldað dæmi: ef fjórðungur framræsts votlendis sem nýtt er til beitar er undir hrossabeit, beitinni deilt á öll hross landsins og þau talin um 80 000 þá er niðurstaðan um 21 tonn á hross, sem er af sömu stærðargráðu og gildin hér að ofan. Mikil óvissa fylgir útreikningum af þessu tagi og breytileikinn er ansi mikill. En útreikningarnir benda sterklega til að losun vegna hrossaeignar geti verið gríðarlega há. Mikilvægt er að meta og mæla losun vegna hrosseignar 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 á það að kolefnisjafna neyslu.



Mynd 19. Hross á beit á framræstu votlendi, sem ekki er notað til heyframleiðslu nema að litlu leiti. 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 kolefnissporið dreifist einnig á dilkakjötið. Mikilvægt er að opna umræðu um kolefnisspor af því að eiga hesta.

8. Efnaveðrun í mold, efnarof og kolefnisbinding

Regnvatn inniheldur koltvísýring úr andrúmsloftinu sem myndar bíkarbónat (HCO_3^-) í moldinni sem 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 kalkþörung, skeljar og kórala. Úr verður hringrás kolefnis á milli andrúmslofts, moldar og hafsins. 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 CO_2 úr andrúmsloftinu. Hringrásin sem tengist efnaveðrun í mold var gerð góð skil í riti Sigurðar Reynis Gíslasonar (2012) um kolefnis-hringrásina.

Sem fyrr segir í þessu riti er efnaveðrun á Íslandi afar hröð. Plakíóklas 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 um Ca^{++} og til verður bíkarbónat (HCO_3^-) auk allófans og fleiri efnasambanda sem myndast við veðrunina (sjá bók Sigurðar Reynis Gíslasonar 2012, bls 61). Kalsíum og bíkarbónat berast með vatni til sjávar, þar sem kalsíum myndar að lokum kalk (CaCO_3) – kolefnið hefur þá bundist í seti sjávar. Efnaveðrun í mold veldur þannig „efnarofi“ á uppleystum efnum frá mold til sjávar (sjá yfirlit Sigurðar Reynis Gíslasonar 2008).

Efnarof er talið binda um 3,1 milljónir tónna CO_2 -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 með). Líkur eru til að þessi binding aukist með hækkandi hitastigi, 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 og Ólaf Arnalds 2015 kafla 6 og 11).

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 mjög víða við á Íslandi.

Eiginleiki basalts að hvarfast við koltvísýring og mynda torleystar steindir eru nýttir í verkefnum við jarðhitasvæði þar sem CO_2 er dælt niður í bergið. Þar má nefna svokallað CarbFix verkefni á Hellisheiði. Þessi lausn er kostnaðarsöm enn sem komið er en gæti gengt mikilvægu hlutverki við að draga úr staðbundinni losun gróðurhúsalofttegunda í framtíðinni, ekki síst í nágrenni iðjuvera.

9. Kolefnisjöfnun – álitæfni

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 athyglin fyrst og fremst á moldinni. Endurheimt votlendis minnkar hins vegar losun CO₂ út í andrúmsloftið og þar sem mjög mikill munur er á losun framræsts votlendis og náttúrulegs votlendis er ávinningur af endurheimt votlendis mikill.

Kolefnisjöfnun felur í sér tækifæri fyrir almenning, fyrirtæki og stjórnvöld til að minnka kolefnisfótsporið. Margir aðilar, t.d. opinber fyrirtæki, félagasamtök og einstaklingar, geta komið að sölu kolefnisjöfnunar. Þá er gert ráð fyrir því að minnka styrk gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpinum, t.d. með endurheimt votlendis, með bindingu kolefnis í viði við skógrækt, eða með bindingu í mold og gróðri við landgræðslu og vistheimt og jafna þannig losunina sem neytandi veldur. Um leið verður almenn-ingur meðvitaður um umhverfisáhrif gerða sinna og stærðargráðu losunarinnar sem fylgir neysl-vörum og athöfnum hvers og eins. Sem dæmi þá tíðkast að kolefnisjafna flug til útlanda og eldsneytis-notkun á bílum. Með aukinni áherslu á umhverfismál í daglegu lífi fólks hefur markaður fyrir kolefnisjöfnun farið ört vaxandi og um leið hefur skapast samkeppni um áherslur. Hér er bent á þrjú álitæfni sem vert er að hafa í huga við kolefnisjöfnun: 1) tímann sem tiltekin aðgerð tekur þar til jöfnun er náð; 2) kostnað á bundna kolefniseiningu (t.d. kr/bundið kg CO₂-ígildi); og 3) umhverfisáhrif aðgerða til að draga úr losun og/eða binda kolefni í vistkerfum.

9.1. 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 fjarlægt hið skaðlega CO₂ úr andrúmsloftinu, hvort heldur sem 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 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 landgræðslu-aðgerðir 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 hvaða tíma minnkuð losun er seld: minnkuð losun eins árs (um 19 t CO₂-ígildi / ha á ári) eða t.d. 10 ára minnkuð losun (um 190 t CO₂-ígildi á 10 árum). Hugsanlega mætti selja ákveðna bindingu á ári í áskrift. Af þessu er ljóst að skilgreina þarf vel markmið aðgerða og tímann sem tekur að ná settum markmiðum og 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.

9.2. 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 tiltekna flatarmálseiningu (t CO₂-ígildi/ha á ári) heldur einnig að skoða kostnað við bundin CO₂-ígildi og þá eftir tiltekinn tíma. Kostnaður við gróðursetningu á einum ha skógar er umtalsverður (nálgast 400 þúsund kr/ha árið 2020; byggt á grein Arnórs Snorrasonar og Sigríðar Júlíu Brynleifsdóttur, 2018) en er venjulega mun minni við að hefja landgræðsluáðgerðir á hvern ha (t.d 50-150 þúsund kr eftir eðli inngripa; mat byggt á gögnum frá Landgræðslunni, 2020). En heildarmagn bundins kolefnis verður mun meira í stórvöxnum skógi samanborið við endurheimt móllendi á hverjum hektara svo dæmi sé tekið. Kostnaður við bundið t CO₂-ígildis virðist svipaður fyrir landgræðslu og skógrækt. Útkoma úr slíkum samanburði fer að vísu nokkuð eftir 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 á hvern hektara og því er kostnaður á hvert kolefnisjafnað tonn CO₂-ígilda yfirleitt lægri fyrir votlendið, auk þess sem ábatinn næst strax, en getur tekið áratugi í landgræðslu eða skógrækt.

Friðun samfelldra svæða fyrir búfjárbætur 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 sjálfgræðsla er hluti aðgerða (mynd 20). Slíkar aðgerðir eru ekki einungis hagkvæmar heldur fylgir þeim mikill umhverfisávinningur, sem er ekki síður mikilvægt (rétt eins og með landgræðslu og skógrækt). Gera þarf ráð fyrir að taka kostnað við eftirfylgni og staðfestingu á að aðgerðirnar heppnist með reikninginn, sé aðgerðum sem þessum beitt til kolefnisjöfnunar.



Mynd 20. Sjálfgræðsla 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 sem felur jafnframt í sér mikinn umhverfisávinning, sem er ekki síður mikilvægt. Myndin er tekin á Þórsmerkursvæðinu árið 2020.

9.3. Umhverfisáhrif kolefnisbindingar

Margar aðgerðir 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 Þórsmörk (mynd 20). Mikilvægt er að aðgerðir til kolefnisjöfnunar valdi ekki umhverfisskaða að öðru leiti – það stoðar ekki að leitast við 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 2005, Lindenmayer o.fl. 2012. Hvatarnir geta m.a. lotið að styrkjakerfum, niðurgreiðslum, skattaívilnunum, stefnumótun stjórnvalda, og geta verið beinar aðgerðir til kolefnisbindingar eða aðgerðir sem hafa óbein áhrif á flæði gróðurhúsalofttegunda. Í samningi SP um líffræðilega fjölbreytni er beinlínis mælt gegn aðferðum til kolefnisbindingar til að draga úr hlýnun lofthjúpsins ef þær eru skaðlegar fyrir umhverfið að öðru leiti. Hér má sérstaklega nefna notkun ágengra plöntutegunda og einræktun í skógrækt (e. monoculture), sem er ekki talin réttlætanagerð aðferðafræði til kolefnisjöfnunar. Einræktun og notkun ágengra trjátegunda gengur einnig gegn Heimsmarkmiðunum Sameinuðu þjóðanna (e. Sustainable Development Goals) sbr. viðamikla úttekt frá 2019 (IPBES 2019). Alþjóðlegur vísindahópur á vegum Evrópusambandsins varaði við skógrækt með hraðvaxta tegundum og einrækt vegna neikvæðra umhverfisáhrifa, m.a. á vatnshag, líffjölbreytileika, alvarlegri afleiðinga skógarelda og þurrka, og hugsanlegra breytinga á frjósemi og samsetningu jarðvegs (Jackson o.fl. 2005). Samskonar ályktun var birt í skýrslu IPBES (2019), vísindaarms samningsins um verndun líffræðilega fjölbreytni (sjá einnig Wang og Cio 2011).

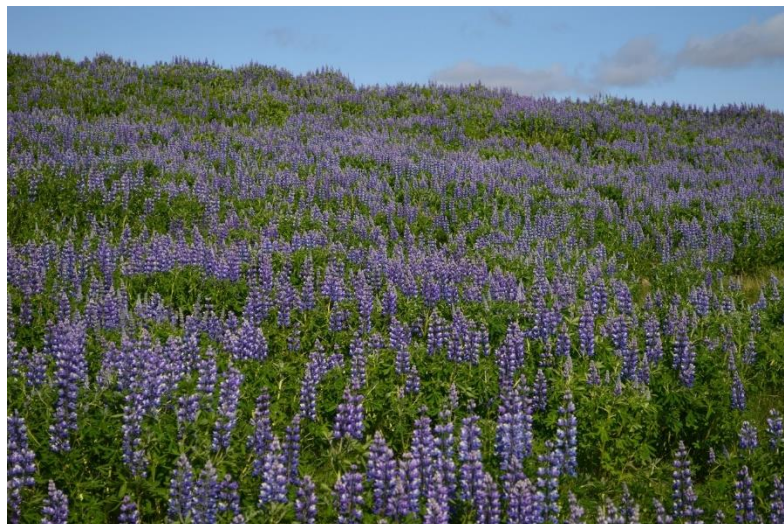
Stórfelld landgræðsla og endurheimt vistkerfa þarf að miða að endurheimt fjölbreyttra búsvæða. Þannig má t.d. ekki ganga of nærri opnu gróðurlendi sem er mikilvægt búsvæði vaðfugla (Tómas Grétar Gunnarsson 2020). Þá er rétt að hafa í huga að endurheimt á landslagsskala gæti m.a. orðið til endurheimtar á votlendissvæðum, sem eykur fjölbreytni í búsvæðum þar sem nú eru auðnir auk annarra mikilvægra búsvæða fugla. Markmiðssetning, góður undirbúningur og vönduð eftirfylgni eru nauðsynlegir þættir aðgerða af þessu tagi.

Aðgerðir sem ætlaðar eru til að auka bindingu á kolefni geta leitt til tímabundinnar losunar gróðurhúsalofttegunda, t.d. þegar rásir eru plægðar í land (mynd 21) þar sem kolefni er fyrir í moldinni, en þá er hætt á að losni CO₂ og jafnvel N₂O úr yfirborðslögum moldarinnar. Mikilvægt er að mæla hvort og þá hve mikil losun á sér stað og taka hana með í reikninginn þar sem hún er til staðar. Framboð á nitri getur aukist í byrjun ef kolefnið tekur að oxast vegna rásanna, sem örvar vöxt plantna í upphafi, auk þess sem rásirnar mynda skjól fyrir viðkvæmar unglöntur – hvorutveggja þættir sem sóst er eftir þegar skógi er komið á legg. Einnig þarf að taka tillit til áburðargjafar í upphafi landgræðsluaðgerða, því áburður getur haft umtalsvert kolefnisspor. Ör aukning á nitri í kolefnisríkum kerfum getur örvað losun kolefnis, þar til jafnvægi í C/N hlutfalli í moldinni er náð á ný.



Mynd 21. Rásir sem plægðar voru í mólendi sem var í örri framvindu af sjálfsdáðum. Víðir og birki voru tekin að breiðast út og leiða má líkum að því að kúrfa fyrir hraða kolefnisbindingar hafi verið vaxandi. Rásir í moldina geta valdið losun á CO_2 sem verður að mæla og taka með í reikninginn ef tilgangurinn er binda kolefni. Hér var plantað lerki og birki og etv. fleiri trjategundum. Aðgerðir sem þessar í nafni kolefnisbindingar eru umdeilanlegar. Myndir teknar árið 2020.

Endurtekin notkun á innfluttum tegundum sem virðast henta til notkunar á nýjum svæðum getur leitt til þess að þær verði ágengar með tímanum (Menja von Schmalensee 2010a,b). Segja má að áhrif innfluttra tegunda séu oft ekki nægjanlega vel þekkt enda geta þau tekið marga áratugi eða árhundruð að koma fram. Menja von Schmalensee (2010a,b) birti aðgengilegt yfirlit um áhrif ágengra tegunda í *Náttúrufræðingnum*. Notkun lúpínu til landgræðslu á Íslandi er ákaflega umdeild (mynd 22). Lúpínan er dæmigerð ágeng innflutt tegund sem varað er við að nota vegna neikvæðra umhverfisáhrifa, svo sem á líffjölbreytileika. Þá vantar frekari rannsóknir á áhrifum lúpínu á fleiri umhverfisþætti en gróðurþekju og kolefni í jarðvegi, svo sem á vatnshag, myndun holklaka og losun N_2O (mjög öflug gróðurhúsalofttegund). Notkun lúpínu til kolefnisbindingar getur ekki talist raunhæf aðgerð til kolefnisbindingar út frá umhverfissjónarmiðum.



Mynd 22. Lúpína við línuveginn á Uxahryggjum. Umdeild aðferð við uppgræðslu. Kosturinn er lítill stofnkostnaður og héðan mun hún dreifa sér um ógróið land, en útkoman er þó umdeilanleg og getur haft neikvæð umhverfisleg áhrif.

Skógrækt er sannarlega ein af meginstoðum mannlífs á jörðinni og skógarafurðir eru nýttar með fjölbreytilegri hætti en hægt er að gera sér í hugarlund. Framleiðsla skógarafurða er því nauðsynleg, rétt eins og framleiðsla á fæðu á ökrum og með beit – einnig á Íslandi. En hér er verið að varpa ljósi á afar neikvæð alþjóðleg umhverfisgildi er varða einræktun skógar til kolefnisjöfnunar (fleiri en ein tegund innfluttra tegunda breytir þar litlu um). Árangur og umhverfisáhrif eru vitaskuld háð aðstæðum hverju sinni, skógrækt getur líka haft jákvæð áhrif með því að minnka rof og flóðahættu, en þá sérstaklega náttúrulegir skógar sem eru sambærilegir við þá sem áður voru á viðkomandi svæði. Notkun á staðar-efniviði er oft á tíðum öruggasta leiðin fram á við þegar binda á kolefni.

10. Kolefnisbinding í skógrækt og landgræðslu

10.1. Núverandi binding

Unnt er að binda mikið magn kolefnis með landgræðsluaðgerðum 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 alaskaaspartaugum. Meðaltal fyrir sitkagreni er 8,3 t CO₂-ígildi/ha, um 7 t CO₂-ígildi/ha fyrir stafafuru (sbr. grein Arnórs Snorrasonar o.fl. 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). Binding í skógrækt á landinu nemur nú um 352 þúsund CO₂-ígilda á ári (Keller o.fl. 2019, bls. 126). Arnór Snorrason o.fl. (2018) töldu að með aukinni skógrækt gæti binding numið > 1 milljón CO₂-ígilda á ári um miðja öldina og um leið yrði landið sjálfbjarga um framleiðslu á margvíslegum mikilvægum skógarafurðum. Með skógrækt er fyrst og fremst verið að binda kolefni í viði sem er ekki til umræðu að öðru leiti í þessu riti en er getið hér til samanburðar. Þó er skógrækt einnig stunduð á lítið 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 flatarmálseiningu en yfirleitt unnið er 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 gaf til kynna bindihraða sem var yfirleitt nálægt 0,06 kg C/m² á ári, eða 2,2 t CO₂-ígilda/ha á ári (Ólafur Arnalds o.fl. 2000, 2002). Nákvæmar rannsóknir á uppsöfnun í tilraunareitum á Geitasandi fyrstu 7 ár uppgræðslu gáfu svipaðar niðurstöður þar sem sáð hafði verið í og borið á (Ólafur Arnalds o.fl. 2013) en hraðinn minnkaði í nokkrum reitum og var að meðaltali 0,04 kg C/m² á ári næstu 5 árin (Tanner o.fl. 2015). Svæðið á Geitasandi er erfitt viðureignar vegna óstöðugleika og harðpönnu undir yfirborðinu og hinir uppgræddu tilraunareitir með ógrónum svæðum umhverfis urðu fyrir stöðugu áfoki sem hægði á framvindu. Páll Kolka-Jónsson (2011) fékk gildið 0,047 kg C/m² á ári í misgömlu uppgræðslum á Suðurlandi. Landgræðslan notar gildið 0,051 kg C/m² á ári fyrir landgræðslu við skýrslugjöf til Loftslags-samnings S.þ., sem einnig byggir á mælingum Landgræðslunnar sem ekki hafa verið birtar ennþá. Þessi stuðull samsvarar 1,9 CO₂-ígilda á ha á ári (fyrir árið 2017; Keller o.fl. 2019, bls 147), en einnig hefur stuðullinn 2,1 t CO₂-ígildi á ári verið notaður og er þá aukning í gróðri tekin með.

Stærð landgræðslusvæða er um 293 þúsund ha (2930 km²) samkvæmt loftslagsbókhaldi landsins (Keller o.fl. 2019). Bindingin nemur um 148 000 t C á ári eða 546 þúsund t CO₂-ígilda á ári en 607 þúsund t CO₂-ígilda á ári ef binding í gróðri er meðtalin (Keller o.fl. 2019, bls, 126 og 159). Því er ljóst að landgræðsla og skógrækt skila nú tæplega 1 milljón t CO₂-ígilda á ári bindingu kolefnis, sem er afar mikilvert og gefur áheiti um hvað unnt væri að gera með aukinni áherslu á líffræðilegar aðferðir við bindingu kolefnis.

10.2. 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 (Ólafur Arnalds 2020). Þetta á m.a. við heilu afréttina, svo sem Biskupstungnaafrétt (mynd 23.), Landmannafrétt og Rangárvallafrétt svo dæmi séu tekin af Suðurlandi (Ólafur Arnalds o.fl. 1997, Ólafur Arnalds 2019, 2020, Grólinð 2020). Þá hefur kolefnisforði lækkað verulega í mörgum þurrlandisvistkerfum vegna langvarandi nýtingar og líklegt er að losun slíkra kerfa nemi nú um 1-8 milljón t CO₂-ígilda á ári, eins og áður var rætt. Mikilvægt er að auka áherslu á að stöðva þessa losun og auka bindingu í illa förnum vistkerfum.



Mynd 23. Illa farið afréttarsvæði á Suðurlandi. Biskupstungnaafréttur er ennþá nýttur til beitar (árið 2020). 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.

Þörf er á nýrri sýn á nýtingu lands í slæmu ástandi (sjá Ólaf Arnalds 2019, 2020). Fyrsta skrefið er að viðurkenna vandann og átta sig á því að hagaðilar er varða nýtingu stórra afréttarsvæða eru ekki einvörðungu sauðfjárbændur sem reka á fjall. Bætt ástand landsins, vistheimt og fjölpætt nýting á borð við bindingu kolefnis ættu að verða meginmarkið nýtingar þessara svæða. Slík sýn er mjög í anda alþjóðlegrar þróunar og er fullkomlega tímabær á áratug SP um vistheimt (e. ecological restoration, áratugurinn 2021-2030).

Vistheimtarverkefni á stórum skala 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 samsvorar 1,9 t CO₂-ígilda á ha á ári, sem er bindistuðull sem notaður er við loftslagsbókhald landsins (Keller o.fl. 2019). En nú er rétt að lyfta mælikvarðanum upp á ferkílómetra þegar tekið er að hugsa á landslagsskala og þá verður gildið 190 t CO₂-ígilda á km² á ári. Þá er binding í gróðri ekki meðtalin. Hér er hugsunin sú að klæða landið með birkiskógi (þó með opnum graslendissvæðum og votlendum þar sem við á). Meðaltalsstuðlar í ofanjarðarvexti í birki 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 1000 km² afréttarsvæði getur bundið 490 – 590 þúsund tonn CO₂-ígilda á ári í mold og gróðri, en 190 000 tonn CO₂-ígildi 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 og mæla breytingar þegar frá upphafi aðgerða.

Hraði kolefnisbindingar er misjafn á milli svæða og í tíma eftir því sem vistkerfin þróast og hann getur orðið örari eftir því sem vistkerfinu vindur fram, allt þar til jafnvægi kolefnis og umhverfis er náð, oft við 8-12 %C í birkiskógum. Athyglisvert er að dreifa bindingu sem fælist í 6% hækkun C gildis að jafnaði í efstu 20 cm jarðvegsins á 100 ár, sem er raunhæf hækkun fyrir land neðan 200-300 m hæðarmarka. Með því fæst samburður við útreikningana hér að ofan sem sýndu bindingu upp á 190 000 tonn CO₂-ígildi á ári í moldinni á 1000 km² svæði. Aukning hlutdeildar kolefnis um 6% í mold getur orðið bæði á illa grónu landi og mjög rýru mólendi sem friðað er fyrir beit, með markvissum inngripum til að gera ógróið land stöðugra og með aðgerðum sem stuðla að sjálfsáningu birkis. Hér verður aðeins litið til moldarinnar til að byrja með. Sums staðar yrði hækkunin meiri en þessi 6% sem hér er gert ráð fyrir, en annars staðar minni – hún yrði ójöfn í landslaginu eftir aðstæðum á hverjum stað. Miðað er við að í lok tímabilsins verði rúmþyngd moldarinnar 0,65 t/m³, sem kann að vera vanmetið (hærrí rúmþyngd leiðir til hærri gilda í útreikningunum hér fyrir neðan). Kolefnisforði í moldinni væri þá, miðað við meðaltalshækkun um 6% í efstu 20 cm moldarinnar og 0,65 t/m³ rúmþyngd:

$$6/100 \times 0,20 \text{ m} \times 0,65 \text{ t/m}^3 = 0,0078 \text{ t/m}^2 \text{ (7,8 kg C/m}^2\text{)}$$

Og fyrir 1000 km² = 7,8 milljón tonn C í 1000 km² mold

Sem samsvarar 28,6 milljónum tonna CO₂-ígilda í 1000 km² af moldaryfirborði. Reiknað er með að þessi hækkun geti orðið á 80-120 árum, sem er raunhæft neðan 200-300 m hæðar í landinu – 100 ár að meðaltali. Bindingin væri þá 0,078 kg C/m² á ári. Í stuðlum fyrir landgræðslu í kolefnisbókhaldi landsins (árið 2017, Keller o.fl. 2019) er gert ráð fyrir 0,051 kg C/m² á ári eins og fyrr sagði. Bindingin sem er reiknuð út frá 6% meðalhækkun kolefnisgildis í efstu 20 cm moldarinnar að meðaltali er því af sambærilegri stærðargráðu en þó nokkuð örari. Hér er gert ráð fyrir markvissum inngripum til að tryggja að skógur breiðist út um allt svæðið (inngríp til að hraða þróuninni), sem væri jafnvel kostuð af sölu kolefnisbindingar (sjá næsta undirkafla), og því er eðlilegt að heldur hærri gildi fáist. Samsvörun gilda um bindingu sem hér voru fengnar með óháðum aðferðum er nokkuð góð.

Ef litið er til heildarsvæðisins (1000 km² í þessu tilfalli) bindur svæðið að meðaltali 280 000 CO₂-ígildi á ári í moldinni. Þá er bindingin í birkiskóginum ekki meðtalin en sú binding gæti numið 3-4 t/ha, eða 300-400 000 tonn CO₂-ígilda á svæðinu öllu á ári (þ.e. 1000 km²), þ.e. tvöföld bindingin í moldinni þegar framvindan væri komin á stað á öllu svæðinu. Því má reikna með að bindingin geti numið 500-600 þúsund CO₂-ígildi á hverja 1000 km² á ári á landi sem tekið er undir vistheimt og klætt birkiskógi á ný (sama stærðargráða og í dæminu um vistheimt með birki hér á undan).



Mynd 24. Birkiskógur að vaxa upp á Skeiðarársandi, dæmi um aukna kolefnisbindingu á landslagsskala. Manneskja til vinstri gefur mælikvarða fyrir myndina sem er tekin í um 15 m hæð. Mjög öflugar fræuppsprettur innan þjóðgarðsins í Skaftafelli gefa nægt fræregn á stórt 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.

10.3. Peningar

Þegar er horft til bindingar kolefnis í vistkerfum er höfuðatriðið vitaskuld að huga að umhverfislegum og samfélagslegum ávinningi slíkra verkefna og að mikilvægi þess að nýting auðlinda landsins sé sjálfbær. En hér skal þó getið um einn anga málaflokksins sem snýr að kolefni og landi: peningar. Markaður fyrir hvert bundið kolefnistonn á líklega eftir að þróast á næstu árum en á þessu stigi má ætla að verðið geti orðið 8-25 €/t CO₂-ígildi samkvæmt heimasíðum alþjóðafyrirtækja sem sérhæfa sig í slíkum viðskiptum. Verðmæti 280 000 tonna aukningar kolefnis í moldinni væri þá u.þ.b. 350 – 11 000 milljónir kr á ári (gengi € á 160 kr). Heildarverðmæti bindingar á 1000 km² þegar búið er að taka birkið með í reikninginn væri þá 630 – 27 000 milljónir kr á ári. Ekki er gott að segja hvort markaður með CO₂-ígildi á Íslandi þróist með þessum hætti, þessar háu fjárhæðir eru með nokkrum ólíkindum – hér verður tíminn að skera úr um þróunina. Upphæðir af þessu tagi sýna þó vel hve mikil verðmæti geta falist í kolefnisbindingu í framtíðinni fyrir utan umhverfislegan ávinning sem er ekki síður mikilvægur. Með verkefnum af þessu tagi minnka einnig líkur á að þjóðin þurfi að borga himinháar „sektir“ vegna mikillar losunar umfram samninga, bindingin kemur þarna á móti.

11. 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 eru til. Ísland er í einstakri stöðu er þetta varðar. Í þessu riti hefur verið leitast við að varpa ljósi á kolefnisbúskap landsins með áherslu á moldina. Endurheimt vistkerfa er meðal mikilvægustu aðgerðanna sem hægt er að hagnýta til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og binda þær. Þá þarf að stíga löngu tímabær skref til að laga beitarnýtingu að landgæðum: kolefnisspor beitar á illa farið land er „stjarnfræðilega“ þungt. Landið er langsamlega stærsti losunarpátturinn á Íslandi og þar liggja líka möguleikarnir til að ná árangri. Um leið er stuðlað að endurheimt landgæða – komandi kynslóðum til hagsbóta. Hér er birt aftur tafla sem er að finna fremst í kaflanum, en á undan hafa forsendurnar fyrir tölunum í töflunni verið skýrðar ein af annarri í mismunandi hlutum ritsins. Óvissan fyrir ýmsa liði töflunnar er þó afar mikil. Þessi þekkingarskortur er ákaflega bagalegur – í raun alls ekki líðandi – miðað við mikilvægi þessa málaflokks.

Tafla 9. Yfirlit um losun og binding gróðurhúsalofttegunda á Íslandi. Losun sem venjulega er gefin upp er um 5 milljónir tonna CO₂-ígilda, en þá er önnur losun ekki talin. Taflan var einnig birt fremst í kaflanum.

Aðgerð - ferlar	Milljón tonn CO ₂ -ígildi á ári	Athugasemdir
Losun án landnýtingar (samgöngur, iðnaður o.s.frv.)	Um 5	Losun talin fram af Íslandi til Loftslagssamnings SP, landið ekki meðtalið
Losun frá votlendum, óframræstum og framræstum	Um 10	Hægt að minnka frá framræstum votlendum með endurheimt
Losun frá þurrlandi (hnignun vistkerfa)	1 – 8	Getur verið >8 milljón tonn samkvæmt sumum sviðsmyndum
Binding í mold vegna áfoks – nú	0,5 – 1	Háð beitarálagi
Binding í mold við beitarfriðun – nú	0,2 – 1	Óljóst. Háð því hve mikið friðað
Binding við bættu landnýtingu – nú	0,5 – 1	Óljóst. M.a. minnkuð beit
Binding í landgræðslu – nú	0,61	Framtal til Loftslagssamnings SP
Binding í skógrækt – nú	0,35	Framtal til Loftslagssamnings SP
Binding vegna veðrunar og efnarofs	3,1	Endar í hafi. Ekki talið fram til SP Takmörkuð áhrif mannsins
Möguleg binding í mold við vistheimt á landslagsskala	2 – 10	Háð áræðni við friðun útjarðar í slæmu ástandi og inngrípum

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 geta í auknum mæli miðast við bindingu og að minnka losun gróðurhúsalofttegunda og stuðning við vistheimt. Hér var lögð áhersla á að forðast neikvæð umhverfisáhrif af aðgerðum 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 þurrlandi með bættu landnýtingu – og með aukinni skógrækt og vistheimt á landslagsskala (þúsundir km²) má fara langt á þeirri braut að gera Ísland að kolefnishlutlausri þjóð. Til mikils er að vinna.



Mynd 25. Vistheimt í Þórsmörk. Svæðið sem sést var að mestu orðið skóglaut áður en Mörkin var friðuð. Sums staðar var sáð og borið á moldir, víðistiklum var stungið niður á nokkur svæði og fleira gert, en inngrip voru þó fremur takmörkuð miðað við heildarstærð svæðisins. Þróunin tók kipp eftir að friðun svæðisins fyrir beit var bætt með beitarfriðun Almenna um 1990 (Hreinn Óskarsson, munnleg heimild). Myndin er tekin árið 2020.

Heimildir

Arnór Snorrason, Bjarni D Sigurðsson, Grétar Guðbergsson, Kristín Svavarsdóttir, Þorbergur Hjalti Jónsson 2002. Carbon sequestration in forest plantations in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 15:81-93.

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

Arnór Snorrason, Þorbergur Hjalti Jónsson, Ólafur Eggertsson 2019. Above woody biomass of natural birch woodland in Iceland – Comparison of two inventories 1987-1988 and 2005-2011. *Icelandic Agricultural Sciences* 32:21-29.

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

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

Bergrún Arna Óladóttir, Olgeir Sigmarsson, Guðrún Larsen, Jean-Luc 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, G Burtin 2007. Organo-mineral clay and physical properties in COST-622 European volcanic soils. Í: Ólafur Arnalds, F Bartoli, P Buurman, H Oskarsson, G Stoops, E Garcia-Rodeja (ritstj.) *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer, Heidelberg, Þýskaland, bls. 469-491.

Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D Sigurðsson, 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, 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,

Bændablaðið 2020. 6. febrúar: viðtal við Unnstein Snorra Snorrason, bls. 2. 5. mars: Aðkoma sauðfjárbænda verður að batna. Unnsteinn Snorri Snorrason og Guðfinna Harpa Árnadóttir, bls. 45. 2. apríl: Niðurstöður sauðfjárskýrsluhaldsins árið 2019. Eypór Einarsson, bls. 44-45.

Cristensen TR, A Ekberg, L Ström, M Mastepanov, N Panikov, M Öquist, BH Svensson, H Nykänen, PJ Martikainen, 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

Eva Ritter 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.

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

FAO 2020. You want to reduce the carbon footprint of your food? Focus on what you eat, not whether your food is local Hannah Ritchie/FAO Our World data, <https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local>

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

Fanney Gísladóttir, Jón Guðmundsson, Sunna Áskelsdóttir 2010. Mapping and density analyses of drainage ditches in Iceland. Mapping and monitoring of Nordic Vegetation and landscapes, Conference proceedings. Í: Viten fra Skog og landskap, Ritstj. B Anders. W Dramstad, WJ Fjellstad, Publisher: Norsk Institutt for Skog og Landskap, -1/10., Pb 115, no-1431 Ás, Noregi.

Guðrún Gísladóttir, Egill Erendsson, R Lal R, 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.

GróLind 2020. Stöðumat á ástandi gróður- og jarðvegsauðlinda Íslands. Bryndís Marteinsdóttir, Elín Fjóra Þórarinsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jóhann Helgi Stefánsson, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Magnús Þór Einarsson, Sigbrúður Jónsdóttir og Sigmundur Helgi Brink. www.grolind.is

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, Bandaríkin.

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, 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 votlendisvístölnunar við íslenskar aðstæður. B.Sc. 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. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth og 22 fleiri (ritstj.). Intergovernmental Science-Policy GPlatform 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, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Ritstj.: T Hiraishi, T Krug, K Tanabe, N Srivastava, J Baasansuren, M Fukuda, TG Troxler, Published: IPCC, Genf, Sviss.

Jackson RB, EG Jobbágy, R Avissar, S Baidya Roy, DJ. Barrett, CW Cook, KA Farley, DC le Maitre, BA McCarl, BC Murray 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science* 310:1944-1947, sjá einnig https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/7na3_en.pdf

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

Jón Guðmundsson, 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 Rós Einarsdóttir, Ásta Karen Helgadóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson, Leone Tinganelli 2019. National Inventory Report 2019. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990-2017. Umhverfisstofnun, Reykjavík.

Keller, N., M. Stefani, Sigríður R. Einarsdóttir, Ásta K. Helgadóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson, 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 DB, KB Hulvey, RJ Hobbs, M Colyvan, H Possingham, W Steffen, K Wilson, K Youngentob, P Gibbons 2012. Avoiding bio-perversity from carbon sequestration solutions. *Conservation Letters* 5: 28-36.

- Menja von Schmalensee 2010a. Vágestir í vistkerfum. Fyrri hluti. Stiklað á stóru um framandi ágengar tegundir. Náttúrufræðingurinn 80: 15-23.
- Menja von Schmalensee 2010b. Vágestir í vistkerfum. Seinni hluti. Framandi og ágengar tegundir á Íslandi. Náttúrufræðingurinn 80: 84-102.
- Mitsch WJ, JG 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, Niðurlöndin. Kaffar 6, 8 og 11.
- Ólafur Arnalds 2019. Á röngunni. Alvarlegir hnökrar á framkvæmd landnýtingarpáttar gæðastýringar í sauðfjárrækt. Landbúnaðarháskóli Íslands, Rit Lbhí nr. 118.
- Ólafur Arnalds 2020. Ástand lands og hrun íslenskra vistkerfa. Rit Lbhí nr. 130.
- Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson 2008. Íslenskt jarðvegskort. Náttúrufræðingurinn 78:107-121.
- Ólafur Arnalds, Grétar Guðbergsson, 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. In: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. J.M. Kimble, R. Lal, ofl. (ritstj.). CRC Press, New York. Bls. 267-280.
- Ólafur Arnalds, Berglind Orradóttir, Ása L Aradóttir 2013. Carbon accumulation in Icelandic desert Andosols during early stages of restoration. Geoderma 193-194: 172-179.
- Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink, Fanney Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36: 759-769.
- Ólafur Arnalds, Elín Fjóra Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson, Arnór Árnason 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.
- Páll Kolka-Jónsson 2011. CarbBirch (Kolbjörk): Carbon sequestration and soil development under mountain birch (*Betula pubescens*) in rehabilitated areas in southern Iceland. MSc ritgerð, Ohio State University, Environment and Natural Resources, Columbus, Ohio, Bandaríkin.
- Rannveig Anna Guichardnaud 2002. Rúmpýngd í íslenskum jarðvegi. BS ritgerð, Jarð- og landfræðiskor, Háskóli Íslands.
- Ripoll-Bosch R, IJM de Boer, A Bernues, TV 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 2008. Weathering in Iceland. Jökull 58: 387-408.
- Sigurður Reynir Gíslason 2012. Kolefnishringrásin. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið Íslenska Bókmenntafélag, Reykjavík.
- Sigurður Reynir Gíslason, EH Oelkers, Eydís Sigurdís Eiríksdóttir, MI Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir O Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P Torssander, Níels 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, Umhverfiseild. Hvanneyri.
- Sveinn P Jakobsson, Kristján Jónasson, Ingvar A Sigurðsson 2008. The three igneous rock series of Iceland. Jökull 58:117-138.

Tarnocai C, JG Canadell, EAG Schuur, P Kuhry, G Mazhitova, S Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23: GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.

Tanner LH, M Vivison, Ólafur Arnalds, Kristín Svavarsdóttir 2015. Soil Carbon Accumulation and CO₂ Flux in Experimental Restoration Plots, Southern Iceland: Comparing Soil Treatment Strategies. *Applied and Environmental Soil Science* 2015:205846.

Tómas Grétar Gunnarsson 2020. Búsvæði og vernd íslenskra vaðfugla. *Náttúrufræðingurinn* 90: 145-162.

Umhverfisstofnun 2019. Úrdráttur úr losunarbókhalda Íslands 2019. Vefur Umhverfisstofnunar.

Valentini R, G Matteucci, A Dolman, E Schulze, C Rebmann, E Moors, A Granier, P Gross, N Jensen, K Pilegaard, A Lindroth, A Grelle, C Bernhofer, T Grunwald, M Aubinet, R Ceulemans, A Kowalski, T Vesala, U Rannik, P Berbigier, D Loustau, J Gudmundsson, H Thorgeirsson, A Ibrom, K Morgenstern, R Clement, J Moncrieff, L Montagnani, S Minerbi, P Jarvis 2000. "Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests." *Nature* 404(6780): 861-865

Wang Y, 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.

Póra Ellen Þórhallsdóttir, Jóhann Þórsson, Svafa Sigurðardóttir, Kristín Svavarsdóttir, Magnús H Jóhannsson 1998. Röskun votlendis á Suðurlandi. Í: (Jón S Ólafsson ritstj.) *Íslensk votlendi. Verndun og nýting*. Háskólaútgáfan, Reykjavík. Bls. 131-142.