



Endurheimt votlendis á tveimur jörðum og vöktun á árangri



Landgræðslan 2022

Lg 2022/09



Landgræðslan

Skýrsla nr. Lg 2022/09

Tilvísun nr. 2020-724 – 20.6.4

Dagsetning 2022.07.07

Fjöldi blaðsíðna 22

Forsíðumynd Sunna Áskelsdóttir

Heiti Endurheimt votlendis á tveimur jörðum og vöktun á árangri

Höfundar Sunna Áskelsdóttir, Ágústa Helgadóttir, Ölvir Styrmisson

Verkefnisstjóri Sunna Áskelsdóttir

Unnið í samstarfi við Landsvirkjun

Útdráttur Árið 2019 hófst þriggja ára samstarfsverkefni Landsvirkjunar og Landgræðslunnar um endurheimt votlendis til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda. Jafnframt var lögð áhersla á að auka faglegra þekkingu við að endurheimta votlendi. Tvö svæði í ríkiseigu voru valin; Ytri-Hraundalur á Mýrum og Sogn í Ölfusi. Verkefnið skiptist í þrjú verkþætti: a) mismunandi verklag við að fylla upp í skurði og við frágang á efnistökusvæðum, b) vöktun á breytingum á grunnvatnshæð og losun á koldíoxíði og metani og c) árangur á mismunandi meðferða við að flýta fyrir landnámi staðargróðurs í rasksárum. Niðurstöður gefa til kynna að það borgar sig að vanda mjög til verka við framkvæmd og nýta allar gróðurtorfur til yfirborðsþekkingar en grafa þær ekki. Það tekur lítið lengri tíma en árangur verður betri. Meðalgrunnvatnshæð svæðanna hefur hækkað við endurheimt, mismikið þó. Losun koldíoxíðs minnkaði marktækt við endurheimt á svæðunum tveim en ekki var marktækur munur á losun metans fyrir og eftir endurheimt. Meðferðir til að flýta fyrir endurheimt staðargróðurs voru misárangursríkar. Meðferðin að *torfur* kom best út á Ytri-Hraundal en aðrar voru árangurslitlar. Á Sogni var bestur árangur af sáningu á einæru rýgresi en þar gróa rasksárin fljótt upp án meðferða.

Efnisorð

Endurheimt votlendis, vöktun, gróðurhúsalofttegundir, framkvæmd, landnám staðargróðurs, rasksár, verklag við endurheimt votlendis, fræslægja, gróðurtorfur, gróðurframvinda

Undirskrift verkefnisstjóra

Efnisyfirlit

Inngangur.....	1
Aðdragandi	3
Markmið	3
Efni og aðferðir	3
Rannsóknarsvæði	3
Sogn í Ölfusi.....	3
Ytri- Hraundalur.....	4
Verkþættir	4
a) Mismunandi verklag.....	4
b) Vöktun á árangri	5
c) Örvun staðargróðurs.....	6
Gagnaúrvinnsla.....	9
Niðurstöður.....	10
a) Mismunandi verklag.....	10
b) Vöktun á árangri	11
Jarðvegseiginleikar	11
Jarðvegshiti.....	12
Grunnvatnshæð	12
Losun gróðurhúsalofttegunda	13
c) Örvun staðargróðurs.....	14
Umræður	17
a) Mismunandi verklag.....	17
b) Vöktun á árangri	18
c) Örvun staðargróðurs.....	20
Lokaorð.....	20
Heimildaskrá	21

Inngangur

Votlendi eru dýrmæt vistkerfi sem gegna mörgum hlutverkum og veita ómetanlega vistkerfisþjónustu. Þau eru mikilvæg búsvæði lífvera sem eru aðlöguð að aðstæðum þar og gegna mikilvægu hlutverki við miðlun og geymslu vatns og næringarefna. Votlendi eru talin þekja um 3% lands á jörðinni en geyma um 30% þess kolefnis sem finnst í vistkerfum heims (Joosten ofl., 2016). Votlendi heimsins eiga undir höggi að sækja og stórum hluta þeirra hefur verið raskað og við það hefst tap á kolefninu sem geymt er í jarðveginum. Við framræslu lækkar vatnsstaðan og loft kemst að lífrænu efni jarðvegs sem áður var varið af vatnsmettuðum og súrefnissnauðum aðstæðum. Við það hefst rotnun og kolefnið losnar sem koldíoxíð. Tvær aðrar lofttegundir, metan og hláturgas, hafa líka áhrif á búskap gróðurhúsalofttegunda í votlendi. Þær hafa báðar mun hærri hlýnunarstuðul en koldíoxíð en losna í minna mæli. Metan verður til við loftfirrða rotnun í súrefnissnauðu umhverfi og losnar því frekar úr náttúrulegu eða endurheimtu votlendi. Hláturgas verður til við ferla nitrunar og afnitrunar og losnar frekar úr röskuðu votlendi (Martikainen o.fl., 1993). Losun gróðurhúsalofttegunda er þannig mjög tengd grunnvatnsstöðu í votlendi, þar sem koldíoxíð losnar þegar jarðvegur er loftaður og metan þegar aðstæður eru loftfirrtar. Hitastig jarðvegs hefur einnig mikil áhrif á losun gróðurhúsalofttegunda þar sem öll virkni eykst við hærri hitastig. Aðrir þættir hafa líka töluverð áhrif, svo sem næringarefnaástand og gæði þess lífræna efnis sem fellur til (t.d. Waddington o.fl., 2001)

Á Íslandi þekja ýmiskonar votlendi í misjöfnu ástandi um 20% af grónu yfirborði landsins. Vegna eldvirkni landsins og uppblásturs hafa íslensk votlendi hátt steinefnahlutfall sem leiðir til góðs framboðs af næringarefnum, hárrar rúmpýngdar og hás sýrustigs jarðvegs. Mikil gróska einkennir íslenskar mýrar og þekja æðplantna er mikil en barnamosa tiltölulega lítil þó að mikið sé um aðra mosa í sverði. Framleiðni svæðanna er mikil og því er þéttleiki vaðfugla mjög mikill (Arnalds o.fl., 2016).

Áætlað er að um 47% votlendis héraðs hafi verið raskað með framræslu. Umfangsmesta framræslan átti sér stað á um hálfri aldar tímabili á síðari hluta síðustu aldar. Í fyrstu til að auka við túnækt en einnig til að bæta beutiland, svo og nokkuð vegna vegagerðar og þurrkunnar byggingarlands (Umhverfis- og auðlindaráðuneytið, 2016). Mikið af því landi sem þurrkað var, er ekki í nýtingu í dag eins og fyrirhugað var og því kjörið til að endurheimta. Losun gróðurhúsalofttegunda úr framræstu votlendi héraðs var áætluð 8.486,3 kt (kílótonn) CO₂ ígildi árið 2019 og er mjög stór hluti þeirrar losunar héraðs sem má rekja til mannlegra athafna (Keller o.fl., 2021).

Tvær nálganir eru helst notaðar til að mæla búskap gróðurhúsalofttegunda í votlendi. Annars vegar mælingar á flæði gróðurhúsalofttegunda og hins vegar breytingar á kolefnisforða vistkerfis. Til þess að ná traustum mælingum á heildarflæði gróðurhúsalofttegunda með klefamælingum er mikilvægt að ná mjög þéttum og reglulegum mælingum. Eins er nauðsynlegt að mæla bæði flæði frá jarðvegi og plöntum (öndun frá frumbjarga og ófrumbjarga lífverum) og upptöku plantna á koldíoxíði með ljóstillífun. Einnig eru flæðismælingar með beinum háhraðamælingum með iðjufylgjutækni (Eddy covariance) notaðar. Hin nálgunin er að mæla

breytingar á kolefnisforða jarðvegs. Þá er mikilvægt að til staðar sé jarðvegslag eða dýpt sem hefur þekktan aldur og út frá því er svo hægt að reikna hvað jarðvegurinn hefur verið að binda eða tapa miklu kolefni árlega. Með þessari aðferð er ekki hægt að greina á milli hvort að kolefni sem tapast hafi verið koldíoxíð eða metan.

Báðar þessar nálganir hafa verið reyndar í rannsóknnum á kolefnisbúskap votlendis hérlendis. Flæðismælingar hafa verið gerðar á framræstri mýri í Borgarfirði þar sem mælt var tap á kolefni (Rannveig Ólafsdóttir, 2015). Þar var losun koldíoxíðs og metans mæld sem og tap á kolefni með afrennslisvatni og reyndist það samtals 18,3 t CO₂ ígildi ha⁻¹ ár⁻¹. Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson (2013) mældu einnig tap á kolefni í þrjú ár frá fimm mýrum í Borgarfirði. Reyndist það vera frá frá 14,7 til 30,3 t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹, mismunandi eftir svæðum og árum. Gunnhildur E. G. Gunnarsdóttir (2017) mældi breytingar á kolefnisforða jarðvegs og skoðaði tap á kolefni úr efsta jarðvegslaginu á átta svæðum á SV-landi miðað við öskulag með þekktan aldur. Tap á kolefni úr þessu efsta lagi jarðvegsins reyndist 0,7 – 3,1 t C ha⁻¹ ár⁻¹ (jafngildir 2,6 – 11,4 t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹).

Markmið endurheimtar er að ná fram eiginleikum vistkerfa sem hafa raskast við framræslu þannig að þeir verði sem líkastir því sem finnst í náttúrulegum mýrum. Reynsla af endurheimt votlendis hérlendis er takmörkuð bæði þegar litið er til stærðar svæða og í þess stutta tíma sem endurheimt hefur verið stunduð. Því eru upplýsingar um hvernig svæðin þróast til langs tíma einnig takmarkaðar. Við endurheimtar framkvæmdir myndast oft töluvert rask, sár koma í gróðurhuluna þar sem efni er tekið til uppfyllinga og stíflugerðar. Mjög misjafnt er hversu mikið þetta rask er og hversu fljótt sárin eru að gróa upp (Þórdís Björt Sigþórsdóttir, 2018). Tilraun hefur verið gerð hérlendis með að nýta fræslægu af votlendisgróðri til að græða upp rasksár sem gafst vel (Óskarsson o.fl., 2020). Einnig hefur verið prófað að sá einærum grastegundum til að græða sárin upp og útbúa set fyrir aðrar votlendistegundir t.d. í Friðlandinu í Flóa (Hlynur Óskarsson, 2017, munnleg heimild). Árangur mismunandi aðferða til að flýta fyrir því að rasksár í votlendi grói upp hefur ekki verið borinn saman hérlendis.

Árið 2016 fékk Landgræðslan það hlutverk að sjá um framkvæmd endurheimtar votlendis fyrir hönd ríkisins, samkvæmt sóknaráætlun í loftlagsmálum sem þá var sett fram. Sama ár var hafist handa við að veita styrki og ráðgjöf til endurheimtar votlendis. Árangur endurheimtar þeirra verkefna var fyrst og fremst metinn með sjónmati en á flestum svæðunum var líka komið fyrir vatnshæðarrörum þar sem grunnvatnshæð var mæld í nokkur skipti fyrir framkvæmd og svo í nokkur skipti eftir framkvæmd. Árið 2017 hóf Landgræðslan undirbúning á vöktun á árangri endurheimtar votlendis. Á fjórum svæðum þar sem endurheimt var fyrirhuguð var gerð ítarleg úttekt á grunnástandi og ákveðið að fylgjast nánar með þeim breytingum sem yrðu við endurheimt með reglulegum mælingum fyrir og eftir endurheimt. Frá síðsumri 2017 til hausts 2021 var farið á svæðin með um fjögurra vikna fresti, vor sumar og haust og gerðar mælingar á grunnvatnshæð, losun koldíoxíðs og metans og jarðvegshita.

Aðdragandi

Vorið 2018 óskaði Landsvirkjun eftir tillögum að verkefnum þar sem hún gæti komið að endurheimt votlendis og samhliða uppbyggingu á faglegri þekkingu. Landgræðslan lagði til að Landsvirkjun yrði aðili að vöktunarverkefni Landgræðslunnar sem þegar var í gangi á tveim vöktunarsvæðanna sem voru í eigu ríkisins. Að auki yrði samstarf um framkvæmd endurheimtarinnar og tilrauna því tengdu.

Markmið

Meginmarkmið samstarfsverkefnisins var að endurheimta votlendi á jörðunum Sogni í Ölfusi og Ytri-Hraundal á Mýrum og draga með því úr losun gróðurhúsalofttegunda. Samstarfssamningur um endurheimt votlendis skiptist í þrjá verkþætti og verða kaflaskipti skýrslunnar í samræmi við það:

- a) *Mismunandi verklag* – Prófað var mismunandi verklag við að fylla upp í skurði og við frágang á efnistökusvæðum við framkvæmd endurheimtarinnar.
- b) *Vöktun á árangri* - Breytingar sem urðu á grunnvatnshæð og losun koldíoxíðs og metans við endurheimt voru vaktaðar.
- c) *Örvun staðargróðurs* - Prófaðar voru mismunandi meðferðir til að flýta fyrir landnámi staðargróðurs á rasksvæðum sem verða til í kjölfar framkvæmda samanburður á meðferðirnar meðferðunum.

Efni og aðferðir

Rannsóknarsvæði

Sogn í Ölfusi

Svæðið sem endurheimt var 2019 er 20,7 ha af stærð, í um 60 m.y.s og liggur fyrir neðan bæjar og vegstæðið í örlítið aflíðandi hallandi til suðurs. Til austurs afmarkast það af uppblásnu þurrlendissvæði og til vesturs af djúpu gili. Norðan við svæðið eru framræst tún. Miðað við gamlar loftmyndir hefur rannsóknarsvæðið verið ræst fram á tímabilinu 1958 til 1969. Gróðurfar er fjölbreytt, einkennist af störum s.s. mýrarstör (*Carex nigra*), gulstör (*Carex lyngbyei*) flóastör (*Carex limosa*) og klórfífu (*Eriophorum angustifolium*) en grösum og vallendisgróðri á þurrari jörðum svæðisins. Móalag á svæðinu er djúpt, að jafnaði yfir 4 m og með háu innihaldi lífrænna efna (sjá töflu 3), hæst í miðju svæðisins en lægst næst jörðunum. Svæðið ber engin merki þess að hafa verið jarðunnið eða ræktað og sennilega verið nýtt sem beitarsvæði alla tíð. Hrossabeit var á svæðinu til ársins 2019 en síðan þá hefur það verið alveg friðað fyrir beit. Skurðirnir sem ræstu fram svæðið voru fyrir endurheimt um 3 m breiðir og 2-3 m djúpir og lengd þeirra rúmlega 1.800 m, beggja megin við þá alla voru rýrir skurðaruðningar. Veðurfarsþætti frá nálægum veðurstöðvum má sjá í töflu 1.

Tafla 1. Veðurfarspættir frá Ingólfsfjalli (lofthiti) og Kálfhóli (úrcoma), næstu veðurathuganarstöðum með samfelld gögn við Sogn. Sumar er skilgreint sem júní, júlí og ágúst. *Árin 2020 og 2021 voru 0-78 klukkutímar af mælingum ekki aðgengilegir, mismunandi milli breyta og ára.

	2018	2019	2020	2021
Uppsöfnuð úrkoma sumars (mm)	274	154	285	249
Usöfnuð úrkoma árs (mm)	1280	1110	1217	1237*
Meðalhiti sumars (C°)	10,1	11,6	10,8*	11,1
Meðalhiti árs (C°)	5,2	5,8	5,0*	5,3*

Ytri- Hraundalur

Svæðið sem endurheimt var 2019 er um 9,8 ha stórt í um 100 m h.y.s og liggur undir Svarfhólsmúla niður undir Melsá og hallar nokkuð til suður. Mikið vatn rennur frá múlanum niður að svæðinu og einnig eru þar merki um tíð skriðuföll. Gróðurfar svæðisins einkennist af stórum s.s. tjarnastör (*Carex rostrata*) og vetrarkvíðastör (*Carex chordorrhiza*) og klóffu (*Eriophorum angustifolium*) blönduðu fjalldrapa (*Betula nana*) og bláberjalyngi (*Vaccinium uliginosum*). Melaholt innan svæðis eru lítið gróin og þar sem slétt hafði verið úr skurðaruðningum var snarrótarpuntur (*Deschampsia cespitosa*) ríkjandi. Dýpt mólags svæðisins er mjög misjafnt frá nokkrum cm við melaholt til 2,5 m þar sem dýptin er mest. Jarðvegur er mjög ríkur af lífrænu efni (sjá töflu 3). Miðað við gamlar loftmyndir hafa skurðir verið grafnir á milli árána 1956 og 1978, líklega eitthvað fyrir 1971 þegar jörðin fer í eyði (Jakob Jónsson, o.fl., 1989) alls rúmlega 2.000 m. Ruðningar voru til staðar við hluta skurðanna en að hluta voru þeir útflattir og lítið nýtanlegir til uppfyllingar á skurðum. Lítil merki voru um jarðvinnslu og líklegt að svæðið hafi verið notað til sauðfjárbeitar í gegnum tíðina. Veðurfarspætti frá nálægri veðurstöð má sjá í töflu 2.

Tafla 2. Veðurfarspættir frá Fíflholti, næstu veðurathuganarstöð við Ytri-Hraundal. Sumar er skilgreint sem júní, júlí og ágúst. *Árið 2019 vantaði 23 daga í nóvember og 24 daga í desember af mælingum fyrir hita og úrkomu.

	2018	2019	2020	2021
Uppsöfnuð úrkoma sumars (mm)	191	108	223	222
Uppsöfnuð úrkoma árs (mm)	896	842*	844	766
Meðalhiti sumars (C°)	9,4	10,5	10,2	10,8
Meðalhiti árs (C°)	4,2	5,2*	4,1	4,4

Verkpættir

a) Mismunandi verklag

Verklega framkvæmdin var undirbúin með kortlagningu og nákvæmri skoðun. Eiginleikar svæðanna; gerð og staðsetning skurða og ruðninga, halli lands, aðkoma og rennsli vatns um svæðið voru kortlagðir bæði til að eiga upplýsingar um aðstæður fyrir framkvæmd en einnig til að nýta við skipulag endurheimtar. Ekki var nægt efni í skurðaruðningum við alla skurðina á svæðunum tveim og á Ytri-Hraundal vantaði þá alveg að hluta. Aðlaga þurfti framkvæmdirnar að því og fimm mismunandi aðferðir því prófaðar við verklag, ýmist einar og sér eða blandað saman;

- i) *Vanda til verka* – Allar gróðurtorfur voru vel nýttar, vallendisgróðurtorfur teknar af ruðningum og settar til hliðar, votlendisgróðurtorfur voru teknar úr botni og hliðum skurða og settar til hliðar. Jarðvegi úr ruðningum var mokað ofan í skurði og þjappað vel til að ná góðri festu svo að minni hættu sé á vatnsrofi og leka. Gróðurtorfum var svo dreift yfir rasksvæðið, bæði yfir gamla skurðinn og þar sem ruðningarnir höfðu verið. Um 30-40 cm há þverbönd voru gerð úr torfum og lögð þvert á skurði með reglulegu millibili til þess að dreifa vatni betur um svæðið og til að koma í veg fyrir að vatn nái að renna í fyrrum skurðstæði eða á öðrum óæskilegum stöðum og mynda vatnsrásir.
- ii) *Ekki vanda til verka* – Ruðningum var mokað beint ofan í skurð (án þess að nýta gróðurtorfur), þjappað reglulega og þverbönd gerð úr torfum líkt og í i). Tíma var ekki eytt í að lagfæra eða snyrta rasksvæðið þar sem ruðningarnir voru.
- iii) *Ruðningar nægir til uppfyllingar* – Skurðir fylltir með efni úr ruðningum og þverbönd sett með reglulegu millibili þvert á skurðstæðið.
- iv) *Litlir ruðningar* sem voru ekki nægir til uppfyllingar – Skipst var á að fylla rúmlega og tæplega í skurðina, þverbönd voru sett þvert á skurðstæðið með reglulegu millibili.
- v) Þar sem *engir ruðningar* voru til staðar – Efni til að stífla skurði var fengið með því að grafa tjarnir við hlið skurðar. Stíflur voru gerðar breiðar neðst og mjórri eftir því sem ofar dró um 1,5 m á breidd og með þverbandi efst líkt og í i).

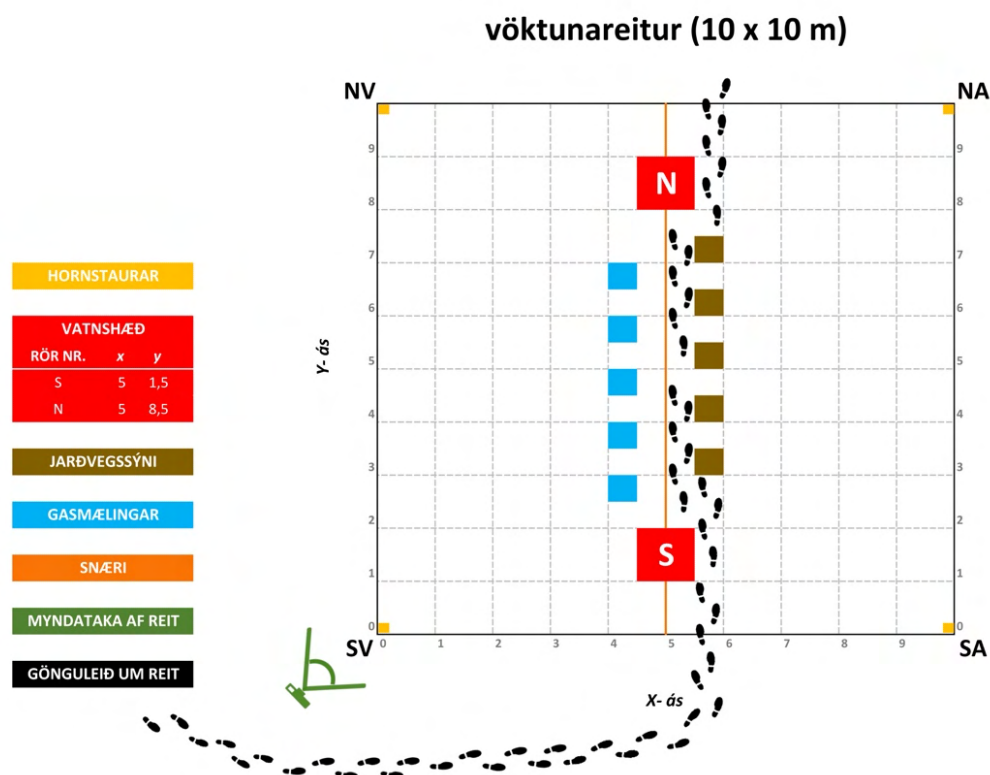
Verklegar framkvæmdir endurheimtarinnar fóru fram dagana 20.-28. ágúst 2019 á Ytri-Hraundal og 29. ágúst til 4. september á Sogni sama ár. Notuð var 21 tonna beltagrafa við framkvæmdina sem Bjarni Arnþórsson starfsmaður Landgræðslunnar stýrði. Framkvæmdatími og staðsetning voru mæld með GPS tæki til að tímasetja mismunandi aðferðir. Árangur verklegra framkvæmda var metinn með árlegum drónamyndatökum á svæðunum, athugunum á vettvangi og ljósmyndatöku.

b) Vöktun á árangri

Landgræðslan hóf vöktun á báðum svæðunum sumarið 2017 sem hluta af stærra vöktunarverkefni sínu. Jarðvegssýni voru tekin og gróður var mældur til að meta grunnástand. Í framhaldinu voru 12 vöktunarreitir lagðir út á Sogni og 5 reitir á Ytri-Hraundal. Á Ytri-Hraundal var einum viðmiðunarreit bætt við árið 2018 í þann hluta mýrarinnar sem var óröskuð, ekki var möguleiki á viðmiðunarreit á Sogni. Vöktunarreitir voru lagðir út handahófskennt og eru 10 x 10 m að stærð. Yfir reitinn miðjan var lagður ás (10 m) í S-N stefnu. Við 1,5 og 8,5 m voru sett niður vatnshæðarrör (sjá mynd 1). Til að koma fyrir vatnshæðarrörum var boruð hola, 7 cm í þvermál og ofan í hana sett götuð plaströr. Jarðvegssýni voru tekin úr öllum vöktunarreitunum, 5 sýni á 0-20 og 20-40 cm dýpt og þeim blandað saman í eitt sýni fyrir hverja dýpt í hverjum vöktunarreit. Að auki voru tekin rúmþyngdarsýni í báðum dýptum í öllum vöktunarreitum. Í sýnunum var mælt C%, N% og pH í vatni. Mælingar fóru fram vor, sumar og haust að undanskildu árinu 2017 þegar verið var að setja vöktunina upp og mælingar hófust seinna. Mælingar voru

gerða á um fjögurra vikna fresti á báðum svæðum fram til ársins 2021, í tvö ár fyrir endurheimt og tvö ár eftir endurheimt. Eftir að samstarfssamningur var gerður við Landsvirkjun voru farnar 7 mæliferðir 2019, 9 ferðir 2020 og 8 ferðir 2021.

Losun koldíoxíðs og metans frá jarðvegi og gróðri var mæld samtímis á staðlaðan hátt, þ.e. með samsettum mæli með ógegnsæjum lokuðum klefa (t.d. Baciú et al. 2018) á 5 punktum í reit (mynd 1). Mælirinn samanstendur af WS-CH₄-TLD metanmæli og LI820 koldíoxíðmæli. Mæld er breyting á styrkleika lofttegunda í klefa með tíma. Eingöngu var mælt með ógegnsæjum klefa og því var aðeins mæld losun eða öndun frumbjarga og ófrumbjarga lífvera. Engin mæling á bindingu eða ljóstíllífun var gerð. Á sömu punktum var jarðvegshiti á 10 cm dýpi mældur með jarðvegshitamæli. Grunnvatnshæð var mæld með því að mæla hversu djúpt var á yfirborð vatns innan vatnshæðarrörs.



Mynd 1. Skema af skipulagi vöktunarreits

c) Örvun staðargróðurs

Tilraun var lögð út á rannsóknarsvæðunum þar sem prófað var hvernig mætti flýta landnámi staðargróðurs á rasksvæðum sem verða til í kjölfar framkvæmda. Tilraunamerðirnar voru þrjár auk viðmiðs:

Torfur – Gróðurtorfur með votlendistegundum var komið fyrir þar sem sár höfðu myndast í gróðurhulunni. Meðferðin nefnist hér eftir *torfur*₁ þegar henni var beitt á rasksvæði í kringum skurði sem voru fylltir upp með aðferðum i) + iv) og *torfur*₂ með aðferðum ii) + iv).

Fræslægja – Slegnir voru blettir innan svæðanna þar sem votlendistegundir með þroskuð fræ/í blóma voru ríkjandi og fræslægjunni dreift þar sem sár höfðu myndast í gróðurhulunni.

Fræ – Einæru rýgresi sáð þar sár höfðu myndast í gróðurhulunni.

Viðmið – Engin inngríp

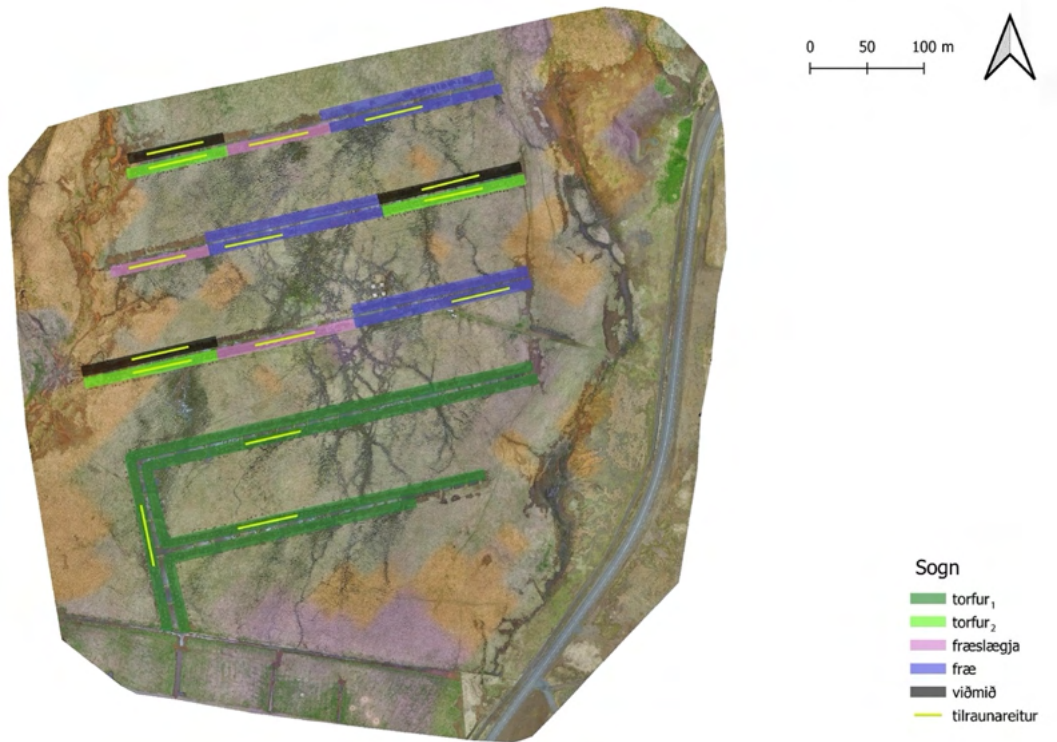
Þessar tilraunemeðferðir voru prófaðar á þeim svæðum sem röskuðust í kjölfar framkvæmda við endurheimt sumarið 2019 þegar ruðningar voru notaðir til uppfyllingar (sjá verkþátt a) mismunandi verklag). Á Sogni voru tilraunemeðferðirnar þrjár ásamt viðmiði prófaðar á rasksvæðum þar sem aðferðum ii) + iv) við uppfyllingu skurða var beitt. Þar að auki var tilraunemeðferðin *torfur* einnig prófuð á rasksvæðum þar sem aðferðum i) + iv) var beitt við uppfyllingu skurða (mynd 2). Á Ytri-Hraundal voru tilraunemeðferðirnar *fræslægja* og *fræ* ásamt viðmiði prófaðar þar sem aðferðum ii) + iii) við uppfyllingu skurða var beitt en tilraunemeðferðin *torfur* var prófuð þar sem aðferðum i) + iii) við uppfyllingu skurða var beitt (mynd 3).

Grafa var notuð á framkvæmdatímanum til að flytja gróðurtorfur fyrir tilraunemeðferðina *torfur*. Aðrar tilraunemeðferðir voru unnar með handafli af starfsfólki Landgræðslunnar. Síðsumars 2019 var fræslægju safnað með því að raka hana saman með hrífu og safna í sekki og dreift jafnharðan innan tilraunemeðferðar *fræslægja* á þrjá 2 x 4 m smáreiti innan tilraunareita. Í tilraunemeðferðina *fræ* var vetrarrýgresi (*DANERGO*, *Lolium multiflorum*) handsáð 0,0035 kg/m² 30. ágúst 2019 á Ytri-Hraundal og 23. september 2019 á Sogni. Fylgst var náið með vexti vetrarrýgresis þar sem svo seint var sáð. Í október 2019 var spírun góð á báðum svæðum en ekki mikill vöxtur, því var ákveðið að sá aftur sumarið 2020 og var það gert 26. maí á Ytri-Hraundal og 2. júní á Sogni.

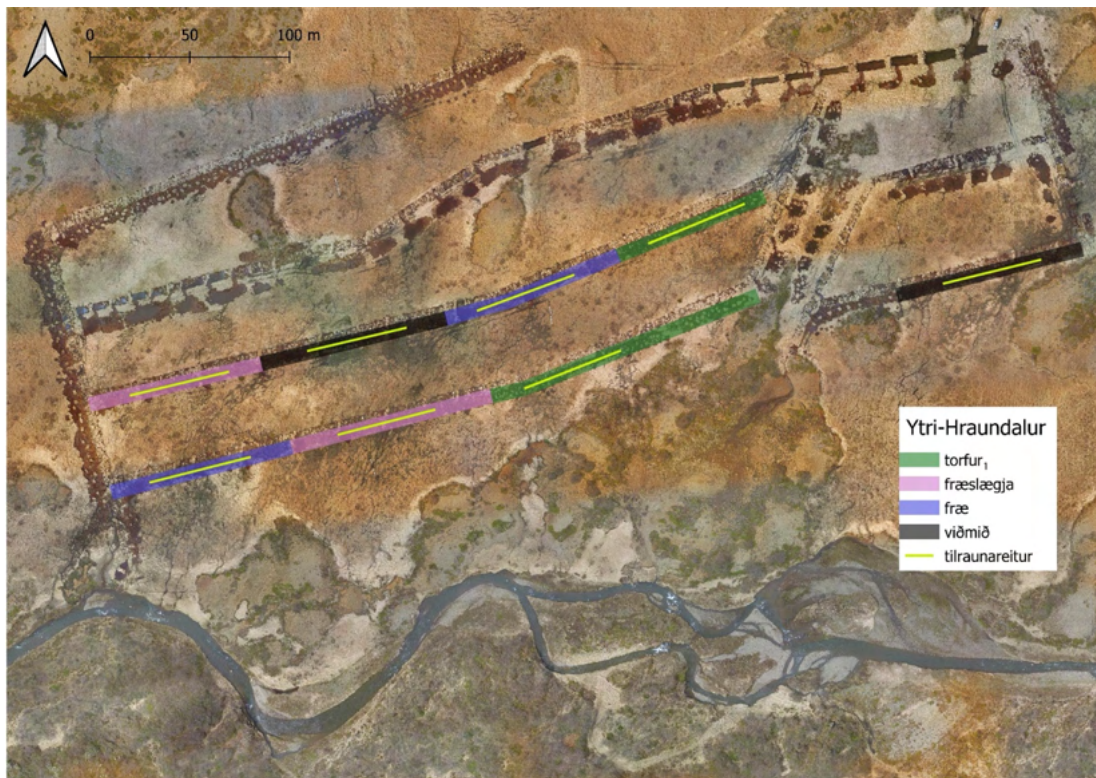
Hver tilraunemeðferð var endurtekin þrisvar á Sogni. Á Ytri-Hraundal var hver tilraunemeðferð endurtekin tvisvar vegna þess að umfang ruðninga nægði ekki til uppfyllingar alls staðar og þá voru grafnar tjarnir til að ná í efni. Þar sem grafnar voru tjarnir var frágangurinn þannig að ekki var hægt að setja upp sambærilegar tilraunemeðferðir.

Innan hvernar tilraunemeðferðar voru lagðir út tilraunareitir sem voru 50 x 2 m beltasnið eftir endilöngu röskuðu svæðanna 2019. Tilraunareitirnir voru merktir með hvítum mjóum staurum fyrir miðju við 0 m (til austurs) og 50 m (til vesturs), samtals 15 reitir á Sogni og 8 á Ytri-Hraundal (myndir 2 og 3). Landnám gróðurs var mælt með svokölluðum bilamælingum, þar sem þekja gróðurs var metin samkvæmt fimm þekjuflokkum: 0-10%, 11-33%, 34-66%, 67-90% og 91-100%, staðsetning og lengdarbil þeirra var skráð upp á sentimetra út frá miðju beltasniðs. Mælingar á upphafsástandi gróðurs í tilraunareitum var safnað síðsumars 2019 og mælingarnar

endurteknar í ágústmánuði 2020 og 2021. Samhliða öllum mælingum voru tilraunareitir ljósmyndaðir.



Mynd 2. Mynd sem sýnir staðsetningu tilraunareita og tilraunameðferða á Sogni. Grunnmynd er loftmynd tekin 2020 með dróna.



Mynd 3. Mynd sem sýnir staðsetningu tilraunareita og tilraunameðferða á Ytri-Hraundal. Grunnmynd er loftmynd tekin 2020 með dróna.

Gagnaúrvinnsla

Þar sem mælingar hófust um mitt sumar 2017, og endurheimt var framkvæmd 20.-28. ágúst 2019 á Ytri-Hraundal og 29. ágúst til 4. september á Sogni, var í vöktuninni ekki skipt niður í tímabil eftir árum heldur frá hausti til hausts (vöktunartímabil). Miðað var við að vöktunartímabil spanni 248. dag árs til 247. dags næsta árs á Sogni og 241. dag árs til 240. dags næsta árs á Ytri-Hraundal.

Mælingar á grunnvatnshæð og losun koldíoxíðs og metans fóru almennt fram á 4 vikna fresti, vor, sumar og haust. Upphaf- og lokadagsetningar mælitímabila hvers árs voru þó mismunandi, tími milli mælinga gat verið mislangur og mælingar í ákveðnum reitum féllu út í einhver skipti. Samanburður einfaldra meðaltala hvers vöktunartímabils gæfi því villandi niðurstöðu. Samanburður byggðist þess í stað á línulegri áætlun á grunnvatnsstöðu, losunar koldíoxíðs og losunar metans milli mælinga. Mæligildi hvers dags var áætlað með meðaltali næstu mælinga, vegið með víxluðum fjarlægðum að mælidögum. Til að áætla vetrarlosun var þar að auki gert ráð fyrir því að losun bæði koldíoxíðs og metans væri engin (núll) þann 31.12. árin 2018, 2019 og 2020. Losun var áætluð milli gefins núllpunkts og mælingar á sama hátt og milli tveggja mælinga. Ekki var gert ráð fyrir núllpunkti fyrir grunnvatnsstöðu en til að fyrsta mæling vors og síðasta mæling hausts hefði ekki of mikil áhrif á útreikninga var 301. degi árs til 119. dags næsta árs sleppt við útreikning meðalgrunnvatnsstöðu vöktunartímabila. Áætlað gildi á degi þar sem mæling fór fram er einfaldlega jafnt mælingu þess dags. Reikniaðferð áætlaðra gilda er sýnd í jöfnu 1.

$$\text{a) } \hat{X}_i = X_i \qquad \text{b) } \hat{X} = \frac{X_i d_{i+1} + X_{i+1} d_i}{d_i + d_{i+1}}$$

Jafna 1. a) sýnir áætlað gildi grunnvatnsstöðu, losunar koldíoxíðs eða losun metans þegar fastur punktur er tiltækur á sama degi, hvort sem um er að ræða mælingu eða gefinn núllpunkt. X_i er gildi tiltekins fast punkts og \hat{X}_i er áætlað gildi sama dags. b) sýnir áætlað gildi grunnvatnsstöðu, losunar koldíoxíðs eða losun metans milli fasta punkta þar sem X er gildi dags, d er fjöldi daga í fastan punkt, i er númer fasts punkts og \hat{X} er áætlað gildi út frá tveimur næstu föstu punktum.

Einfalt meðaltal var reiknað út frá áætluðum gildum fyrir hvert vöktunartímabil og hvern reit. Sama vöktunartímabil var notað fyrir losun koldíoxíðs, losun metans og meðalgrunnvatnsstöðu. Meðaltal var tekið af útreiknaðri árslosun og meðalgrunnvatnsstöðu reita fyrir hvert svæði og vöktunartímabili og samsvarandi staðalfrávik var einnig gefið upp. Það voru engar tiltækar mælingar í 5 af 12 reitum Sogni árið 2017. Meðaltöl dagsmeðaltala áætlaðra gilda innan vöktunartímabils var þess í stað notað sem svæðameðaltöl Sogns yfir vöktunartímabil 2017-2018. Þessi reikniaðferð býður ekki upp á birtingu staðalfrávika. Vegna ónæggra gagna var ekki hægt að birta gildi fyrir allar breytur öll vöktunartímabilin á viðmiðinu á Ytri-Hraundal. Þar að auki er staðalfrávik ekki gefið upp með einungis einn viðmiðunarreit.

Meðallosun hvers reits utan viðmiða fyrir og eftir endurheimt var reiknað út frá meðaltölum hvers vöktunartímabils. Þegar gögn voru ekki tiltæk á Sogni 2017-2018 var meðaltal vöktunartímabils 2018-2019 notað sem losun fyrir endurheimt. Þöruð *t*-próf fyrir meðallosun reita fyrir og eftir endurheimt voru gerð fyrir hvert svæði og gastegund. Shapiro-próf var notað til að kanna hvort leifar prófanna fylgdu kröfu um normaldreifingu leifa.

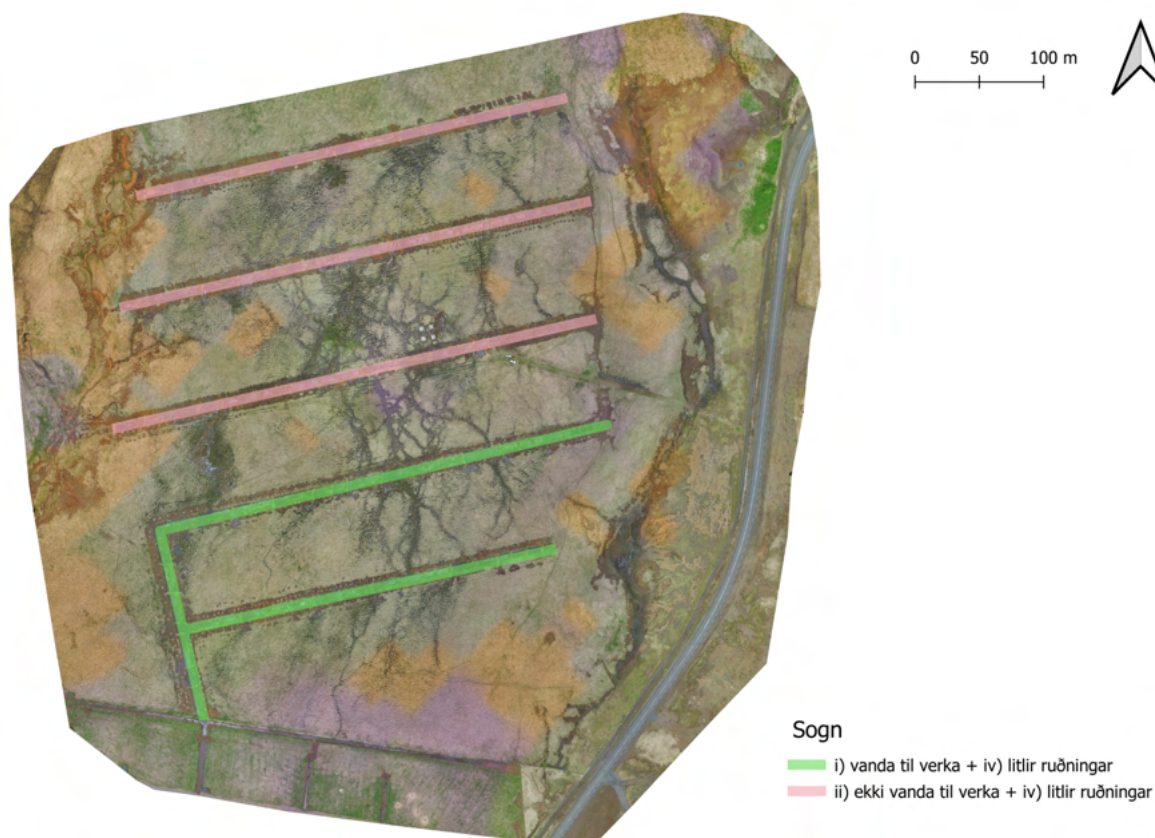
Í tilraun til að flýta fyrir landnámi staðargróðurs var meðaltal tekið af miðgildisþekju þekjuflokka, vegið með tilliti til heildarlengd þekjuflokka innan hvers beltasniðs. Þessi meðaltöl voru notuð sem mat á meðalþekju gróðurs í beltasniðum og notuð til samanburðar tilraunameðferða árin 2019-2021.

Við útreikninga, tölfræði og gerð mynda var tölfræðiforritið R (R Core Team, 2020) notað ásamt pakkanum ggplot2 (Wickham, 2016).

Niðurstöður

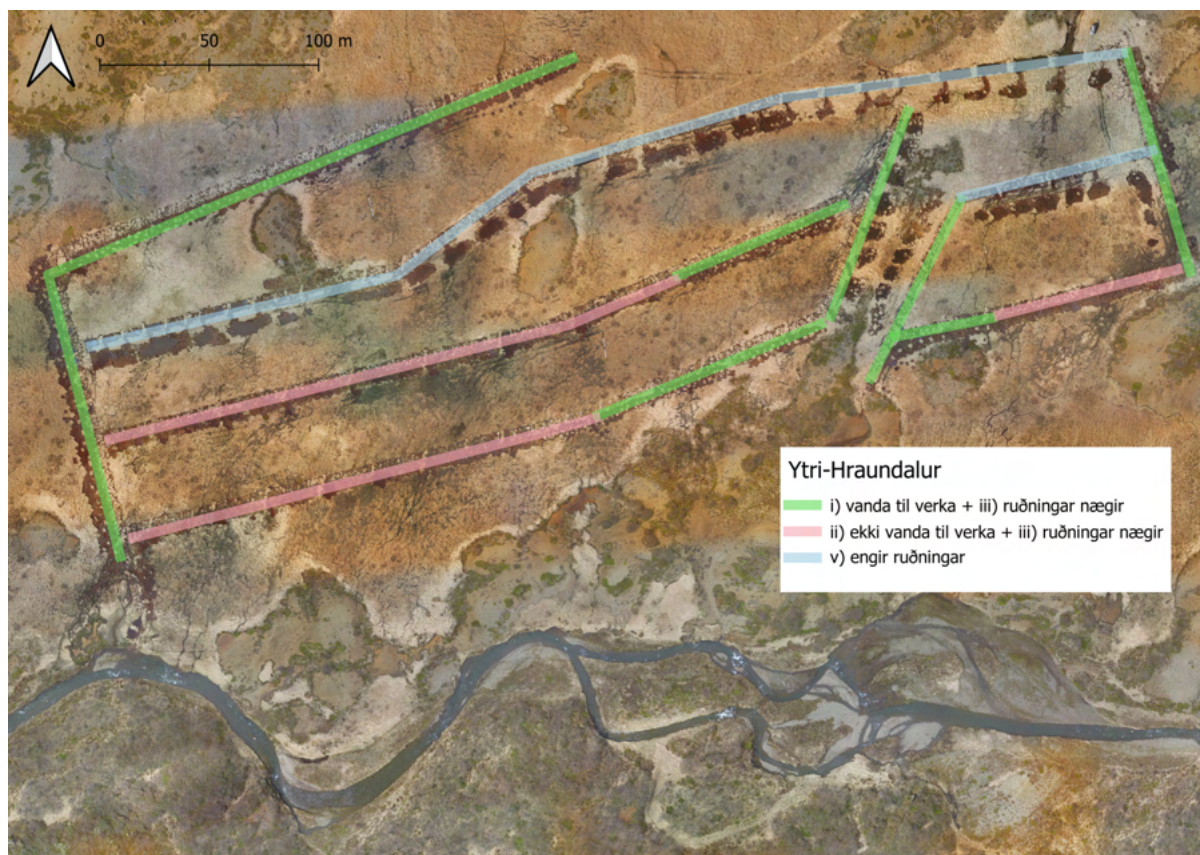
a) Mismunandi verklag

Á Sogni voru ruðningar rýrir við alla skurði, því var aðferð iv) alls staðar beitt þar, ásamt tveim öðrum aðferðum. Á 830 m kafla var aðferð i) beitt samhliða og á 1100 m kafla aðferðinni ii) beitt samhliða (sjá mynd 4).



Mynd 4. Mynd sem sýnir aðferðir sem notaðar voru við uppfyllingu skurða á Sogni (verklag). Grunnmynd er loftmynd tekin 2020 með dróna.

Á Ytri-Hraundal voru aðferðir i) og iii) notaðar saman á 840 m kafla og aðferðir ii) og iii) saman á 680 m kafla. Á 500 m kafla voru engir ruðningar til staðar og aðferð v) því beitt (sjá mynd 5). Tímatakan leiddi í ljós að nánast enginn munur var á verktíma milli aðferðanna.



Mynd 5. Mynd sem sýnir aðferðir sem notaðar voru við uppfyllingu skurða á Ytri-Hraundal (verklag). Grunnmynd er loftmynd tekin 2020 með dróna.

Athuganir í vettvangsferðum sýndu hins vegar mun á árangri endurheimtar milli aðferða. Á Sogni og Ytri-Hraundal reyndist aðferð i) + iii), best á eftir iv). Þar sem aðferð ii) var beitt hafði vatn náð að renna eftir raskárum á efnistökusvæði og vatnsrásir myndast. Einnig voru ummerki frostlyftinga meiri þar sem aðferð ii) hafði verið beitt, sérstaklega á Ytri-Hraundal. Aðferð v) fylgir ekki jafn umfangsmikið rask og heildar skurðauppfyllingu með ruðningum. Þá reynir meira á góða, vel þjappaða og öfluga stíflugerð og frágang við efnistökusvæðin. Þar sem stíflur voru gerðar hefði þær mátt vera þéttari og eins að móta tjarnir sem mynduðust við efnistöku betur.

b) Vöktun á árangri

Jarðvegseiginleikar

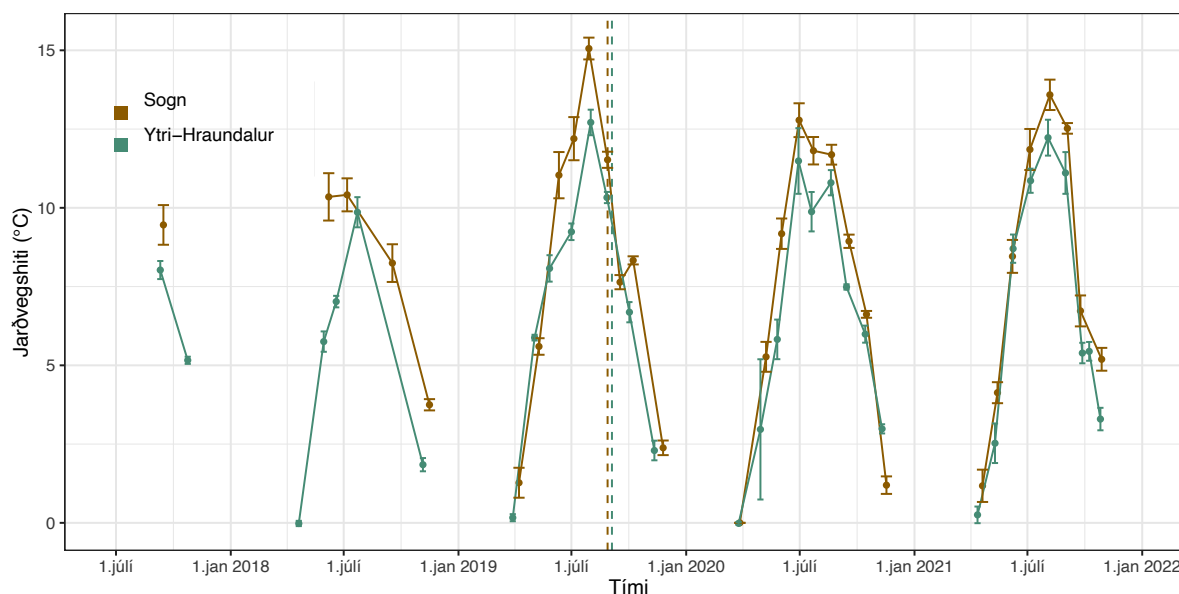
Nokkur munur er á jarðvegseiginleikum svæðanna tveggja þar sem hlutfall lífræns efnis var minna á Sogni og rúmþyngd hærrí (tafla 3). Sýrustig var einnig lítillega hærra á Sogni sem og C/N hlutfall. Hins vegar lítill munur á magn kolefnis í jarðvegi (g C cm^3) milli svæðanna og dýpta.

Tafla 3. Meðaltöl (staðalfrávik innan sviga) þeirra jarðvegseiginleika sem mældir voru í jarðvegssýnum sem tekin voru á vöktunarsvæðunum tveim og viðmiðunarreit á Ytri-Hraundal, n tákna fjölda vöktunarreita.

Svæði	Dýpt cm	n	Rúmþyngd $g\ cm^{-3}$	C%	$g\ C\ cm^{-3}$	N%	C/N	pH
Ytri-Hraundalur	0-20	5	0,24 ($\pm 0,07$)	25,7 ($\pm 5,6$)	0,06 ($\pm 0,008$)	1,57 ($\pm 0,32$)	16,4 ($\pm 0,47$)	5,08 ($\pm 0,20$)
	20-40	5	0,24 ($\pm 0,05$)	28,3 ($\pm 6,38$)	0,07 ($\pm 0,01$)	1,58 ($\pm 0,31$)	17,8 ($\pm 0,89$)	4,94 ($\pm 0,19$)
Ytri-Hraundalur viðmið	0-20	1	0,18	30,4	0,05	1,84	16,5	5,11
	20-40	1	0,17	33,9	0,06	1,99	17,0	5,08
Sogn	0-20	12	0,33 ($\pm 0,09$)	21,3 ($\pm 4,78$)	0,07 ($\pm 0,01$)	1,24 ($\pm 0,22$)	17,1 ($\pm 2,03$)	5,26 ($\pm 0,22$)
	20-40	12	0,32 ($\pm 0,09$)	19,2 ($\pm 6,12$)	0,06 ($\pm 0,01$)	1,05 ($\pm 0,23$)	18,0 ($\pm 2,81$)	5,26 ($\pm 0,30$)

Jarðvegshiti

Jarðvegshiti var öll árin nokkuð hærri á Sogni en Ytri-Hraundal, hæstur var hann árið 2019 er hann fór upp í 15 °C (mynd 6). Sumarið 2018 mældist jarðvegshiti mjög lágur, í kringum 10 °C á báðum svæðunum.



Mynd 6. Meðal jarðvegshiti ásamt staðalfrávikum hversrar mæliferðar á vöktunarsvæðunum frá ágúst 2017 til október 2021. Lóðréttar strikálínur tákna lokadagsetningar endurheimtar.

Grunnvatnshæð

Meðal grunnvatnshæð svæðanna beggja hækkaði eftir endurheimt (sjá töflu 4). Á Ytri-Hraundal var hún að meðaltali -14,0 cm yfir vöktunartímabilin fyrir endurheimt en -1,4 cm eftir endurheimt. Á Sogni var hún -46,4 fyrir endurheimt en -19,7 cm eftir endurheimt, að jafnaði. Mikill breytileiki var mælingum á grunnvatnshæð milli ára og vöktunarreita.

Tafla 4. Meðalgrunnvatnsstaða í cm á Sogni og Ytri-Hraundal á hverju vöktunartímabili með staðalfrávik í sviga, á 10 cm dýpi, ásamt fjölda vöktunarreiða (n). Mælingar vantaði í viðmiði á Ytri-Hraundal fyrsta og síðasta vöktunartímabilið. Vöktunartímabil ná frá hausti til hausts vegna tímasetningar endurheimtar. Strikalína táknar tímasetningu endurheimtar. *Fyrir árið 2017-2018 á Sogni er meðaltal dagsmeðtala birt, sem býður ekki upp á útreikning staðalfráviks.

	n	Vöktunartímabil			
		2017-2018*	2018-2019	2019-2020	2020-2021
Sogn	12	-36,1	-56,7 ($\pm 36,8$)	-22,1 ($\pm 14,3$)	-17,2 ($\pm 15,4$)
Ytri-Hraundalur	5	-8,1 ($\pm 4,7$)	-20,0 ($\pm 6,8$)	-3,4 ($\pm 4,7$)	0,7 ($\pm 5,2$)
Ytri-Hraundalur viðmið	1		-8,2	-5,7	

Losun gróðurhúsalofttegunda

Losun koldíoxíðs var marktækt ($p < 0,05$) lægri eftir endurheimt, bæði á Sogni og Ytri-Hraundal. Losunin var hæst á vöktunartímabilinu 2017-2018 á Sogni og 2018-2019 á Ytri-Hraundal. Losunin var hærri á Sogni en Ytri-Hraundal öll árin en alltaf lægst í viðmiðunarreitnum á Ytri-Hraundal (sjá töflu 5).

Tafla 5. Meðallosun koldíoxíðs ($\text{g CO}_2 \text{ m}^2 \text{ dag}^{-1}$) á Sogni og Ytri-Hraundal á hverju vöktunartímabili. Staðalfrávik er sýnt í sviga fyrir aftan og n táknar fjölda vöktunarreiða. Ekki var búið að setja upp vöktunarreit í viðmiði á Ytri-Hraundal á fyrsta vöktunartímabili. Vöktunartímabil ná frá hausti til hausts vegna tímasetningar endurheimtar. Strikalína táknar tímasetningu endurheimtar. *Fyrir árið 2017-2018 á Sogni er meðaltal dagsmeðtala birt, sem býður ekki upp á útreikning staðalfráviks.

	n	Vöktunartímabil			
		2017-2018*	2018-2019	2019-2020	2020-2021
Sogn	12	8,55	7,40 ($\pm 1,03$)	2,95 ($\pm 0,67$)	5,58 ($\pm 1,02$)
Ytri-Hraundalur	5	4,54 ($\pm 1,69$)	4,78 ($\pm 1,18$)	1,91 ($\pm 0,61$)	2,84 ($\pm 0,34$)
Ytri-Hraundalur viðmið	1		1,62	1,13	0,09

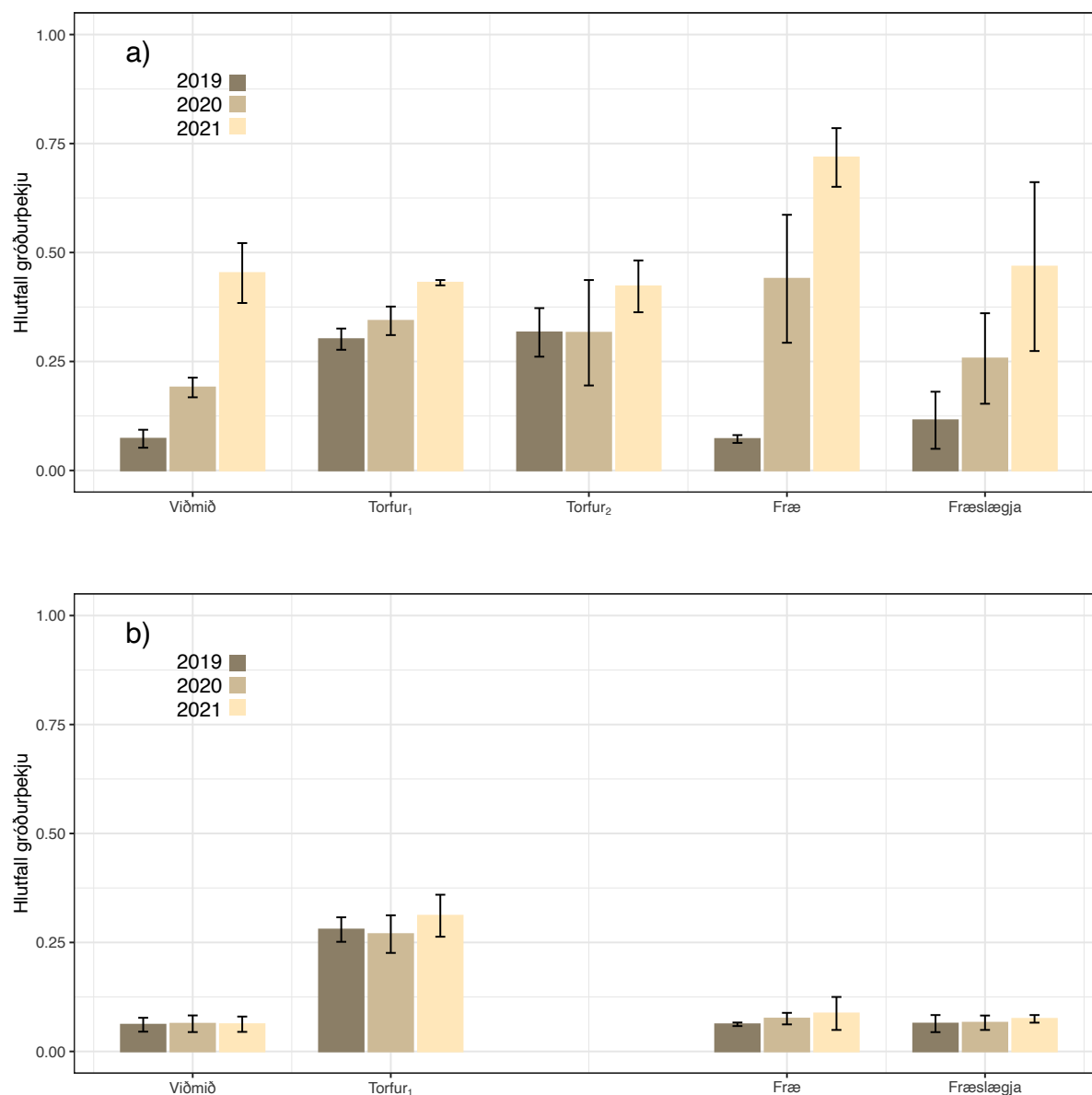
Ekki reyndist marktækur munur á losun metans fyrir og eftir endurheimt, hvorki á Sogni né Ytri-Hraundal. Hæst var losunin á vöktunartímabilinu 2018-2019 á Sogni og lægst á tímabilinu 2020-21 í viðmiðinu á Ytri-Hraundal (sjá töflu 6).

Tafla 6. Meðallosun metans ($\text{g CH}_4 \text{ m}^2 \text{ dag}^{-1}$) á Sogni og Ytri-Hraundal á hverju vöktunartímabili. Staðalfrávik er sýnt í sviga fyrir aftan og n táknar fjölda vöktunarreiða. Ekki var búið að setja upp vöktunarreit í viðmiði á Ytri-Hraundal á fyrsta vöktunartímabili. Vöktunartímabil ná frá hausti til hausts vegna tímasetningar endurheimtar. Strikalína táknar tímasetningu endurheimtar. *Fyrir árið 2017-2018 á Sogni er meðaltal dagsmeðtala birt, sem býður ekki upp á útreikning staðalfráviks.

	n	Vöktunartímabil			
		2017-2018*	2018-2019	2019-2020	2020-2021
Sogn	12	0,074	0,036 ($\pm 0,039$)	0,015 ($\pm 0,017$)	0,048 ($\pm 0,057$)
Ytri-Hraundalur	5	0,014 ($\pm 0,009$)	0,018 ($\pm 0,008$)	0,004 ($\pm 0,002$)	0,043 ($\pm 0,044$)
Ytri-Hraundalur viðmið	1		0,021	0,014	0,002

c) Örvun staðargróðurs

Mikill munur var á landnámi staðargróðurs milli svæðanna tveggja (sjá myndir 7-14). Niðurstöður bilamælinga í tilraunareitum sýndu að gróðurþekja allra tilraunareitanna jókst hraðar að meðaltali á rannsóknartímanum á Sogni ($32,3$, $SE \pm 9,83\%$) miðað við Ytri-Hraundal ($1,7 \pm 0,69\%$). Þó nokkur munur reyndist vera á tilraunameðferðunum á rannsóknartímanum 2019-2021 (mynd 7). Gróðurþekja í viðmiðunareitum á Sogni jókst um 38% að meðaltali en á Ytri-Hraundal um 0,1%. Mest var aukningin í tilraunareitum á Sogni í tilraunameðferðinni *fræ* þar sem þekja gróðurs jókst um 64,6%. Á Ytri-Hraundal var aukning gróðurþekju mest með tilraunameðferðinni *torfur₁*, þar sem gróðurtorfur voru notaðar þar sem aðferðum i) + iv) var beitt við uppfyllingu skurða, um 3,2% eftir tvö vaxtartímabil.



Mynd 7. Hlutfall meðalgróðurþekju ásamt staðalfrávikum í tilraunameðferðum á a) Sogni ($n = 3$) og b) Ytri-Hraundal ($n = 2$).



Mynd 8. Sogn, tilraunameðferð *fræslægja*, 4. október 2019 t.v. og 11. ágúst 2021 t.h.



Mynd 9. Sogn, tilraunameðferð *torfur2*, 11. september 2019 t.v. og 10. ágúst 2021 t.h.



Mynd 10. Sogn, tilraunameðferð *fræ* með einæru rýgresi, 11. september 2019 t.v. og 10. ágúst 2021 t.h.



Mynd 11. Ytri-Hraundalur, *viðmið*, 28. ágúst 2019 t.v. og 5. ágúst 2021 t.h.



Mynd 12. Ytri-Hraundalur *torfur*₁, 28. ágúst 2019 t.v. og 5. ágúst 2021 t.h.



Mynd 13. Ytri-Hraundalur, nærmynd af mýrelftingu, vallhæru og mosum sem vaxa í tilraunameðferðinni *fræslægja*, 5. ágúst 2021. Yfirlitsmynd t.h.



Mynd 14. Ytri-Hraundalur, vetrarrýgresi (*Lolium multiflorum*) 5.ágúst 2021. Nokkrar plöntur sem spíruðu innan um sinu frá sáningu 2019 og 2020. Ummerki frostlyftingar sjást áberandi á myndinni.

Umræður

a) Mismunandi verklag

Mikill og nauðsynlegur lærdómur hlaut af framkvæmdum á svæðunum tveim. Allir verkþættir voru í fyrsta skipti unnir af starfsfólki Landgræðslunnar, starfsmaður stofnunarinnar vann alla gröfuvinnuna með sérfræðing til ráðgjafar allan tímann. Vandað var til verka og í sameiningu voru fundar lausnir á þeim vandamálum sem óhjákvæmilega koma upp við framkvæmdir sem þessar. Við tímatöku kom í ljós að lítil munur er á að halda til haga öllum gróðurtorfum við framkvæmd og nýta þær á yfirborði og á að gera það ekki. Einnig var lærdómsríkt að fylgjast náið með framkvæmdum frá upphafi til enda til að fá yfirsýn yfir þau vandamál sem komið geta upp. Framkvæmdirnar bera þess merki og voru vel heppnaðar. Á sama tíma var hægt að tímasetja verkið nákvæmlega, m.a. hversu tímafrek hver aðferð var. Vegna reglulegrar vöktunar á svæðunum voru þau heimsótt oft og hérlendis hefur varla verið fylgst jafn vel með hversu vel stíflur og uppfyllingar halda sér áður. Þegar ekki er vandað til verka er hætt á að vatn nái að renna um röskuð efnistökusvæði og fyrrverandi skurðstæði. Ef að vatnið fær að renna óhindrað þar geta myndast rásir sem dýpka með tímanum. Þá dreifist vatn ekki nægilega jafnt um svæðið og ef vatnsrofið er mikið geta myndast djúpar rásir eða skurðauppfyllingar, í heild eða hluta til,

skolast burt. Þá lækkar grunnvatnshæð aftur og endurheimtin mistekst. Einnig þarf að huga vel að því að hafa allar uppfyllingar og stíflur nógu háar og vandaðar vegna þess að þær geta sigið með tímanum og ná þá ekki að stoppa rennsli vatns eins og til er ætlast. Þá er hætt á að ekki takist að hækka grunnvatnsstöðu varanlega.

Hérlendis er almennt lítið á endurheimt sem einsskiptis aðgerð sem á oft á tíðum ekki við. Í þessu verkefni þar sem virkilega var vandað til verka og unnið eftir bestu þekkingu og verklagi er mögulegt að lítilega þurfi að lagfæra framkvæmdir. Áfram verður þó fylgst með svæðunum og brugðist við ef þurfa þykir. Hugsanlega þyrfti að fjölga stíflum og hafa styttra bil á milli þeirra til að ná jafnari og hærri grunnvatnshæð. Á svæði eins og Ytri-Hraundal er mikið vatnsflæði um svæðið, meira en gert var ráð fyrir. Fyrir endurheimt var vatni sem kemur undan Svarfhólmúla beint af svæðinu með skurði en rennur nú í gegnum svæðið. Þar sem ekki var vandað til verka er farið að bera á vatnsrofi á efnistökusvæðum sem bregðast þarf við ef það eykst.

b) Vöktun á árangri

Í þessari vöktun var fylgst með svæðunum í tvö ár eftir endurheimt og nær því aðeins yfir skammtíma árangri endurheimtarinnar. Eftir að votlendi eru endurheimt tekur mislangan tíma, oft áratugi, fyrir eiginleika og virkni svæðanna ná nýju jafnvægi. Hversu langan tíma það tekur fer eftir ýmsum þáttum s.s hversu vel var staðið að endurheimtinni og hversu hnignuð svæðin voru orðin (sjá t.d. Lamers o.fl., 2015 og Emsens o.fl., 2020). Því má gera ráð fyrir að endurheimtu svæðin á Sogni og Ytri-Hraundal séu enn að þróast. Tveimur árum eftir endurheimt hefur grunnvatnshæð hækkað og dregið hefur úr losun koldíoxíðs. Fremur lítil framræsluáhrif voru á svæðunum tveim fyrir endurheimt, sérstaklega á Ytri-Hraundal þar sem grunnvatnshæðin var lítið fyrir neðan yfirborð. Á Sogni var grunnvatnshæðin töluvert lægri en samt sem áður nokkuð há miðað framræst svæði (tafla 4 og t.d. Rannveig Ólafsdóttir, 2015 og Þórdís Björt, 2018). Við endurheimt hækkaði grunnvatnshæðin á báðum svæðum, um 13 cm að meðaltali á Ytri-Hraundal og er þá komin að yfirborði og um 26 cm að meðaltali á Sogni (tafla 4). Athyglisvert er að eftir endurheimt á Ytri-Hraundal verður grunnvatnshæð hærri á endurheimta svæðinu en í viðmiðinu. Á Sogni er framræst svæði ofan við vöktunarsvæðið sem gera má ráð fyrir að hindri að einhverju leyti aðkomu grunnvatns að endurheimta svæðinu.

Út frá niðurstöðunum er hægt að áætla losun koldíoxíðs og metans fyrir og eftir endurheimtaraðgerðir. Losun koldíoxíðs er mun meiri á Sogni en Ytri-Hraundal bæði fyrir endurheimt en líka eftir endurheimt sem er í samræmi við lægri grunnvatnsstöðu svæðisins (tafla 4). Þar að auki hefur hlýrri veðráttu og þar með hærri jarðvegshiti líklega áhrif á losun á Sogni (tafla 1 og 2 og mynd 6), en skoða þarf áhrif hitastigs nánar til að hægt sé að fullyrða um það. Losun metans er að jafnaði hærri á Sogni (tafla 6) sem kemur á óvart þar sem grunnvatnsstaðan er lægri (tafla 4), en þar getur hærri hiti líka verið hluti af skýringunni. Losun metans breytist ekki marktækt við endurheimt og hærri grunnvatnsstöðu á svæðunum tveim. Hugsanlega hefur vöktunarskipulagið og slitróttar mæliferðir ekki náð yfir raunverulega losun metans á svæðunum tveim.

Þar sem allar losunarmælingar fóru fram í ógegnsæjum klefa vantar mat á bindingu á Sogni og Ytri-Hraundal og þær losunartölur sem eru birtar hér samsvara öndun lífvera (frumbjarga og

ófrumbjarga) í eða á yfirborði jarðvegs. Hafa verið í huga að langt bil var á milli mælinga og losun var áætluð línulega á milli mælinga þar sem gögnin buðu ekki uppá nákvæmari líkanagerð. Ef við umreiknum meðallosun koldíoxíðs (tafla 5) svæðanna fyrir endurheimt var heildarárslosun (haust til hausts) á Sogni 27,0-31,2 t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹ (8,55-7,4 g m² dag⁻¹) og fyrir framræstu reitina á Ytri-Hraundal 16,6-17,5 t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹ (4,54-4,78 g m² dag⁻¹). Þessar niðurstöður eru í ágætis samræmi við niðurstöður íslenskra rannsókna fram að þessu. Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson (2013) mældu losun uppá 36,3-53,4 t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹ og Rannveig Ólafsdóttir (2015) 30,8 (±2,59) t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹. Í framræstu votlendi í Sandlækjarmýri á Suðurlandi, þar sem alaskaösp (*Populus balsamifera ssp. trichocarpa*) var ræktuð var útreiknuð losun 20,8-21,0 t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹ (Bjarnadóttir o.fl., 2021). Þessi breytileiki í niðurstöðum rannsókna orsakast líklega að miklu leyti af því hversu mikil framræsluáhrif eru á svæðunum. Mjög lítil framræsluáhrif voru á Ytri- Hraundal og frekar lítil á Sogni. Sandlækjarmýri var lítið framræst svæði og þar var losun koldíoxíðs sambærileg við niðurstöður okkar (Bjarnadóttir o.fl., 2021), sérstaklega á Ytri-Hraundal. Losun koldíoxíðs í fyrri rannsóknum á Vesturlandi var umtalsvert hærrí (Guðmundsson og Óskarsson, 2013; Rannveig Ólafsdóttir, 2015) en þó í einhverjum tilvikum sambærileg við losunina á Sogni.

Talsverður munur er á heildarlosun koldíoxíðs áranna tveggja eftir að framkvæmd endurheimtar lauk. Að meðaltali var samdráttur í losun koldíoxíðs eftir endurheimt 13,5 (10,8-20,4) t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹ á Sogni og 8,3 (7,0-10,0) t CO₂ ha⁻¹ ár⁻¹ á Ytri-Hraundal. Niðurstöður frá mælingum vöktunartímabilanna tveggja á árunum 2019-2021 gefa fyrsta mat á heildarárslosun koldíoxíðs eftir endurheimt á votlendi á Íslandi en losun hefur verið mæld hluta árs eftir endurheimt (Rannveig Ólafsdóttir, 2015). Ef gert er ráð fyrir að ómæld binding í gróðri sé fasti fyrir og eftir endurheimt, gefa þessar tölur hugmynd um ávinning endurheimtar á svæðunum.

Þó niðurstöður þessarar vöktunar gefa upplýsingar um losun koldíoxíðs og metans fyrir og eftir endurheimtaraðgerðir þá gefa þær ekki heildarmynd af búskapi gróðurhúsalofttegunda á svæðinu. Við útreikninga á ávinningi í samdrætti gróðurhúsalofttegunda við endurheimt votlendis hefur verið stuðst við losunarstuðla Vísindanefndar loftslagssamningsins. Þeir eru áætlaðir út frá fjölmörgum ritrýndum rannsóknum á búskapi gróðurhúsalofttegund í hverjum landnotkunarflokk og loftlagsbelti. Samkvæmt þeim er ávinningur af endurheimt framræsts votlendis hér á landi áætlaður um 20 t CO₂ ígildi C ha⁻¹ ár⁻¹ (IPCC, 2014). Í þeim stuðli er losun og bindingu frá ýmsum þáttum reiknuð saman. Þessir þættir eru; losun og binding koldíoxíðs frá yfirborði (5,7 t CO₂-C ha⁻¹ ár⁻¹), losun metans frá jarðvegi (1,4 kg CH₄ ha⁻¹ ár⁻¹), losun hláturgas frá jarðvegi (0,44 kg N₂O-N ha⁻¹ ár⁻¹), losun metans úr skurðum (1165 kg CH₄ ha⁻¹ ár⁻¹ en hlutfall flatamáls skurða af framræstu landi er áætlað 5% af úthaga), tap á kolefni uppleystu í vatni (0,12 t C ha⁻¹ ár⁻¹). Við endurheimt er gert ráð fyrir að flestir losunarpættir minnki eða hverfi, fyrir utan losun metans sem gert er ráð fyrir að aukist. Í þessu verkefni var aðeins hluti þessara losunarpátta og engin binding mæld og því ekki hægt að bera niðurstöðurnar saman við stuðla IPCC.

c) Örvun staðargróðurs

Niðurstöður rannsóknarinnar sýna að það sé hægt að flýta fyrir landnámi staðargróðurs. Þegar tilraunameðferðirnar og verklegu aðferðirnar eru bornar saman er afgerandi hversu miklu munar að vanda vel til verka við framkvæmdir og að allar gróðurtorfur séu nýttar við frágang á efnistökusvæðum. Niðurstöðurnar sýna einnig að svæðin tvö eru mjög ólík. Þegar viðmiðunarreitirnir eru bornir saman milli svæða er mikill munur, 38% aukning gróðurþekjunnar á Sogni í samanburði við 0,1% á Ytri-Hraundal (mynd 7). Tveimur vaxtartímabilum eftir að tilraunirnar hófust virðist munur á milli meðferða á Sogni vera að hverfa og vísbendingar eru um að náttúrleg geta svæðisins til að gróa upp sé mikil. Á Ytri-Hraundal hefur þekja gróðurs í rasksárum sem enga meðferð fengu ekki aukist að ráði. Tilraunameðferðin *torfur* kom best út þar en þekja hefur einnig aukist þar sem sáð var rýgresi (tilraunameðferðin *fræ*), mjög litlar sem engar breytingar urðu á þekju gróðurs þar sem notuð var *fræslægja*. Jarðvegseiginleikar svæðanna voru svipaðir (tafla 3) og því er skýringa á misjöfnu landnámi gróðurs ekki að leita þar. Á Ytri-Hraundal er veðurfar kaldara og þurrara (tafla 1 og 2) og þar er einnig lítilsháttar sauðfjárbætur þó að hún virðist vera óveruleg. Líklegasta skýringin á litlu landnámi gróðurs í rasksárum og árangri meðferðanna, fyrir utan *torfur* er að mikið vatnsflæði er á svæðinu þannig að fræ ná ekki að festa rætur. Það er því hægt að flýta fyrir landnámi staðargróðurs á rasksárum með því að vanda hverja skóflustungu við efnisflutning við endurheimt votlendis, koma í veg fyrir vatnsrásir, hægja á flæði vatns um rasksárin með flutningi á gróðurtorfum og sáningu einærs rýgresis.

Lokaorð

Mikilvægt er að fylgjast áfram með svæðunum til að meta langtímaárangur endurheimtarinnar, hvernig uppfyllingar og stíflur haldast og hvernig landnám staðargróðurs í rasksárum þróast áfram. Tveimur árum eftir endurheimt sést að með því að hækka grunnvatnsstöðuna á þessum framræstu svæðum minnkaði losun koldíoxíðs marktækt og sú minnkun var í samræmi við hversu mikið grunnvatnshæðin hækkaði. Því er mikilvægt að haga framkvæmdum þannig að grunnvatnshæð svæðisins hækki sem mest og haldist há. Vöktunin sýnir mikilvægi þess að nýta allar gróðurtorfur á yfirborði, vegna þess að ekki er vitað fyrir fram hversu fljótt gróður nemur land í sárum, litlu tímafrekara er að haga framkvæmdum þannig og mun fyrirhafnasamara er að grípa inn í á seinni stigum en að huga að þessum þáttum á framkvæmdartímanum. Til að ná betur yfir heildarþáttum gróðurhúsalofttegunda er ítarlegri gagnaöflun yfir lengri tíma en var í þessu verkefni, þörf. Undirbúningur við skipulag slíkrar vöktunar er hafin hjá Landgræðslunni.

Heimildaskrá

- Arnalds, O., Gudmundsson, J., Oskarsson, H., Brink S. H. og Gísladóttir, F. O. (2016). Icelandic Inland Wetlands: Characteristics and Extent of Draining. *Wetlands* 36 759–769.
- Bjarnadóttir, B., Sungur, G. A., Sigurdsson, B. D., Kjartansson, B. T., Oskarsson, H., Oddsdóttir, E. S., Gunnarsdóttir, G. E. og Black, A. (2021). Carbon and water balance of an afforested shallow drained peatland in Iceland. *Forest Ecology and Management* 482: 118861.
- Emsens, W.J., van Diggelen, R., Aggenbach, C.J.S., Cajthaml, T., Frouz, J., Klimkowska, A., Kotowski, W., Kozub, L., Liczner, Y., Seeber, E., Silvennoinen, H., Tanneberg, F., Vicena, J., Wilk, M. og Verbruggen, E. (2020). Recovery of fen peatland microbiomes and predicted functional profiles after rewetting. *ISME J* 14 1701–1712.
- Guðmundsson, J. og Óskarsson, H. (2013). Carbon dioxide emissions 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 Conservation Service, Ispra, Italy, bls. 155-159.
- 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.
- IPCC (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Jamsranjav, B., Fukuda, M. og Troxler, T. (ritstjórar) IPCC, Switzerland.
- Jakob Jónsson, Jón G. Guðbjörnsson og Þorsteinn Guðmundsson (ritstjórar) (1989). *Byggðir Borgarfjarðar III. Búnaðarsamband Borgarfjarðar*.
- Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J. og Smith, P. (2016). The role of peatlands in climate regulation. Í A., Allot, T., Evans, M., Joosten, H. og Stoneman, R. (ritstjórar), *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*, bls. 63-76. Bonn, Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Keller, N., Stefani, M., Einarsdóttir, S. R., Helgadóttir, Á. K., Helgason, R., Guðlaugsdóttir, H., o.fl. (2021). National Inventory Report: Emissions of greenhouse gases in Iceland from 1990 to 2019. Reykjavík, Umhverfisstofnun.
- Lamers, L.P.M., Vile, M.A., Grootjans, A.P., Acreman, M.C., van Diggelen, R., Evans, M.G., Richardson, C.J., Rochefort, L., Kooijman, A.M., Roelofs, J.G.M. og Smolders, A.J.P. (2015). Ecological restoration of rich fens in Europe and North America: from trial and error to an evidence-based approach. *Biological Reviews* 90 182-203.
- Livingston, G.P. og Hutchinson, G.L., (1995). Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. Í Matson, P.A. og Harriss, R.C. (ritstjórar), *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. Blackwell Science, Cambridge, bls. 14–50.
- Martikainen, P. J., Nykänen, H., Crill, P. og Silvola, J. (1993). Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature* 366 51–53.
- Óskarsson, H., Gunnarsdóttir, G. E., og Grétarsdóttir, J. (2020). Peatland restoration: Revegetating disturbed areas by means of fresh seed-containing hay application. *Icelandic Agricultural Sciences*, 33, 35-39.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rannveig Ólafsdóttir (2015). Carbon budget of a drained peatland in Western Iceland and initial effects of rewetting. MS ritgerð, Umhverfiseild, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Samráðshópur um endurheimt votlendis (2016). *Endurheimt votlendis. Aðgerðaáætlun. Umhverfis- og auðlindaráðuneytið*.

Waddington, J. M., Rotenberg, P. A. og Warren, F. J. (2001). Peat CO₂ production in a natural and cutover peatland: Implications for restoration. *Biogeochemistry* 54 115–130.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York

Þórdís Björt Sigþórsdóttir (2018). Sannprófun mótvægisaðgerða vegna vegaf framkvæmda: Skilar endurheimt votlendis tilætluðum árangri?. MS ritgerð, Háskóli Íslands, Líf- og umhverfisvísindadeild, Reykjavík.

