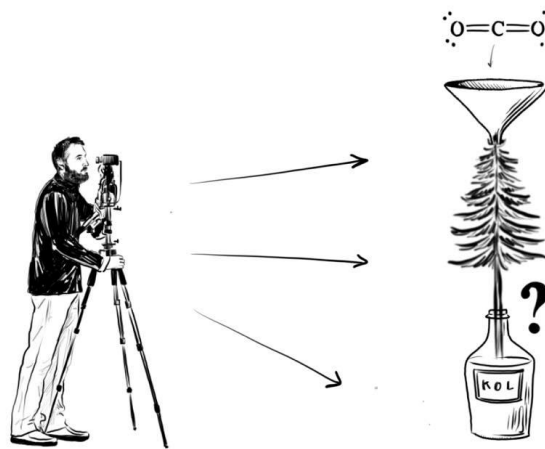


Kolefnisbinding og vöxtur mismunandi skógargerða í þremur skógum á Suðvesturlandi

Heiðmörk, Nesjavöllum og Ölfusvatni



Gústaf Jarl Viðarsson



Landbúnaðarháskóli Íslands
Agricultural University of Iceland

Kolefnisbinding og vöxtur mismunandi skógargerða í þremur skógum á Suðvesturlandi

Heiðmörk, Nesjavöllum og Ölfusvatni

Gústaf Jarl Viðarsson

60 eininga lokaverkefni sem er hluti af

Magister Scientiarum gráðu í skógfræði

Leiðbeinendur: Bjarni Diðrik Sigurðsson, Arnór Snorrason og Björn Traustason

Náttúra & skógur

Landbúnaðarháskóli Íslands

Keldnaholt, september 2023

Íslenskur titill: Kolefnisbinding og vöxtur mismunandi skógargerða í þremur skógum á Suðvesturlandi. Heiðmörk, Nesjavöllum og Ölfusvatni
Enskur titill: Carbon sequestration and growth of different forest types in three forests in South-West Iceland. Heiðmörk, Nesjavellir and Ölfusvatn
60 eininga lokaverkefni sem hluti af Magister Scientiarum

Höfundarréttur © 2023 Gústaf Jarl Viðarsson
Öll réttindi áskilin

Heiti brautar: Skógfræði
Heiti deildar: Náttúra & skógur

Landbúnaðarháskóli Íslands
Hvanneyri
311 Borgarnes
Sími: 433 5000

Skráningarupplýsingar:
Gústaf Jarl Viðarsson, 2023. *Kolefnisbinding og vöxtur mismunandi skógargerða í þremur skógum á Suðvesturlandi*. MS ritgerð, Skógfræði, Landbúnaðarháskóli Íslands, 70 bls.

Yfirlýsing

Hér með lýsi ég því yfir að verkefni þetta er byggt á mínum eigin athugunum, er samið af mér og að það hefur hvorki að hluta né í heild verið lagt fram áður til hærri prófgráðu.

Gústaf Jarl Viðarsson

Ágrip

Eitt af mikilvægum hlutverkum skógræktar er að binda koldíoxíð (CO_2) úr andrúmslofti og geyma sem kolefni (C) í lífmassa og jarðvegi til lengri tíma. Aukin umræða og kröfur um notkun ábyrgra aðferða til þess að meta kolefnisbindingu skóga var aðal kveikjan að þessari rannsókn.

Markmið þessa verkefnis var að i) lýsa og aðlaga aðferðafræði til að meta magn kolefnis og kolefnisbindingu í lífmassa trjáa í afmörkuðum skóglendum (einstaka skógajörðum) á áreiðanlegan hátt, ii) framkvæma úttektir og mælingar með þeirri aðferðafræði á þremur skógræktarsvæðum á suðvesturhorninu, það er á Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum og að lokum iii) bera saman niðurstöðurnar á kolefnisbindingu þessara svæða eftir svæðum, aldri skóga og ríkjandi trjátegunum.

Úttektin var framkvæmd árið 2017. Skógarnir voru fyrst kortlagðir og flokkaðir með tilliti til trjáteguna og aldurs. Notast var við flokkað slembival til þess að leggja út mælifleti í skógarflokka. Skógmælingar og áhringjamælingar voru gerðar á hverjum fleti sem nægðu til að meta aldur ríkjandi trjáa, kolefnisforða í lífmassa trjáa árið 2017 og 2012, og þar með árlega kolefnisbindingu síðustu fimm árin.

Niðurstöðurnar voru að flatarmál flestra skóganna breyttist nokkuð við endurkortlagningu, en þar munaði mestu um náttúrulega birkiskóga sem höfðu aukið útbreiðslusvæði sitt eða ekki verið teknir með í fyrri úttektum. Gerður var samanburður á aldri trjáa miðað við framkvæmdarskráningu og áhringjagreiningu, en þá kom ljós vanmat með áhringjagreiningu og var bætt við 3 árum við niðurstöður úr áhringjagreiningu þar sem aldur byggði aðeins á þeim.

Heildarmat á kolefnisforða í lífmassa trjágróðurs (sem bundið CO_2) í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum var 101.406 (± 23.535), 2.585 (± 1290) og 1.752 (± 875) tonn CO_2 árið 2017. Þessi kolefnisforði skiptist á milli ólíkra skógargerða á eftirfarandi hátt: Í Heiðmörk 15%, 13%, 11% og 61% á milli náttúrulegra birkiskóga, blandskóga, barrskóga undir 5 metra hæð og barrskóga yfir 5 metra hæð; Á Ölfusvatni 93% og 7% á milli barrskóga <5 m og ræktaðra birkiskóga; Á Nesjavöllum 35% og 65% á milli ræktaðra og náttúrulegra birkiskóga.

Núverandi (2012-2017) árlegur hraði kolefnisbindingar í lífmassa trjáa var metinn vera 7.749 (± 1.742), 300 (± 123) og 148 (± 74) tonn CO_2 á ári fyrir skóga Heiðmerkur, Ölfusvatns og Nesjavalla.

Það reyndist ekki vera neinn marktækur munur á vaxtargetu skóganna á milli þessara þriggja jarða og því voru gögnin frá svæðunum sameinuð við frekari greiningu. Meðalaldur birkiskóga í þessum samanburði var 25 ár en 30 ár fyrir alla barrskóga. Að jafnaði mynduðu þessar skógargerðir 0,1 og 2,0 m³ af bolviði á hvern hektara á ári og núverandi árs kolefnisbinding var 0,7 tonn CO₂ á ha og ári og 9,8 tonn CO₂ á ha og ári og var munurinn hámarktækur í báðum tilfellum. Meðalársvöxtur var marktækt lægri í báðum skógargerðum en núverandi ársvöxtur, eða 33% í birki- og 36% í barrskógunum. Það bendir til þess að meðalársvöxtur (og hraði kolefnisbindingar í lífmassa) muni aukast í báðum skógargerðum til framtíðar. Til að útiloka áhrif mismunandi aldurs þá var samanburður einnig gerður á barr og birkiskógum sem voru á aldrinum 15-25 ára og 40-60 ára. Allar breytur sem tengdust stærð trjánna, viðarmagni eða kolefnisbindingu voru marktækt hærri fyrir barrskóginn.

Niðurstöðurnar sýndu að flokkun skóga (*e. stratification*) og gæði kortlagningar skipta miklu máli fyrir gæði og nákvæmni úttekta á kolefnisbindingu skóga. Geta ólíkra skógargerða til vaxtar og kolefnisbindingar er ólík, bæði eftir tegundum en einnig eftir aldri skóga og sögu landnýtingar. Mikilvægt er að átta sig á því hvaða þættir í skógum lýsa best þessum mun á sem bestan máta við kolefnisúttektir. Með því að notast við flokkað slembival við skógarúttekt þá má fækka mæliflötum sem þarf að taka út í skógi. Hvorki birki- né barrskógar sýndu nein skýr merki um að núverandi árs kolefnisbinding væri tekinn að minnka á fyrstu 6 áratugum skógarframvindunnar.

Lykilorð: Kolefnisúttekt, skógarúttekt, birkiskógar, barrskógar, skógrækt, mótvægisáðgerðir.

Abstract

An important function of forests is to sequester carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere and store it as carbon (C) in biomass and soil for a long time. This is a contribution to the mitigation of manmade greenhouse gas emissions and climate change. The increasing debate and demand for the use of responsible methods to estimate the carbon sequestration of forests was the main trigger for this study.

The aim of this project was to i) describe and adapt a methodology to reliably estimate the amount of carbon stock and carbon sequestration in demarcated woodlands (individual forests), ii) carry out assessments and measurements with that methodology in three forests in the south-west of Iceland, in Heidmork, Ölfusvatn and Nesjavellir and finally iii) compare the results on the carbon sequestration of these areas by area, age of forests and dominant tree species.

The assessment was carried out in 2017. The forests were first mapped and stratified by tree species and age. Stratified random sampling was used to assign measurement plots to forest strata. Forest measurements and dendrochronological measurements were carried out on each plot and were sufficient to estimate the age of the dominant trees, the carbon stock in tree biomass for the years 2017 and 2012, and thus the annual carbon sequestration for the last five years.

The results were that the forested area of most of the forests changed somewhat by remapping them, the largest changes were in natural birch forests that had expanded their distribution area or were not included in previous surveys. A comparison was made of trees based on recorded data on tree planting and dendrochronological age dating that revealed an underestimation of age with the dendrochronological data and 3 years were added to the age of trees that had been age estimated with dendrochronological methods.

The total estimate of carbon stock in the biomass of trees (as fixed CO₂) In Heidmork, Ölfusvatn and Nesjavellir was 101.406 (\pm 23.535), 2.585 (\pm 1290) and 1.752 (\pm 875) tons of CO₂ in 2017. These carbon stocks are divided between different forest strata as follows: In Heidmork 15%, 13%, 11% and 61% between natural birch forests, mixed forests, coniferous forests below 5 meter height and coniferous forests above 5 meter height; In Ölfusvatn 93% and 7% between coniferous forests below 5 meter height and planted birch forests; In Nesjavellir 35% and 65% between planted and natural forests.

The current (2012-2017) annual rate of carbon sequestration in tree biomass was estimated to be 7.749 (± 1.742), 300 (± 123) and 148 (± 74) tons CO₂ annually for the forests in Heidmork, Ölfusvatn and Nesjavellir.

There was no significant difference in the growth potential of the forests in these three areas so the data from the different areas were combined for further analysis. The average age of birch forests in this comparison was 25 years, compared to 30 years for all coniferous forests. On average these forest classes produced 0.1 and 2.0 m³ volume of wood per ha and year, the current annual carbon sequestration was 0.7 tons of CO₂ per ha and year and 9.8 tons of CO₂ per ha and year the difference was significant in both cases. The average annual growth was significantly lower in both forest types than the current annual growth or 33% in the birch and 36% in the coniferous forests. That suggests that the average annual growth rate (and the rate of carbon sequestration in biomass) will increase in both types of forest in the future. To exclude the influence of different ages a comparison was made between conifer and birch forests that were in the age classes 15-25 years and 40-60 years. All variables related to tree size, wood volume or carbon sequestration were significantly higher in the coniferous forests.

The results showed that the stratification of forests and the quality of mapping are of great importance for the quality and accuracy of forest inventories and assessments of carbon sequestration in forests. The capacity of different types of forests for growth and carbon sequestration is different by species, the age of the forest and land use history. It is important to understand which elements in forests describes the difference in the best way for assessing the carbon stock and carbon sequestration. Using stratified random sampling in forest inventories reduces the number measurement plots in forests needed for the assessment. Neither birch nor conifer forests showed any clear signs that annual carbon sequestration was decreasing during the first six decades of the forest development.

Keywords: Carbon inventory, forest inventory, birch forests, coniferous forests, forestry, mitigation measures.

Þakkir

Orkuveita Reykjavíkur, Rannsóknarstöð Skógræktar á Mógilsá, Landgræðsluskóli Sameinuðu þjóðanna, Skógræktarfélag Reykjavíkur, Framleiðnisjóður Landbúnaðarins, Sara Riel, Joel Charles Owona, Bjarki Þór Kjartansson, Ólafur Eggertsson, Sævar Hreiðarsson, Helgi Gíslason, Auður Kjartansdóttir, Kimmo Vhirtanen, Guðmundur Oddur Magnússon.

Efnisyfirlit

1. Inngangur	1
1.1 Hlýnun jarðar og gróðurhúsaáhrifin	1
1.2 Kolefnishringrás heimsins og mikilvægi skóga.....	2
1.3 Kolefnishringrásin á Íslandi	4
1.4 Saga skógarúttekta.....	6
1.4.1 Íslensk Skógarúttekt	8
1.4.2 Aðrar sambærilegar úttektir (og mín) á Íslandi	8
1.4.3 Fyrri úttekt á kolefnisforða í Heiðmörk	13
1.5 Áhrif trjategunda á kolefnisbindingu í lífmassa	14
1.6 Aðrir þættir sem hafa áhrif á kolefnisbindingu í lífmassa skóga.....	14
1.7 Aðferðafræði við mat á kolefnisbindingu.....	15
1.8 Markmið rannsókna	16
1.8.1 Kortlagning og flokkun skóglendis.....	16
1.8.2 Aldur trjáa. Áhringjamæling samanborið við framkvæmdarskráningu	16
1.8.3 Samanburður á vaxtarhraða skóga milli Ölfusvatns, Nesjavalla og Heiðmerkur	17
1.8.4 Samanburður á vaxtarhraða og kolefnisbindingu mismunandi skógagerða í lífmassa .	17
1.8.5 Besta mat og skekkjumörk á standandi viðarforða í lífmassa og kolefnisbindingu í lífmassa skóga heillar skógarjarðar	17
2. Efni og aðferðir (vinnuferill, gögn og aðferðir)	18
2.1 Lýsing á rannsóknarstöðum.....	18
2.1.1 Jarðfræði og jarðvegur á rannsóknarstöðum	18
2.1.2 Veðurfar á rannsóknarstöðum	19
2.1.3 Gróðurfar og landgerðir á rannsóknarstöðum	20
2.2 Rannsókn og öflun gagna	23
2.2.1 Afmörkun skóga.....	23
2.2.2 Flokkun skógarreita og staðarval úrtaks.....	24
2.2.3 Útreikningar á kolefnisforða svæðanna og öryggismörkum	26
2.2.4 Uppskölun og skekkjumat	29
3. Niðurstöður	30
3.1 Kortlagning og flokkun skóga	30
3.2 Áhrif endurkortlagningarinnar á flatarmál skóga og skógagerða.....	31
3.2.1 Heiðmörk	31
3.2.2 Ölfusvatn	32
3.2.3 Nesjavellir	33
3.3 Samanburður á aldri gróðursetninga með borkjarna og framkvæmdarskráningu.	33
3.4 Samanburður á vaxtarhraða skóga milli Ölfusvatns, Nesjavalla og Heiðmerkur	34
3.5 Samanburður á vexti og bindihraða skógagerða	35
3.5.1 Ársvöxtur og meðalársvöxtur í öllu gagnasafninu	35
3.5.2 Núverandi árs kolefnisbinding barr- og birkiskóga.....	37
3.5.3 Vöxtur og kolefnisbinding yngri barr- og birkiskóga.....	38
3.5.4 Vöxtur og kolefnisbinding eldri barr- og birkiskóga	39
3.6 Vöxtur og kolefnisbinding í gróðursettum og náttúrulegum birkiskógum.	40
3.7 Hvernig breytist grunnflötur með aldri?.....	42
3.7.1 Ógrisjaðir barrskógar	42
3.7.2 Grisjaðir barrskógar	43

3.8	Hvernig breytist grunnflötur með aldri í birkiskógum	43
3.9	Heildarmat á kolefnisforða og núverandi árs kolefnisbindingu í lífmassa trjáa	44
3.9.1	Heiðmörk	44
3.9.2	Ölfusvatn	47
3.9.3	Nesjavellir	48
3.10	Hverju breytti það að flokka barrskóga í undir 5m og yfir 5m hæð?	49
4.	Umræður	51
4.1	Áhrif endurkortlagningar og flokkunar skóglendis	51
4.2	Áhrif aðferða við skógarúttetir á mat kolefnisforða skógar.....	52
4.3	Aldur trjáa. Áhringjamæling samanborið við framkvæmdarskráningu	53
4.4	Samanburður á vaxtarhraða skóga milli Ölfusvatns, Nesjavalla og Heiðmerkur.....	53
4.4.1	Samanburður á vaxtarhraða og kolefnisbindingu mismunandi skógargerða í lífmassa	54
4.4.2	Besta mat og skekkjumörk á standandi viðar- og kolefnisforða í lífmassa Heiðmerkur.	56
4.4.3	Besta mat og skekkjumörk á meðal árs vexti lífmassa Heiðmerkur	58
4.4.4	Besta mat á standandi kolefnisforða í lífmassa Ölfusvatns og Nesjavalla.....	58
4.5	Aðferðaleg álitaefni	60
4.6	Kolefnisbinding í lífmassa vs. kolefnisbinding vistkerfis	60
5.	Ályktanir	62
6.	Heimildaskrá.....	64

Myndaskrá:

- 1. mynd.** Kolefnishringrás jarðar mætti lýsa sem kerfi þar sem gróðurhúsalofttegundin CO₂ ferðast milli mismunandi svelgja sem allir eru tengdir innbyrðis (Ciais et al, 2013). Þeir eru andrúmsloft (~828 Pg C), þurrlandi þar sem C er í lifandi vef gróðurs (450 – 650 Pg C) og í dauðu lífrænu efni í feyru og jarðvegi (1500 – 2400 Pg C). Í skýrslu Milliríkjanefndar Sameinuðu Þjóðanna um loftslagsmál (Ciais et al, 2013) var tekið fram að, þar að auki væri umtalsvert magn af gömlu kolefni bundið í jarðvegi í mýrum (300 – 600 Pg C) og í sífrera (~1700 Pg C). Í höfum er kolefni á formi uppleysts ólífræns kolefnis (Dissolved Inorganic Carbon (DIC, ~38.000 Pg C). Í tilfelli jarðefnaeldsneytis, þá er magn í setlögum um 150 Pg C og 1600 Pg C í hafdjúpum í formi CaCO₃. Mynd og myndatexti tekin upp úr Cais, o.fl., 2013.3
- 2. mynd.** Einfölduð mynd af kolefnishringrás jarðar á árunum 2000-2009 í milljörðum tonna CO₂-C (umreiknað í hreint kolefni). Náttúruleg hringrás CO₂ milli andrúmslofts og lands/hafs er sýnd með hringferlum. Lóðrétt píla upp sýnir árlega manngerða losun með bruna á jarðefnaeldsneyti og sementsgerð, en punktapíla upp sýnir losun vegna skógareyðingar. Árleg aukning í andrúmslofti er sýnd innan sviga (45% losunar) og hluti losunarinnar sem bundinn er sama ár á landi og í hafi (samaltals 55%). Myndin er byggð á Ciais o.fl. (2013) og Halldóri Björnssyni o.fl. (2018). Myndin er fengin frá Bjarna Diðriki Sigurðssyni og Borgþóri Magnússyni (2019) (með leyfi fyrsta höfundar).4
- 3. mynd.** Einfölduð mynd af kolefnishringrás Íslands á árunum 2005-2015, fengin frá Halldóri Björnssyni o.fl. (2018). Tölur standa fyrir flæði kolefnis í milljónum tonna CO₂ á ári. Jákvæðar tölur sýna losun frá landi til andrúmslofts en neikvæðar sýna upptöku CO₂ úr andrúmslofti og umbreytingu þess í ýmis önnur efnasambönd. Tölur um losun Íslendinga, losun frá framræstu votlendi og upptöku með skógrækt, landgræðslu eða endurheimt votlendis eru fyrir árið 2015, en aðrar tölur voru áætlaðar fyrir árið 2006.6
- 4. mynd.** Staðsetningar mæliflata: Heiðmörk (H), Nesjavöllum (N) og Ölfusvatni (Ö).18
- 5. mynd.** Kort af Heiðmörk. Skógargerðir eru merktar með mismunandi litum og mæliflata í þessu verkefni er sýndir með rauðum hring.20
- 6. mynd.** Kort af kortlögðum skógarflokkum og mæliflötum á Nesjavöllum. Skógargerðir eru merktar með mismunandi litum og staðsetning mæliflata með rauðum eða gulum hring. Hringur með kross merkir að jarðvegsmælingar og sýnataka fór einnig fram (Owona 2019).22
- 7. mynd.** Kort af kortlögðum skógarflokkum og mæliflötum á Ölfusvatni. Skógargerðir eru merktar með mismunandi litum og mælifletir með rauðum eða gulum hring. Hringur með kross merkir að jarðvegsmælingar og sýnataka fór einnig fram (Owona 2019).23
- 8. mynd.** Stærð skóglendis á Ölfusvatni í ha. Samanburður á úttekt frá 2007 (Ingvi Þorsteinsson 2007) við þessa úttekt. Árið 2007 (grá súla) var skóglendi ekki flokkað en árið 2017 var skóglendi flokkað í barrskóg (gulbrúnt) og ræktaðan birkiskóg (grænt).32
- 9. mynd.** Stærð skóglendis á Nesjavöllum í ha. Kortlagður skógur 2017 í samanburði við úttekt frá 2007 (Ingvi Þorsteinsson. 2007). Í fyrri úttekt var ekki lagt mat á stærð náttúrulegra birkiskóga né þeir flokkaðir en árið 2017 var skóglendi flokkað í náttúrulega birkiskóga (rauðbrúnt) og ræktaðan birkiskóg (grænt).33
- 10. mynd.** Meðalársvöxtur og núverandi ársvöxtur bolviðar (hlaupandi vöxtur) í m³ á ha og ár í birkiskógum og barrskógum í Heiðmörk, Nesjavöllum og á Ölfusvatni haustið 2017. Meðalársvöxtur var meðaltal vaxtar miðað við aldur skógar en ársvöxtur var meðaltal vaxtar síðustu fimm ára frá mælingu, það er árunum 2013-2017. Tölfræðileg greining er sýnd í Töflu 8.36

11. mynd. Meðal kolefnisbinding og núverandi árs kolefnisbinding birkiskóga og barrskóga (tonn CO ₂ á ha og ári) í Heiðmörk, Nesjavöllum og á Ölfusvatni haustið 2017. Meðalárs kolefnisbinding var meðaltal bindingar miðað við aldur skógar en núverandi árs kolefnisbinding var meðaltal bindingar síðastliðinna fimm ára. Tölfræðileg greining er sýnd í 10. Töflu.	37
12. mynd. Samanburður á breytingum á núverandi árs kolefnisbindingu í lífmassa skógar (tonn CO ₂ á ha og ár) með aldri í ræktuðum birkiskógum og barrskógum árið 2017. Gögn úr Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum voru flokkuð og sameinuð.	38
13. mynd. Samanburður á meðalvaxtarhraða m ³ á ha og ári gróðursetts og náttúrulegs birkis í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum haustið 2017. Ennfremur eru sýnd 95% öryggismörk fyrir hvorn flokkinn fyrir sig.	41
14. mynd. Breytingar á grunnfleti í brjósthæð (E: Basal area, sk.st. BA mælt í m ² á ha) með aldri á öllum mæliflötum í ógrísjúðum barrskógum í Heiðmörk og Ölfusvatni árið 2017. Línan er aðhvarf.....	42
15. mynd. Breytingar á grunnfleti í hnéhæð (BA mælt í m ² á ha) með aldri í birkiskógum í Heiðmörk og Ölfusvatni árið 2017. Línan er aðhvarf.	44
16. mynd. CO ₂ bundið í lífmassa í trjám í Heiðmörk haustið 2017. Þetta er heildarmagn í 1960 ha skóga.	45
17. mynd. Núverandi árs CO ₂ binding í lífmassa í trjám árið 2017 í Heiðmörk. Myndin sýnir metinn heildar lífmassa flokka í tonnum CO ₂	46
18. mynd. Áætlað magn CO ₂ á ha bundið í lífmassa í mismunandi skógargerðum í Heiðmörk árið 2017. Myndin sýnir lífmassa flokka í tonnum CO ₂ á ha með 95% vikmörkum.	47
19. mynd. Áætlað magn CO ₂ bundið í lífmassa í skóglendi á Ölfusvatni. Myndin sýnir lífmassa flokka í tonnum CO ₂ á ha með 95% vikmörk.	48
20. mynd. Áætlað magn CO ₂ bundið í lífmassa í skóglendi á á Nesjavöllum. Myndin sýnir lífmassa flokka í tonnum CO ₂ á ha með 95% vikmörk.	49

Töfluskrá:

- Tafla 1.** Helstu niðurstöður úr M.S. verkefni Pic (2009). Þar var kolefnisbinding skóga í Heiðmörk metin árið 2007. Í töflunni er uppsafnaður lífmassi koldíoxíðs í skógi, árleg binding koldíoxíðs skóga og standandi heildarlífmassi í skógi. Einingar í töflunni eru í tonnum á hektara.14
- Tafla 2.** Meðalhiti og úrkoma á árunum 2008- 2017 í nágrenni rannsóknarsvæðanna og víðar. Gögnin frá Hólmsheiði eru um 2 km frá Heiðmörk og Þingvellir eru um 15-16 km frá Nesjavöllum og Ölfusvatni. Akureyri og Mývatnu er dæmi um veðurstöðvar í öðrum landshlutum. Óbirt gögn, Veðurstofa Íslands.19
- Tafla 3.** Sýnir skráðar breytur í rannsókn.25
- Tafla 4.** Jöfnur sem notaðar voru við að reikna út lífmassa og rúmmál stakra trjáa.28
- Tafla 5.** Flatarmál skógarflokka, fjöldi útlagðra og mældra mæliflata, flatarmál sem hver mæliflötur stendur fyrir í skógi og fjöldi mældra trjáa á úttektarsvæðum. Mælifletir voru lagðir út í Heiðmörk og á Ölfusvatni og Nesjavöllum í Grafning. Sumarið 2017 voru allir mælifletir heimsóttir og mældir.30
- Tafla 6.** Samanburður á flatarmáli kortlagðra skógarflokka í Heiðmörk. Taflan sýnir flatarmál skógarflokka eins og það var í fyrri úttekt á kolefnisbindingu skógar árið 2007 (Pic, 2009) og flatarmál skógarflokka eftir endurkortlagningu fyrir þessa úttekt sem unnin var árið 2017. Flatarmál er í hekturum en einnig er sýnd hlutfallsleg breyting á skógarflokki milli úttekta.32
- Tafla 7.** Meðaltal og staðalskekkja (e: standard error sk.st. SE) helstu skógmælingabreyta í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum árið 2017 í fjórum skógargerðum. Einingar í töflu eru eftirfarandi: Meðalaldur er í árum, grunnflötur eru fermetrar á hektara (m^2ha^{-1}), yfirhæð er í metrum, viðarmagneru rúmmetrar á hektara (m^3ha^{-1}), núverandi ársvöxtur (H.vöxtur) og meðalársvöxtur (M.vöxtur) eru rúmmetrar á hektara og ári ($m^3ha^{-1}ár^{-1}$). Sjá 4. Töflu og 5. mynd fyrir nánari upplýsingar um fjölda mæliflata, stærð og staðsetningu skógarflokka.35
- Tafla 8.** Samanburður á meðalársvexti og núverandi ársvexti birki- og barrskóga þar sem gögn hafa verið sameinuð úr Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum frá árinu 2017. Sjá 10. mynd. Sýnd eru P gildi ferveikagreingar (Anova).35
- Tafla 9.** Aldurssamanburður á gögnum úr birkiskógum og barrskógum sem voru annarsvegar á aldursbilinu 15-25 ára og hinsvegar 40-60 ára, árið 2017. Grunnflötur er m^2 á ha, yfirhæð er í metrum, viðarforði er m^3 á ha, kolefnisforði er CO_2 tonn á ha, meðalársbinding og núverandi ársbinding eru tonn á ha og ári.39
- Tafla 10.** Samanburður á ræktuðum og náttúrulegum birkiskógum í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum sem mældir voru árið 2017. Grunnflötur er m^2 á ha, yfirhæð er í metrum, viðarmagn er m^3 á ha, CO_2 lífmassi er í tonnum CO_2 á ha, meðalársbinding og núverandi árs binding í tonnum CO_2 á ha og ári.40
- Tafla 11.** Helstu niðurstöður kolefnisbindingar skóga í Heiðmörk, þar var meðaltal núverandi árlegrar bindingar koldíoxíðs skóga og standandi rúmmál. Í töflunni er birt mat ársins 2017 í tonnum á hektara.47
- Tafla 12.** Helstu niðurstöður kolefnisbindingar skóga á Ölfusvatni, það er árleg binding koldíoxíðs, meðal binding koldíoxíðs og viðarmagn skóga. Í töflunni er birt mat ársins 2017 í tonnum á hektara. ..48
- Tafla 13.** Helstu niðurstöður kolefnisbindingar skóga á Nesjavöllum, það er árleg binding koldíoxíðs, meðal binding koldíoxíðs og viðarmagn skóga. Í töflunni er birt mat ársins 2017 í tonnum á hektara. ..49
- Tafla 14.** Samanburður á barrskógarflokki yfir 5 metra hæð og undir 5 metra hæð í Heiðmörk árið 2017. Aldur er í árum, grunnflötur er m^2 á ha, yfirhæð var metrar, viðarmagn er m^3 á ha, CO_2 lífmassi er í tonnum CO_2 á ha, CO_2 meðalbinding og núverandi árleg binding er í tonnum CO_2 á ha og ári.51

Tafla 15. Samanburður við niðurstöður úr fyrri úttekt (Pic. 2009) á skógum í Heiðmörk sem fór fram árið 2007 við niðurstöður úr þessari úttekt. Einingar eru heildarlífmassi trjáa í tonnum á ha.58

1. Inngangur

Þetta verkefni er tilkomið vegna mikilvægi skógræktar við að binda koldíoxíð (CO_2) úr andrúmslofti og geyma sem kolefni (C) í lífmassa. Aukin umræða um mikilvægi þess að nota ábyrgar aðferðir til þess að meta kolefnisbindingu skóga til mótvægis losunar gróðurhúsalofttegunda og loftslagsbreytingar voru aðal kveikjan að þessari rannsókn. Úttektir sem þessi nýtist einnig til þess að meta rúmmál bolviðar og viðarvöxt í skógi sem er undirstaða reksturs á viðkomandi skóglendi. Ennfremur þá leggur þessi rannsókn til nýja þekkingu á hver kolefnisbindingin er í skógargerðum á ákveðnum aldri á Suðvesturlandi.

1.1 Hlýnun jarðar og gróðurhúsaáhrifin

Losun á koldíoxíði (CO_2) af mannavöldum er megin áhrifavaldur loftslagsbreytinga á jörðinni. Aðgerðir til þess að draga úr losun og auka bindingu og minnka þannig styrk CO_2 í andrúmslofti skipta því sköpum til þess að draga úr áhrifum loftslagsbreytinga (IPCC, 2021).

Kolefnishringrásin er flókið ferli þar sem náttúrulegt flæði kolefnis á sér stað milli ólíkra kolefnisforða á yfirborði jarðar og andrúmslofts (sjá einnig 1. og 2. mynd). Plöntur á landi og þörungar hafsins gegna mikilvægu hlutverki í hringrásinni þar sem þær binda CO_2 úr andrúmsloftinu sem lífrænt efni (1. mynd). Lögð hefur verið aukin áhersla á að varpa skýrara ljósi á kolefnishringrás jarðar og hvernig menn hafa haft áhrif á hana (Booth o.fl., 2012). Með auknum skilningi á hringrás kolefnis hefur áherslan aukist á mögulegar leiðir til að binda kolefni úr andrúmslofti til að vega upp á móti aukinni losun af völdum manna. Flæði kolefnis á milli þjurrlandis og andrúmslofts er einn af þeim lykilferlum í kolefnishringrás jarðar sem horft er til í Loftslagssamningi Sameinuðu þjóðanna (UNFCCC, 1992). Mikilvægi losunar og bindingar vegna skógareyðingar, nýskógræktar og skógarumhirðu hefur alltaf verið ljós og þáttur sem allar þjóðir þurfa að telja fram í bókhaldi til Loftslagssamningsins og Kyotobókunar hans (UNFCCC., 2002). Niðurstöður rannsókna hafa víða sýnt getu til uppsöfnunar kolefnis í þjurrlandisvistkerfum, þ.á.m. í evrópskum skógum (Wamelink o.fl., 2009; Baritz o.fl., 2010).

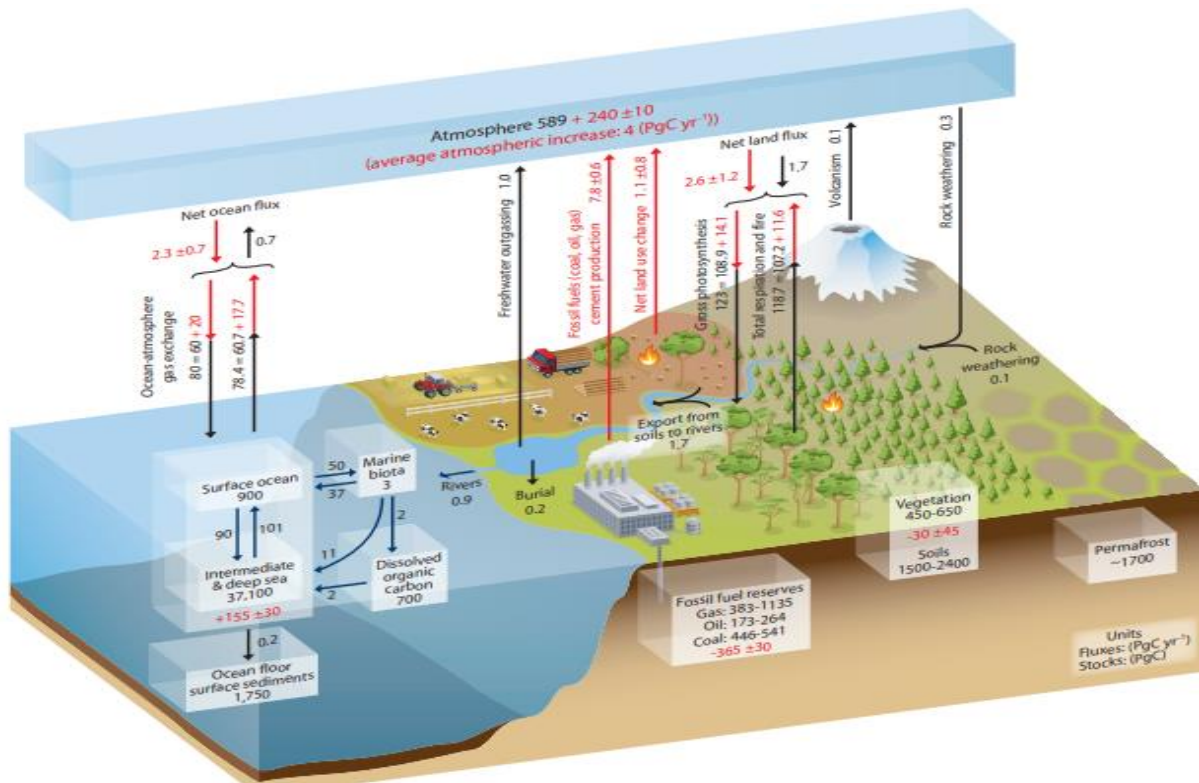
Nettóslosun gróðurhúsalofttegunda (GHL) í flokki landnotkunar, breyttrar landnotkunar og skógræktar (*E: Land Use, Land Use Change and Forestry - LULUCF*) á heimsvísu er um fjórðungur af árlegri aukningu GHL í andrúmsloftinu, og er að mestu rakin til losunar nituroxíðs (N_2O) frá hrísgrjónarækt og tilbúnum áburði, metanlosun (CH_4) frá búsmala og til losunar CO_2 vegna skógareyðingar í hitabeltinu (IPCC, 2013). Á Íslandi er vægi nettólosunar vegna LULUCF 66% af heildarlosun (Nicole Keller o.fl., 2022) og þar vegur losun frá framræstu

votlendi þyngst. Þessi losun vegur mun þyngra á Íslandi en í öðrum löndum því að bein losun GHG er hlutfallslega minni hér en í öðrum löndum með mikið framræst votlendi t.d. Finnlandi (Official Statistics of Finland, 2021) og Svíþjóð (United Nations, 2020). Minni bein losun hér stafar einfaldlega af minni mannfjölda og iðnaði á en í öðrum löndum.

Strjálbýli Íslands, og þar með hlutfallslega minni samkeppni um landnýtingu en víðast gerist, gefur umtalsverð tækifæri hér til þess draga úr nettólosun GHG vegna núverandi landnýtingar. Dæmi um slíkar breytingar er að auka nýskógrækt og landgræðslu (eykur bindingu) eða auka endurheimt votlendis (dregur úr losun) (Hunziker, o.fl., 2019; Ása L. Aradóttir o.fl., 2000; Gunnhildur E.G. Gunnarsdóttir, 2017).

1.2 Kolefnishringrás heimsins og mikilvægi skóga

Kolefnishringrás náttúrunnar er flókin (1. mynd), enda er kolefni (C) ein af lykilsameindum lífs á jörðinni. Í vistkerfum á þurrlandi þá einkennist kolefnishringrásin af samspili ferla, þar sem ljóstíllífun (kolefnisupptaka) og öndun/niðurbrot (kolefnislosun) gegna lykilhlutverki. Lífrænt kolefni í lífmassa og jarðvegi skóga er afleiðing af bindingu CO₂ úr andrúmslofti í plöntuvefi með ljóstíllífun, en að jafnaði og þar sem gróðurþekja er stöðug losnar álíka mikið CO₂ árlega frá plöntum í öndun eins og þær mynda lífræn efni (Chapin III o.fl., 2011). Vistkerfi eins og skógar, sem innihalda mikið af langlífum plöntum, geta bundið meira magn kolefnis í lífmassa en önnur þurrlandisvistkerfi (Hendriks, o.fl., 2020). Kolefni bundið í lífmassa og önnur lífræn efni færast síðan með tímans rás í jarðveg með umsetningu lífræns efnis úr feyru og dauðum rótum (1. mynd). Þetta er mikilvæg vistkerfaþjónusta sem gefur möguleika á aukinni kolefnisbindingu með nýskógrækt og breyttri umhirðu eldri skóga (Fahey o.fl., 2010; Sedjo og Sohngen, 2012).

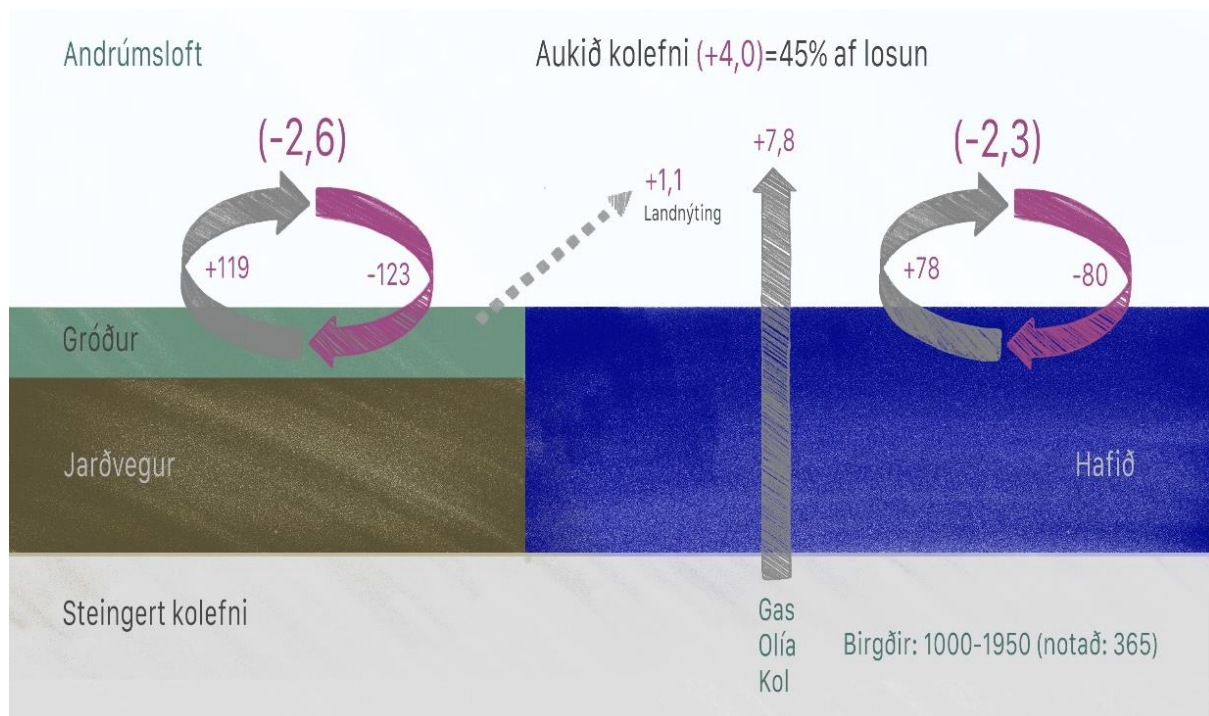


1. mynd. Kolefnishringrás jarðar mætti lýsa sem kerfi þar sem gróðurhúsalofttegundin CO₂ ferðast milli mismunandi svelgja sem allir eru tengdir innbyrðis. Þeir eru andrúmsloft (~828 Pg C), þurrlandi þar sem C er í lifandi vef gróðurs (450 – 650 Pg C) og í dauðu lífrænu efni í feyru og jarðvegi (1500 – 2400 Pg C). Í skýrslu Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsmál (Ciais o.fl., 2013) var tekið fram að, þar að auki væri umtalsvert magn af gömlu kolefni bundið í jarðvegi í mýrum (300 – 600 Pg C) og í sífrera (~1700 Pg C). Í höfum er kolefni á formi uppleysts ólífræns kolefnis (Dissolved Inorganic Carbon (DIC), ~38.000 Pg C). Í tilfelli jarðefnaeldsneytis, þá er magn í setlögum um 150 Pg C og 1600 Pg C í hafdjúpum í formi CaCO₃. Mynd og myndatexti tekin upp úr Cais, o.fl. (2013).

Síðan 1750 hefur samfélag manna verið að taka kolefni úr langtíma geymslu jarðarinnar með því að brenna kol, olú og gas og vinna sement (IPCC, 2014). Með því móti hefur verið aukið við magn kolefnis í andrúmslofti og við það heildarmagn sem er í umferð í hinu hnattræna kolefnisflæði. Á tímabilinu 2000-2009 var samfélag manna þannig að auka árlega við kolefnisflæði um tæpa 29 milljarða tonna CO₂ (7,8 milljarða tonna C) sem enduðu í andrúmsloftinu (1. mynd).

Skógar- og jarðvegseyðing eru afleiðingar ósjálfbærrar landnýtingar sem leiðir til þess að kolefnisrík vistkerfi breytast í illa gróið land. Afleiðingar þess eru að ákveðið magn kolefnis sem geymt hefur verið í landi endar í andrúmsloftinu. Á tímabilinu 2000-2009 bættust 4 milljarðar tonna CO₂ (1,1 milljarðar tonna af C) árlega við andrúmsloftið vegna þessa (2. mynd). Samtals losnuðu því níu milljarðar tonna C út í andrúmsloftið af mannavöldum á tímabilinu 2000-2009. Engu að síður þá hækkaði styrkur CO₂ í andrúmslofti aðeins um 45% af

Þessum níu milljörðum, en ástæða þess er hin náttúrulega kolefnisbinding sem á sér stað í hafi og á landi (2. mynd). Kolefnisbinding er því umtalsverð bæði á landi og í hafi, en er hægt að auka hana enn frekar?



2. Mynd. Einfölduð mynd af kolefnishringrás jaðrar á árunum 2000-2009 í milljörðum tonna CO₂-C (umreiknað í hreint C). Náttúruleg hringrás CO₂ milli andrúmslofts og lands/hafs er sýnd með hringferlum. Lóðrétt píla upp sýnir árlega manngerða losun með bruna á jarðefnaeldsneyti og sementsgerð, en punktapíla upp sýnir losun vegna skógareyðingar. Árleg aukning í andrúmslofti er sýnd innan sviga (45% losunar) og hluti losunarinnar sem bundinn er sama ár á landi og í hafi (samtals 55%). Myndin er byggð á Ciais o.fl. (2013) og Halldóri Björnssyni o.fl. (2018). Myndin er fengin frá Bjarna Diðriki Sigurðssyni og Borgþóri Magnússyni (2019) (birt með leyfi fyrsta höfundar).

Mikil binding á sér stað í hafinu, en maðurinn hefur ekki mikil áhrif á þá ferla. En það geta þó verið ýmsar afleiðingar af þessu í hafinu, eins og t.d. súrnun sjávar (Halldór Björnsson o.fl., 2018). Hinsvegar með því að breyta landnotkun á landi þannig að kolefnisrík vistkerfi taki við af kolefnisfátækum er hægt að auka kolefnisbindingu á gróðri og í jarðvegi, ekki síst þar sem umsetning er hæg eins og á norðlægum breiddargráðum (Chapin o.fl., 2011).

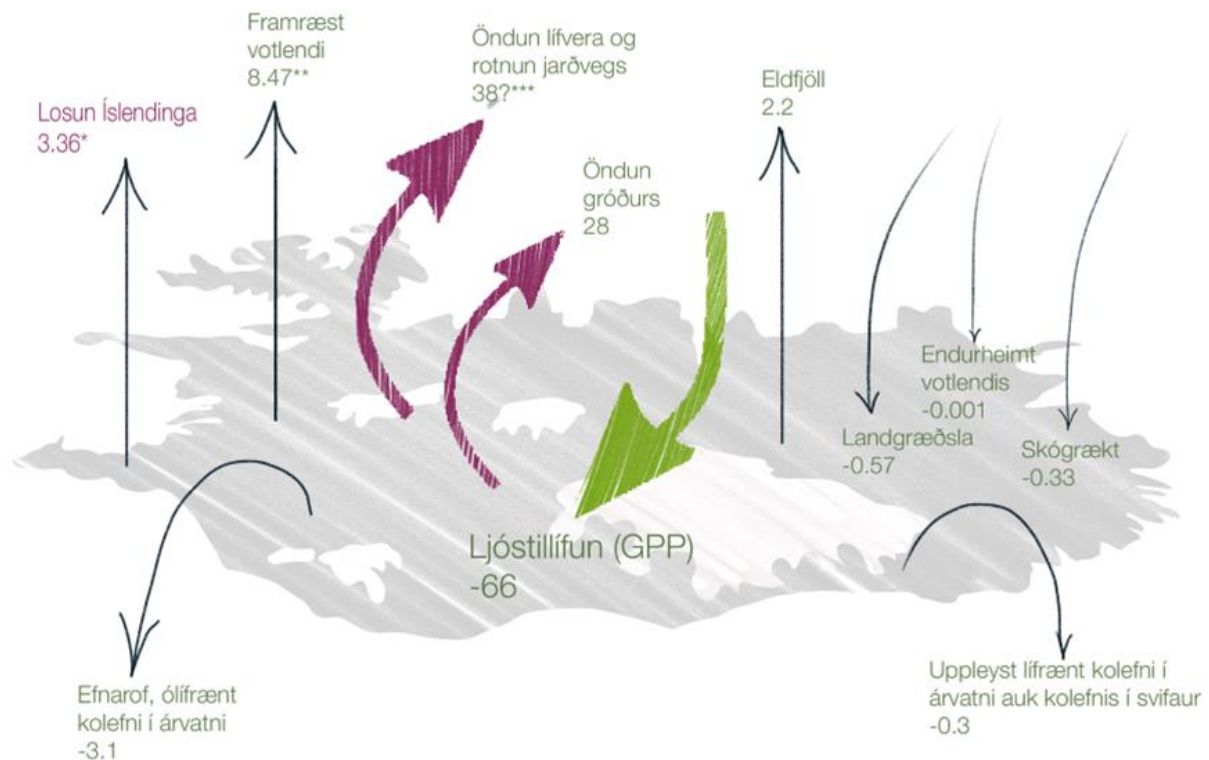
1.3 Kolefnishringrásin á Íslandi

Hér á landi erum við að losa meira koldíoxíð með bruna jarðefnaeldsneytis (3,4 milljónir t CO₂) en sem nemur losun CO₂ frá eldfjöllum og jarðhitasvæðum (3. mynd) (Halldór Björnsson o.fl., 2018), en það eru ekki stærstu hlutar í kolefnishringrásar Íslands. Áætlað er að gróið land hér á landi hafi tekið upp 66 milljónir tonna CO₂ (18 milljónir tonna C) með ljóstillífun á hverju ári

á árabílinu 2005-2015 (3. mynd). Þá var árleg binding með skógrækt og landgræðslu áætluð um 0,9 milljónir tonna CO₂ árið 2015. Þar að auki var efnaveðrun ólífræns CO₂ og flutningur ólífræns og lífræns C með árvatni til sjávar metin um 3,4 milljónir tonna árið 2006. Árleg CO₂ upptaka landsins var því áætluð um 70 milljónir tonna af CO₂, þar af var 1.3% tilkomið vegna stýrðra aðgerða manna eins og skógrækt og landgræðslu (Halldór Björnsson o.fl., 2018).

Mismunur milli losunar og upptöku á 3. mynd (þ.e. 70 milljónir tonna) er áætlaður árlegur kolefnisjöfnuður Íslands á þessu tímabili frá bæði náttúrulegum og manngerðum ferlum. Í raun var Ísland því sennilega með um 10 milljónir tonna CO₂ í mínus á þessu tímabili. Náttúran tók upp um 70 milljón tonn CO₂ en losun var um 80 milljón tonn. Heildarlosun frá framræstu votlendi var um 10% að því heildarmagni sem losnaði af koldíoxíði frá náttúrulegu hringrásinni (Halldór Björnsson o.fl., 2018). Mikilvægt er því að breyta landnýtingu þannig að kolefnisforði landsins aukist hérlendis.

Skóglendi á Íslandi (bæði ræktaðir skógar og náttúrulegir) þekur aðeins um 2% af flatarmáli landsins, en lífmassi í skóglendi hér á landi nemur samt 37% af heildarmagni lífmassa þurrlendisvistkerfa (Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon, 2019). Lífmassi ræktaðs skóglendis var jafnframt tekinn saman 2019, þá nam flatarmál skógræktarsvæða aðeins um 0.4% af heildarflatarmáli Íslands, en höfðu engu að síður að geyma um 10% af áætluðum lífmassa landsins. Þegar skoðuð var árleg aukning kolefnis ofanjarðar í trjám og botngróðri á Íslandi þá var að bindast í skógum um 14% af árlegri heildarupptöku landsins (Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon, 2019). Að breyta landnýtingu þannig að skóglaut land klæðist skógi er því mjög öflug leið til að auka kolefnisbindingu landsins.



3. mynd. Einfölduð mynd af kolefnishringrás Íslands á árunum 2005-2015, aðlöguð frá Halldóri Björnssyni o.fl. (2018). Tölur standa fyrir flæði kolefnis í milljónum tonna CO₂ á ári. Jákvæðar tölur sýna losun frá landi til andrúmslofts en neikvæðar sýna upptöku CO₂ úr andrúmslofti og umbreytingu þess í ýmis önnur efnasambönd. Tölur um losun Íslendinga, losun frá framræstu votlendi og upptöku með skógrækt, landgræðslu eða endurheimt votlendis eru fyrir árið 2015, en aðrar tölur voru áætlaðar fyrir árið 2006.

*Losun CO₂ af völdum manna frá Íslandi var 3,36 milljón tonn CO₂ árið 2015, en alls var heildarlosun af mannavöldum 4,54 milljón tonn CO₂ ígilda, þegar öðrum gróðurhúsalofttegundum hafði verið bætt við. Þessar tölur taka ekki til losunar vegna breytinga á landnýtingu (framræstu votlendi o.fl.). Að auki eru aðþjóðaflug og siglingar ekki taldar með.

**Losun CO₂ frá framræstu votlendi, sem annaðhvort hefur verið breytt í ræktað land eða er flokkað sem almennt graslandi, var áætluð vera 8,47 milljón tonn árið 2015. Þetta er stærsti þátturinn í losun gróðurhúsalofttegunda sem tengist landnýtingu, árið 2015 losnuðu alls um 10,27 milljón tonn CO₂ ígilda frá Íslandi vegna landnýtingar.

***Hvað kolefnisjöfnuð Íslands varðar var mest óvissa á þessum þætti. Að hluta til skarast hann einnig við það magn CO₂ sem áætlað er að losni árlega frá framræstu votlendi.

1.4 Saga skógarúttekta

Til að meta kolefnisbindingu skóga á ákveðnu svæði eða í heilu landi þarf að gera úttekt á standandi lífmassa og jarðvegi. Sögu skógarúttekta má rekja aftur til loka miðalda þegar fyrst fór að bera á viðarskortri eftir ofnýtingu skógarauðlinda, í staðinn þá neyddust menn til þess að skipuleggja skóga sérstaklega í nágrenni bæja og náma (Loetsch o.fl., 1973). Í Skandinavíu má rekja sögu landsskógarúttekta til upphafs seinustu aldar með kerfisbundnum mælingum á skógum á jörðu niðri. Aðferðafræði við gerð þeirra hefur þróast með tímanum, en notkun gervihnattamynda og stafrænnar kortavinnslu hófst til dæmis í landsskógaúttektum á níunda áratug seinustu aldar í Finnlandi (Tompo o.fl., 1999).

Markmið skógarúttekta var í upphafi að afla upplýsinga um hráefnisforða í skógum, þá sérstaklega magn til timbur- og pappírframleiðslu, leggja mat á hverjar breytingar gætu orðið í nánustu framtíð og afla upplýsinga um tegundasamsetningu. Þá voru skógmælingar notaðar til þess að mæla rúmmál bolviðar, viðarvöxt og meta hvort flatamál skóga hafði vaxið eða minnkað (Ranneby o.fl., 1987).

Þörfin til þess að varpa ljósi á ýmsa aðra þætti eins og náttúruvernd, útivist og mengun jókst eftir því sem leið á 20. öldina. Upplýsingar úr landsskógarúttektum urðu með árunum afar mikilvægar við ákvarðanatöku hjá skógariðnaðinum og stjórnvöldum. FAO birti fyrsta mat á skógarauðlindum heimsins 1948 og hefur síðan gefið út skýrslur um ástand skógarauðlinda á heimsvísu (FAO, 2004). Þá hafa landsúttektir þjóða verið aðalheimildir fyrir mat á auðlindum skóga heimsins (*E: Global Forest Resource Assessment, FRA*), en það er yfirgripsmikið yfirlit yfir ástand, umhirðu og notkun skógarauðlinda heimsins sem gefið er út á fimm ára fresti (FAO, 2020).

Loftslagssamningur Sameinuðu þjóðanna (*E: United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*) liggur til grundvallar alþjóðlegrar samvinnu um loftslagsmál sem felur m.a. í að samhæfa aðgerðir til að draga úr loftslagbreytingum og að undirbúa aðlögun að loftslagsbreytingum. Í kjölfar UNFCCC og Kyoto bókunarinnar í lok 20. aldarinnar bættist við þörf fyrir nýjar upplýsingar um kolefnisbúskap skóglenda, en það hefur styrkt stöðu landsskógarúttekta um allan heim. Reynslan hefur sýnt að landsskógarúttektir gegna mikilvægu hlutverki við að leggja mat á kolefnisforða og leggja til framfara og þekkingar á aðferðum til þess að draga úr kolefnislosun og til aukinnar kolefnisbindingar (McRoberts o.fl., 2010).

Mikilvægi þessa var undirstrikað á sjöundu ráðstefnu (COP7) UNFCCC, auk þess var það hluti af skilmálum Kyoto bókunarinnar að ríki gerðu grein fyrir losun og bindingu GHG í loftslagsbókhaldi sínu (UNFCCC, 2002). COP7 taldi upp fimm megin forðabúr kolefnis á þurrlendi sem þyrfti að gera grein fyrir; lífmassa ofanjarðar (tré og gróður), lífmassa neðanjarðar (lifandi rôtarkerfi gróðurs) og kolefni í feyru og dauðum viði. Í COP7 samþykktinni er lögð áhersla á að enginn af þessum forðabúrum skuli vera tvítalinn og mikilvægt sé að undanskilja ekki hluta vistkerfa sem hafa vigt sem kolefnisvelgir.

Verkefnið sem hér er kynnt er ætlað að lýsa vísindalegri aðferðafræði við að meta magn kolefnis og kolefnisbindingu með áreiðanlegum hætti í afmörkuðum skóglendum á Íslandi og framkvæma úttektir og mælingar í samræmi við það markmið. Áherslan hér er hvernig megi meta kolefnisforða og kolefnisbindingu ofanjarðar hluta tiltölulega ungra skóga, en annar hluti

Þessarar rannsóknar (Owona, 2019) tók til kolefnisbindingar í öðrum hlutum vistkerfisins, eins og í jarðvegi, gróðri og feyru.

1.4.1 Íslensk Skógarúttekt

Áður en verkefnið Íslensk skógarúttekt (ÍSÚ) hófst formlega (Arnór Snorrason og Bjarki Þór Kjartansson, 2004) fóru fram nokkur rannsóknaverkefni þar sem kolefnisforðar skóga og annarra vistkerfa voru metnir á afmörkuðum stöðum/reitum (Arnór Snorrason o.fl., 2002; Arnór Snorrason o.fl., 2000; Ása Aradóttir o.fl., 2000) í sérstöku átaksverkefni sem starfsmenn Mógilsár, rannsóknarsviðs Skógræktarinnar stóðu að eftir 1995.

ÍSÚ hófst árið 2005 og hefur verið vistað á Mógilsá, rannsóknarsviði Skógræktarinnar allar götur síðan. ÍSÚ framkvæmir landsskógaúttektir á skóglendum Íslands, þannig að fyrir liggja uppfærð gögn um skóglendi og breytingar á þeim frá einum tíma til annars. Segja má að ÍSÚ og undirbúningsrannsóknirnar sem fóru fram til undirbúnings hennar hafi rutt veginn fyrir aðrar skógarúttektir á Íslandi með vísindalega viðurkenndum aðferðum.

1.4.2 Aðrar sambærilegar úttektir (og mín) á Íslandi

Mógilsá, rannsóknarsvið Skógræktarinnar hefur einnig framkvæmt nokkrar skógarúttektir fyrir einkaaðila sem styðjast við svipaða úttektaraðferð og hér um ræðir (sjá síðar), en þar hafa ekki verið framkvæmdar beinar mælingar á kolefnisforða annara hluta vistkerfisins en í lífmassa trjáa, eins og var gert í öðrum hluta þessarar rannsóknar (Owona, 2019). Þá hefur verið aukning á eftirspurn eftir slíkum úttektum og hefur þeim því fjölgað upp á síðkastið (Arnór Snorrason, 2021; Arnór Snorrason og Björn Traustason, 2021; Arnór Snorrason, Björn Traustason og Bjarki Þór Kjartansson, 2017).

Fyrsta rannsókn á kolefnisforða í ræktuðum skógi á Íslandi birtist í BS ritgerð Þorbergs Hjálta Jónssonar (1985). Þar var stafafurulundur í mældur sem hafði bundið að meðaltali 4,3 tonn koldíoxíð á ha og ári í 25 ár. Árið 1996 birtist grein í Skógræktarritinu sem byggði á þessari rannsókn og þar sem farið var yfir möguleika til bindingar CO₂ með ræktun skóga og uppgræðslu lands með því að rýna mælingar á vexti skóga og setja í samhengi við losun frá Íslandi á þeim tíma. Þar voru kynntar spár um framtíðarlosun og lagt mat á stærð lands sem þyrfti að rækta skóg á til þess að binda alla beina losun manna á CO₂ hér á landi árið 2025, en það var metið um 250.000 – 330.000 ha (Þorbergur Hjalti Jónsson og Úlfur Óskarsson, 1996).

Til gamans má geta að skógarþekja ræktaðra skóga var orðin 49.500 ha 2015 (Arnór Snorrason, 2017) og hún batt þá um 10% af beinni losun (3. mynd).

Arnór Snorrason (1997) og Bjarni D. Sigurdsson og Arnór Snorrason (2000) gáfu svo út fyrstu grófu áætlunina um hversu mikil kolefnisbinding með skógrækt væri á landsvísu í lok tíunda áratugarins. Arnór Snorrason o.fl. (2002) komu svo í kjölfarið með grein sem birti mælingar á kolefnisforða í öllu vistkerfinu í mismunandi skógargerðum um allt land, sem bætti mjög getu til að búa til slíkar spár fyrir skógrækt.

Margar fleiri íslenskar rannsóknir á kolefnisbindingu skóga hafa farið fram eins og gert er grein fyrir hér að neðan.

Ungskógar (1990-2020)

i) Rannsókn á tilraunaskógi í Gunnarsholti árið 1996 með iðufylgniaðferð (*E. eddy covariance*) var 6 ára alaskaösp að binda 3,7 tonn CO₂ á ha og ári í öllu vistkerfinu og þar átti stærsti hluti kolefnibindingar sér stað neðanjarðar (Bjarni Diðrik Sigurdsson, 2001).

ii) Rannsókn með iðufylgniaðferð á kolefnisbindingu og kolefnishringrás (NEE, GPP og R_e) í ungum lerkiskógi sem var gróðursettur í jarðunnið mólendi, var árleg kolefnisbinding í öllu vistkerfinu í tólf ára skógi 6,7 tonn CO₂ á ha yfir þriggja ára tímabil, en meðalársbinding var á tólf árum 2,2 tonn CO₂ á ha og ári í öllu vistkerfinu. Niðurstöður bentu til þess að mesta breytingin í kolefnisforða vistkerfisins hafi verið neðanjarðar, en almennt er kolefnisbinding skógar ofanjarðar meginviðfangsefni skógarúttekta (Brynhildur Bjarnadóttir o.fl., 2009; Brynhildur Bjarnadóttir 2009).

iii) Í reita-rannsókn þar sem skoðuð voru áhrif tegundarblöndunar í 15 ára ungsjógi, þá var skógur sem hafði verið gróðursettur í gamla lúpínubreiðu að binda talsvert meir en það sem hafði verið gróðursett í graslendi. Einnig var áhugavert að alaskaösp og ilmbjörk höfðu bundið meira en sitkagreni á þessu aldursbili. Þá var birkið með besta lífun sem vóg þungt í meiri bindingu þess í upphafi vaxtarlotu (Jón Hilmar Kristjánsson, 2020).

iv) Unnin var úttekt á kolefnisbindingu skógræktar í skógum á svæðum í eigu Landsvirkjunar af Arnóri Snorrasyni og Birni Traustasyni árið 2013. Allir skógar í þessari úttekt voru ungir, í þeim skilningi að á Íslandi má búast við vaxandi árlegri kolefnisbindingu fram til 40 ára aldurs (ef skógur er ekki snemmgrisjaður). Hér var hluti gróðursetninga yngri en 10 ára, en að meðaltali 16-22 ára. Árleg meðaltalsbinding á skógræktarsvæðum var 5,9 tonn CO₂ á ha og ári. Þá var nokkur munur á kolefnisbindingu á yngri og eldri svæðum, þar sem þeir yngri voru að

binda að meðaltali 3 tonn CO₂ á ha en þeir eldri 13 tonn CO₂ á ha (Arnór Snorrason og Björn Traustason, 2013; Arnór Snorrason o.fl., 2017).

v) Gerð var úttekt á breytingum kolefnisforða í skóginum á Óseyri í Stöðvarfirði (Arnór Snorrason & Lárus Heiðarsson, 2021). Skógurinn er ungur þar sem fyrst var gróðursett 2006, en hann var skipulagður og ræktaður í samstarfi við Skógræktina. Þar voru mælifletir valdir með reglulegu neti sem lagt var yfir kortlagt skógræktarsvæði. Þetta eru yngri skógar en 15 ára og mælingar því ólíkar að því leiti að þvermál var mælt við rótarháls, í stað hné- eða brjósthæðar. Einnig var notast við nýja reiknivél, Skógarkolefnisreikni (Skógræktin, 2023), og annan hugbúnað (Lárus Heiðarsson og Pukkala. T., 2012) til þess að leggja mat á hver vöxtur muni verða í skóginum með tilliti til ákveðinnar umhirðu á vaxtarlotu. Meðalbinding á ári í svona ungum skógi var enn mjög lítil, eða um 0,08 tonn CO₂ á ha og ár, og kolefnisforði var 240 kg CO₂ á ha.

vi) Í rannsókn á áhrifum grisjunar og áburðargjafar á kolefnishringrás og viðarvöxt ungs asparskógar. Þá var núverandi árs kolefnisbindingar ofanjarðar í ungum asparskógum 28,4 tonn CO₂ á ha og ári. Kolefnisbinding stakra trjáa jókst í grisjuðum skógi miðað við ógrisjaðan skóg, en heildarbinding í skóginum var þó minni í grisjaða skóginum. Þ.e. aukin binding stakra trjáa vann ekki að fullu upp tapið í fjölda trjáa við snemmgrisjun á fyrstu 10 árunum eftir að hún fór fram (Jón Ágúst Jónsson og Bjarni Diðrik Sigurðsson, 2008; Jón Auðunn Bogason o.fl., 2018)

vii) Mógilsá, rannsóknarsvið Skógræktarinnar gerði úttekt á kolefnisbindingu skógræktar á svæðum Kolviðar á Hofssandi við Stóra-Hof á Rangárvöllum (Arnór Snorrason, 2021), þar sem notast var við samskonar aðferðafræði eins og líst er að ofan með reglulegu neti mæliflata. Um er að ræða fyrsta skógræktarsvæði Kolviðs sem gróðursett var aðallega með birki á árunum 2007-2009 auk íbóta og minni viðbóta síðar. Skógarflokkar voru að meðaltali að binda 0,33 tonn CO₂ á ha og ári.

viii) Nýlega birtist svo rannsókn á kolefnis- og vatnshringrás í 24 ára gömlum asparskógi á framræstu votlendi á Suðurlandi. Rannsakað var kolefnisflæði vistkerfisins í tvö ár með iðufylgnimælingum. Niðurstöður sýndu að árlegur kolefnisjöfnuður (NEE) vistkerfisins samsvaraði 26,2 tonnum CO₂ á ha og ári sem voru bundin (Brynhildur Bjarnadóttir o.fl. 2021). Þar af var bindingin í lífmassa skógarins ofanjarðar og í rótum 23,7 tonn CO₂ á ha og ári.

Miðaldra skógar eða aldursseríur

ix) Gerð var úttekt á kolefnisbindingu skóglendis á Drumboddsstöðum II í Biskupstungum (Arnór Snorrason og Björn Traustason, 2021), þar var verið að nota svipaða aðferð og í þessari rannsókn. Þá voru notaðir borkjarnar til þess að meta árlega vaxtarprósentu lífmassa trjáa. Þar að auki er unnin spá fyrir vöxt næsta áratugar með Skógarkolefnisreikni Skógræktarinnar (Skógræktin, 2023). Skógarflokkar voru þrír: i) ræktað skóglendi (meðalaldur 23 ár) ii) náttúrulegt birki eldra en 1988 iii) náttúrulegt birki yngra en 1988. Árið 2020 voru báðir flokkar birkiskóga að binda um 4 tonn CO₂ á ha og ári og skógræktarflokkurinn var að binda 15 tonn CO₂ á ha og ári.

x) Rannsókn var gerð á breytingum kolefnisforða með skógrækt yfir 50 ára tímabil. Hún fór fram á árunum 2002 til 2005 í verkefninu Skógvist (Ásrún Elmarsdóttir o.fl., 2007), þar sem litið var til algengustu barrtrjáa í skógrækt á Íslandi samanborið við beitt land og gamla birkiskóga. Niðurstöður sýndu að kolefnisbinding í trjám var meiri í barrskógum en náttúrulegum birkiskógum. Einnig að uppsafnað magn lífræns kolefnis í jarðvegi var í sumum tilfellum orðið meira í barrskógum á innan við 50 árum en það var í eldri náttúrulegum birkiskógum. Hlutfallslega var að eiga sér stað meiri kolefnisbinding neðanjarðar fyrstu árin eftir gróðursetningar en síðar varð vöxtur ofanjarðar megin kolefnisbinding í vistkerfinu (Bjarni Diðrik Sigurðsson, 2014).

xi) Nýjasta rannsóknin, sem var framhald á rannsókn rannsókninni Skógvist, er meistaraaritgerð Julia C. Bos (2021). Þar rannsakaði hún breytingar á kolefnisforða í öllu vistkerfinu í sömu aldursseríum (*E. chronsequences*) af lerki- og birkiskógum á Fljótsdalshéraði, en endurmælingar fóru fram árið 2015. Þar var núverandi árs kolefnisbinding í öllu vistkerfinu 4,9 og 1,2 tonn CO₂ á ha og ári fyrir lerki og birkiskóga, en af því var að bindast 3,9 og 1,1 tonn CO₂ á ha og ári í lífmassa trjáanna ofanjarðar fyrir lerki og birkiskóga.

Aðrar rannsóknir á kolefnisbindingu

xii) Verkefni sem gert var til að þróa vottunarkerfi fyrir kolefnisbindingu í íslenskri skógrækt, gerð var prófrannsókn þar sem skoðaðar voru breytingar á kolefnisforða í nytjaskógum á þremur skógræktarjörðum. Núverandi ársbinding í skógarflokkum var á bilinu 1-6 tonn CO₂ á ha og ári, en ekki kom fram aldur skóganna í þessari rannsókn (Sigríður Júlía Brynleifsdóttir, 2011).

xiii) Gerð var rannsókn á kolefnisforða og bindingu trjágróðurs í Reykjavík, þar er kolefnisforði reyndist almennt minni á flatareiningu sökum minni krónuþekju í görðum en í samfelldum skógi (Gústaf Jarl Viðarsson og Arnór Snorrason, 2012).

xiv) Rannsóknir á kolefnisbúskap jarðvegs í uppvaxandi og gömlum birkiskógum hér á landi sýna að miklir möguleikar eru á kolefnisbindingu jarvegs á rofnum svæðum með skógrækt. Hunziker o.fl. birtu grein 2019 sem sýndi að jarðvegur í efstu 30 cm jarðvegs á illa förnun landi gæti bundið 20 tonn C á ha áður en það næði sambærilegum kolefnisforða jarðvegs í náttúrulegum birkiskógi. Þegar borin var saman kolefnisforði í 50 ára birkiskógi og gömlum náttúrulegum birkiskógi á uppblásnu landi á Rangárvöllum þá var kolefnisforði jarðvegs í 50 ára skóginum enn talsvert minni en í gamla náttúrulega skóginum sem aldrei hafði blásið upp. Það bendir eindregið til þess að lífrænt kolefni í jarðvegi geti haldið áfram að aukast í skógum að 50 árum liðnum. En samkvæmt rannsóknum þeirra þá eykst einnig með aldri sá hluti kolefnisforða jarðvegsins sem er leysanlegur og auðveldlega niðurbrotanlegur af örverum, þannig að líklega dregur úr hraða bindingarinnar eftir því sem frá líður.

Einnig eru nokkrar vísindagreinar sem hafa borið saman kolefnisbindingu íslenskra skóga við aðstæður erlendis:

Rannsókn sem hafði það að markmiði að bera saman kolefnihringrás í skógarvistkerfum á Austurlandi og í Vestur Svíþjóð. Notast við við líkanagerð (ForSafe model) við samanburðinn. Borin var saman saga landnýtingar og tegundarnotkun á svæðunum, en einnig varpað ljósi á kolefnisbindingu ofanjarðar og neðanjarðar. Niðurstöður sýndu að tegundarnotkun, umhirða skóga og lengd ræktunarlotu skipta miklu máli fyrir uppsöfnun kolefnis í jarðvegi. Þrátt fyrir meiri vöxt skógar í Svíþjóð þá hafði kolefnisforði í jarðvegi minnkað samanborið við Ísland þar sem eldfjallajarðvegur var enn að binda kolefni. Því er það ekki endilega sú trjátegund sem vex hraðast við ákveðnar aðstæður sem er best til þess fallinn að byggja upp kolefnisforða vistkerfisins til lengri tíma litið (Bjarni Diðrik Sigurðsson o.fl., 2008).

Bárcena o.fl. (2014) birtu tölfræðilega samantekt á niðurstöðum rannsókna (*E. meta-analysis*) sem lúta að breytingum á kolefnisforða í jarðvegi í kjölfar skógræktar í Norður Evrópu. Þar var tekið tillit til aldurs skógar, fyrri landnýtingar, skógargerð og jarðvegsgerðar. Niðurstöður sýndu að aukning kolefnis í jarðvegi var að jafnaði orðin áþreifanleg í 30 ára gömlum skógi.

Við samantekt á niðurstöðum rannsókna á kolefnisbindingu jarðvegs í mismunandi skógargerðum í tempraða beltinu (Vestardal o.fl., 2013), kom í ljós að rannsóknir af þessu tagi væru fáar og dreifðar, en jafnframt að við eigum slíkar niðurstöður frá Íslandi. Heildarniðurstöðurnar sýndu að áhrif trjátegunda á kolefnisforða jarðvegs væru misjafnar, en

Þeir ferlar sem hafa áhrif á umsetningu kolefnis í stöðugt form í jarðvegi voru ekki skýrir. Hlutfallslegur munur er á kolefnisforða í skógarbotni (feyrulagi) og efsta hluta jarðvegs eftir trjátegundum sem veldur að aukning getur orðið á kolefnisforða um 200-500% í skógarbotni og um 40-50% í efsta hluta jarðvegs, þó að heildarmagnið í báðum forðabúrum breytist lítið. Aukningin kemur því ekki endilega til sem viðbót, heldur er dreifing kolefnis á milli skógarbotns og jarðvegs ólík á milli trjátegunda í tempruðu loftslagi. Það gæti þó þýtt að ákveðnar trjátegundir geta haft meiri getu en aðrar til þess að binda kolefni í jarðvegi, fremur en í feyrulagi/skógarbotni, þar sem það ætti að vera betur varið til framtíðar. Þessar niðurstöður Vesterdal o.fl. (2013) voru þó ekki nægilega afgerandi til að hægt sé að benda á einstakar trjátegundir. Trjátegundir höfðu almennt skýrari áhrif á kolefnisforða í skógarbotni, en loftslag og jarðvegsgerð á rannsóknasvæðum höfðu meiri áhrif en trjátegundir á kolefnisforða jarðvegs. Vísbendingar eru samt fyrir því að skógar þar sem fleiri trjátegundir vaxa saman (blandskógar) gætu bundið meira kolefni í jarðvegi, en það vantar enn fleiri rannsóknir til að svara því með óyggjandi hætti (Vestardal o.fl., 2013).

1.4.3 Fyrri úttekt á kolefnisforða í Heiðmörk

Pic (2009) gerði meistarprófsritgerð við Universite Joseph Fourier háskólann í Frakklandi um úttekt á kolefnisforða í trjám í Heiðmörk byggða á mælingum á úrtaki árið 2007. Í rannsókn minni í Heiðmörk er notast við sömu mælifleti. Þessi verkefni byggja einnig á svipaðri aðferðafræði við skógarúttektir, sem er flokkað slembival (sjá síðar).

Pic (2009) mat kolefnisforða lífmassa 2007 og árlega bindingu í trjágróðri Heiðmerkur. Þá var CO₂ bundið í lífmassa 20.969 tonn og árleg binding CO₂ var 4371 tonn í skóginum öllum í Heiðmörk (reiknað út úr Töflu 1.).

Tafla 1. Helstu niðurstöður úr M.S. verkefni Pic (2009). Þar var kolefnisbinding skóga í Heiðmörk metin árið 2007. Í töflunni er uppsafnaður lífmassi koldíoxíðs í skógi, árleg binding koldíoxíðs skóga og standandi heildarlífmassi í skógi. Einingar í töflunni eru í tonnum á hektara.

Skógarflokkur	Flatarmál (ha)	CO ₂ lífmassi (t/ha)	CO ₂ binding (t/ha á ári)
náttúrulegt birki	582	0,4	0,1
gróðursett birki	184	1,8	0,6
barr <3m hæð	267	14,7	5,8
barr >3m hæð	228	72,2	11,7
Samtals	1261	16,6	3,5

1.5 Áhrif trjátegunda á kolefnisbindingu í lífmassa

Hraði og magn kolefnisbindingar með skógrækt er háð nokkrum þáttum og áhrif trjátegunda á kolefnisbindingu í lífmassa eru mikil (Arnór Snorrason o.fl., 2002; Bjarni D. Sigurðsson o.fl., 2008).

Aldur trjágróðurs hefur talsverð áhrif á hraða kolefnisbindingar ólíkra tegunda, þar sem sumar tegundir eins og t.d. víðir og aspir taka fljótt við sér og binda meira sem ung tré samanborið við aðrar tegundir sem eru hægvoxta í fyrstu en vöxtur eykst síðan með tímanum (Rytter o.fl. 2020).

Erlendar rannsóknir hafa sýnt að hraðvaxta tegundir eins og asparblendingar geta skilað rúmlega helmingi meiri kolefnisbindingu heldur en hægvoxta tegundir eins og rauðgreni. Hinsvegar dregur úr hraða kolefnisbindingar eftir 25 ár, en hjá rauðgreni þá heldur kolefnisbinding áfram að aukast að 60 ára aldri (Peichl o.fl. 2006)

Lífmassi í ungskógi (undir 10-20 ára) ræðst bæði af lifun (þéttleika) og vaxtarhraða, en það stýrir því hvernig lífmassi þróast á milli tegunda í nýskógrækt (Jón Hilmar Kristjánsson. 2020). Til lengri tíma (meir en 30-50 ára) ræðst lífmassi í skógi af þéttleika (grunnfleti) sem trjátegundin getur viðhaldið og hæðarvexti hennar. Það getur verið mikill munur milli trjátegunda hvað þetta tvennt varðar (Pretzsch. H. og Schütze. G., 2016).

1.6 Aðrir þættir sem hafa áhrif á kolefnisbindingu í lífmassa skóga

Lengd ræktunarlotu endurspeglar magn kolefnis sem getur bundist í lífmassa skógar, en þar að auki hafa umhirða o.fl. þættir áhrif (Nilsson, 2011). Ræktunaraðferðir í skógrækt hafa gjarnan haft það að markmiði að auka rúmmál og gæði viðar í takt við aðstæður á markaði hverju sinni, þ.e. að fá sem best verð fyrir uppskeru. Aðferðir sem hafa verið notaðar miðast að því að

samræma kostnað við umhirðu skóga við verðmæti afurða, með því að taka tillit til kostnaðar og tímaramma ræktunar með lengd ræktunarlotu (reikna svokallað hreint núvirði) (Kärenlampi, 2019).

Ákveðnar aðferðir við ræktun skóga geta aukið magn kolefnis sem getur bundist í trjám og jarðvegi í skógi. Sýnt hefur verið fram á að verndun gamalla skóga (old growth) hefur almennt í för með sér aukinn forða kolefnis í jarðvegi samanborið við nytjaskóga í mikilli umhirðu (Harmon, 1990). Ræktun nytjaskóga eykur hinsvegar getu til kolefnisbindingar í lífmassa yfir styttri tímabil með notkun hraðvaxta trjáteguna, jarðvinnslu og mögulega N áburðargjöf. Mismunandi skógræktarmódel (sem getur endurspeglast t.d. í hvort gjörfelling á sér stað eða að valhögg á sér stað yfir lengri tíma) hafa áhrif á forða og bindingu kolefnis í vistkerfi skóga innan ræktunarlotu, en óvíst er hvort það sé afgerandi munur á kolefnisbindingu í kjölfar ólíkra skógræktarmódel til lengri tíma litið (meir en 100 ár). Áhrif vaxtarhraða mismunandi trjáteguna og nýting viðarafurða hefur að öllum líkindum meiri áhrif á kolefnisbindingu og loftslagsávinning skógræktar heldur en valið á ræktunarmódeli (Lundmark. T. o.fl., 2016).

1.7 Aðferðafræði við mat á kolefnisbindingu

IPCC hefur gefið út leiðbeiningar á góðum venjum (GPG-LULUCF) við úttektir á kolefnisbindingu og kolefnislosun sem tengjast LULUCF (IPCC, 2006). Í leiðbeiningum eru listaðar mismunandi aðferðir til mats, mælinga og vöktunar á kolefnisforða, er ætlað að aðstoða þjóðir við gerð úttekta sem hvorki ofmeti né vanmeti breytingar á kolefnisforða stærri svæða.

Í GPG-LULUCF eru þrjár tegundir af aðferðum fyrir kolefnisbókhald skóga: i) forðabókhald, ii) losunarbókhald og iii) bókhald til að draga úr losun verkefna (IGBP Terrestrial Carbon Working Group, 1998). Í þessari rannsókn var notast við aðferðafræði forðabókhalds. Það er notað til að meta breytingar á C forða í skógum eins og lýst hefur verið af IPCC (2003; 2006; 2014).

IPCC hefur flokkað aðferðafræði við mat á kolefnisforða í 3 stig (Tier). Úttektir á 1. stigi hafa minnstu nákvæmni þar sem notast er við fyrirframákveðna losunar- eða bindistuðla frá IPCC sem gilda fyrir ákveðin svæði í heiminum, eins og t.d. N-Evrópu, sem margfaldaðir eru við stærð viðkomandi svæðis. Úttektir á 2. stigi nota almennt sömu aðferðafræði og þær sem eru á fyrsta stigi, en nýta til þess bindi- eða losunarstuðla sem fundnir hafa verið fyrir ákveðin landssvæði, lönd eða fyrir ákveðna tegund skógar og birtir í ritrýndum vísindaritum. Í þessari rannsókn er miðað við 3. stigs aðferðafræði, sem er sú nákvæmasta, þar sem notast var við

beinar mælingar á mismunandi forðum í öllu vistkerfinu, en með færri mæliflötum fyrir hverja skógargerð heldur en gengur og gerist fyrir úttektir sem mæla standandi viðarrúmmál í skógum.

Hugsunin var að athuga hversu fáa mælifleti getur verið verjandi að nota til þess meta kolefnisforða og kolefnisbindingu í afmörkuðum skógarsvæðum. En það er tímafrekt að mæla skóga og það munar í kostnaði um hvern mæliflöt.

1.8 Markmið rannsóknar

Meginmarkmiðið var að meta með nákvæmum hætti kolefnisbindingu í trjálagi einstakra skógarjarða, með því að nýta aðferðafræði sem mætir ströngustu kröfum (Tier 3) IPCC um slíkar úttektir og að nota til þess lágmarksfjölda mæliflata. Slík aðferðafræði er nauðsynleg til þess að skógareigandi geti talið fram vottaðar skógarkolefniseiningar (Pétur Halldórsson, 2019). Joel Owona (2019) tók í sínu meistaraverkefni fyrir hver kolefnisforði í runnalagi, botngróðri, feyrulagi, fínrotum og jarðvegi er, en þetta verkefni bætir við ítarlegri upplýsingum um trjálagið og metur einnig standandi kolefnisforða í lífmassa trjáa á stærri samfelldum svæðum (skógarjörðum).

1.8.1 Kortlagning og flokkun skóglendis

Það er eðlilegur hluti úttektar á kolefnisbindingu einstakra skógarjarða að endurskoða og bæta fyrirleggjandi kortlagningu skógræktarsvæða. Hver eru áhrif slíkra leiðréttinga á mat á kolefnisforða og kolefnisbindingu skógarjarða?

Tilgáta:

Að þekja skóglendis minnki við nákvæmari kortlagningu vegna þess að hluti gróðursettra svæða sem skráð hafa verið til nýskógræktar ná ekki þroska sem skóglendi vegna affalla fyrstu árin.

1.8.2 Aldur trjáa. Áhringjamæling samanboreið við framkvæmdarskráningu

Á Ölfusvatni og Nesjavöllum voru til gögn á aldri gróðursetninga úr framkvæmdarskráningu og aldur í ákveðnum reitum var einnig metinn með áhringjagreiningu í þessu verkefni.

Tilgáta: Að áhringjaaldur trjáa endurspeglar aldur úr framkvæmdaskráningu gróðursetningar.

1.8.3 Samanburður á vaxtarhraða skóga milli Ölfusvatns, Nesjavalla og Heiðmerkur

Skógarnir eru ekki langt frá hverjum öðrum og eru svipaðri hæð yfir sjó. Samanburður á veðurfari sýnir lítinn mun á milli svæða (Tafla 2).

Tilgáta: Að vöxtur og viðarforði sé ekki marktækt ólíkur milli jarðanna þegar tillit er tekið til skógargerðar og aldurs.

1.8.4 Samanburður á vaxtarhraða og kolefnisbindingu mismunandi skógagerða í

lífmassa

Eftirfarandi tilgátur voru settar fram:

Að vöxtur, viðarforði og kolefnisbinding í lífmassa í barrskógi sé meiri en í birkiskógi á sama aldri.

Að vöxtur og kolefnisbinding í lífmassa í gróðursettum birkiskógi sé sambærilegur náttúrulegum birkiskógi á sama aldri.

Að núverandi ársvöxtur sé (enn) hærri en meðalvöxtur í öllum skógargerðum þar sem hann var metinn.

1.8.5 Besta mat og skekkjumörk á standandi viðarforða í lífmassa og

kolefnisbindingu í lífmassa skóga heillar skógarjarðar

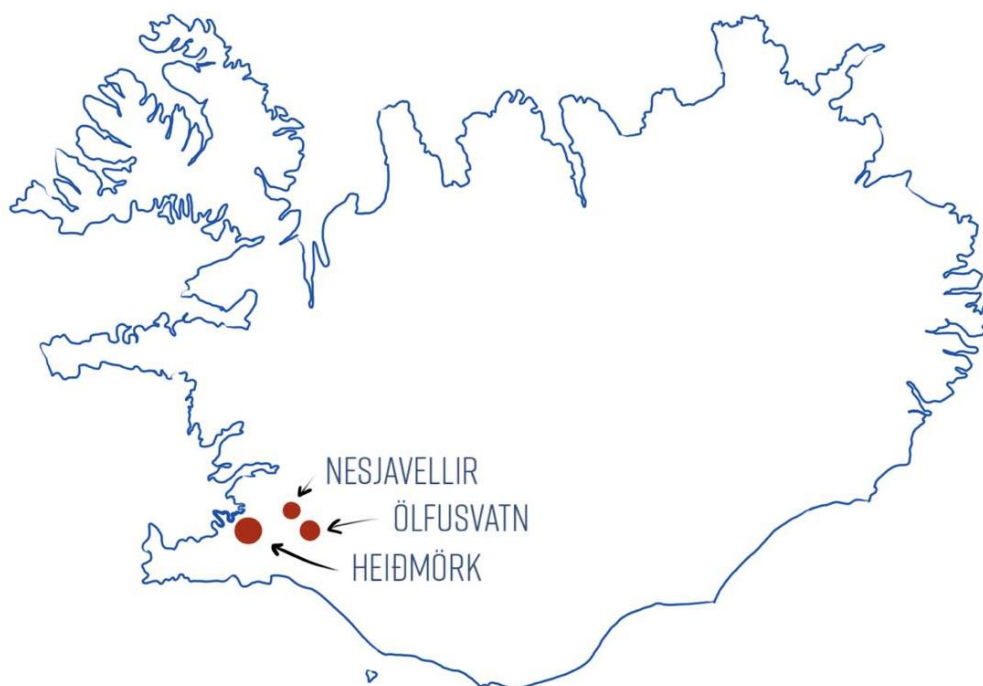
Að standandi viðarforði Heiðmerkur hafi aukist um meir en 50% frá fyrra mati Pic (2009) frá árinu 2007.

Að fá mat á viðarforða, kolefnisforða og kolefnisbindingu í lífmassa trjáa með viðunandi skekkjumörkum fyrir hvern skógarflokk og skóg í heild sinni.

2. Efni og aðferðir (vinnuferill, gögn og aðferðir)

2.1 Lýsing á rannsóknarstöðum

Rannsóknin var gerð á þremur skógræktarsvæðum á suðvesturhorni landsins: Heiðmörk, Nesjavellum og Ölfusvatni í Grafningi (4. mynd). Rannsóknasvæðin eru 316 ha (Ölfusvatn), 2065 ha (Nesjavellir) og 3200 ha (Heiðmörk). Útlínur skóganna og flokkun í megin skógargerðir á hverjum stað má sjá á 5. – 7. mynd.



4. mynd. Staðsetning mæliflata: Heiðmörk (H), Nesjavöllum (N) og Ölfusvatni (Ö). (Útlínukort frá Landmælingum Íslands).

2.1.1 Jarðfræði og jarðvegur á rannsóknarstöðum

Jarðlög á Suðvesturlandi einkennast af ungum basalt berggrunni sem myndaðist í lok seinustu ísaldar (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998) og er á flekaskilum milli Evrasíu- og Ameríkufleka (Kristján Sæmundsson, 1992; Ward, 1971). Ef jarðgrunnur á SV-horni landsins er borin saman við aðra landshluta þá telst hann gegndræpur þar sem holrými í bergi eru stærri en 30 μm (Hjalti Franzson, 2000). Það hefur áhrif magn af vatni á yfirborði og geta jarðlaga til að flytja grunnvatn, en svæðið einkennist af tiltölulega fáum ám og lækjum og þeir sem þó finnast spretta fram sem lindarvatn (grunnvatn sem berst upp til yfirborðs). Á tveimur

af þremur rannsóknarsvæðum eru einmitt verðmæt vatnsból; á Nesjavöllum og í Heiðmörk. Einn skógana, Nesjavellir, er inni á jarðhitasvæði og nálægt jarðgufuvirkjun og jarðvegur á slíkum jarðhitasvæðum einkennist gjarnan af ófrjósemi og háu sýrustigi (Burns, 1997), en við rannsóknir á jarðvegsþáttum innan allra skóganna kom í ljós að mældir jarðvegsþættir voru almennt sambærilegir milli svæðanna (Owona, 2019). Nánari lýsingu á jarðvegi svæðanna má finna í Owona (2019).

2.1.2 Veðurfar á rannsóknarstöðum

Veðurfarsskilyrði eru hafræn á öllum rannsóknarsvæðum (Tafla 2). Meðalhitastig á næstu veðurathugunarstöðum, Þingvöllum og Hólmsheiði, var frá $-0,3^{\circ}\text{C}$ í kaldasta mánuði ársins til $11,6^{\circ}\text{C}$ í hlýjasta mánuði þess og árleg úrkoma mældist á bilinu 800-1130 mm á árunum 2008-2017 (Tafla 2). Meðalhitastig var $0,3^{\circ}\text{C}$ hærra í Heiðmörk (mælt á Hólmsheiði) heldur en á Nesjavöllum og Ölfusvatni sem eru lengra inni í landi (mælt á Þingvöllum), en meðalúrkoma var 16% meiri á Þingvöllum en á Hólmsheiði (Tafla 2). Það telst þó ekki mikill munur miðað við breytileika í veðurfari á Íslandi. Á Akureyri, sem er í regnskugga af jöklum á hálendi landsins, er t.d. mun minni úrkoma eða um 370 mm.

Tafla 2. Meðalhiti og úrkoma á árunum 2008- 2017 í nágrenni rannsóknarsvæðanna og víðar. Gögnin frá Hólmsheiði eru um 2 km frá Heiðmörk og Þingvellir eru um 15-16 km frá Nesjavöllum og Ölfusvatni. Akureyri og Mývatnu er dæmi um veðurstöðvar í öðrum landshlutum. Óbirt gögn, Veðurstofa Íslands.

Mælibreyta	Hólmsheiði	Þingvellir	Akureyri	Mývatn
Meðalárshitastig ($^{\circ}\text{C}$)	4,7	4,4	4,4	2,2
Meðalársúrkoma (mm)	815,1	1128,9	378,6	469,8
Meðal lofthiti. ($^{\circ}\text{C}$)				
Janúar	0,5	-0,3	0,1	-2,8
Júní	9,8	10,3	9,3	8,7
Júlí	11,6	12,0	11,0	10,4
Ágúst	10,7	10,7	10,6	9,3

Hæð yfir sjávarmáli og fjarlægð frá hafi eru þeir þættir sem hafa mest að segja um veðurfar á Íslandi (Halldór Björnsson o.fl., 2007). Þó að ekki sé mikill munur á hitastigi á milli svæða, þá eru svæðin í Grafningi, þ.e. Nesjavellir og Ölfusvatn, aðeins minna hafræn svæði borið saman við Heiðmörk. Sem dæmi þá verður -10°C gráðu frost 35 daga á ári á Þingvöllum (Tafla 2), á meðan í Reykjavík þá gerist það aðeins sjö daga á ári að jafnaði (Tafla 2). Það er því ákveðinn

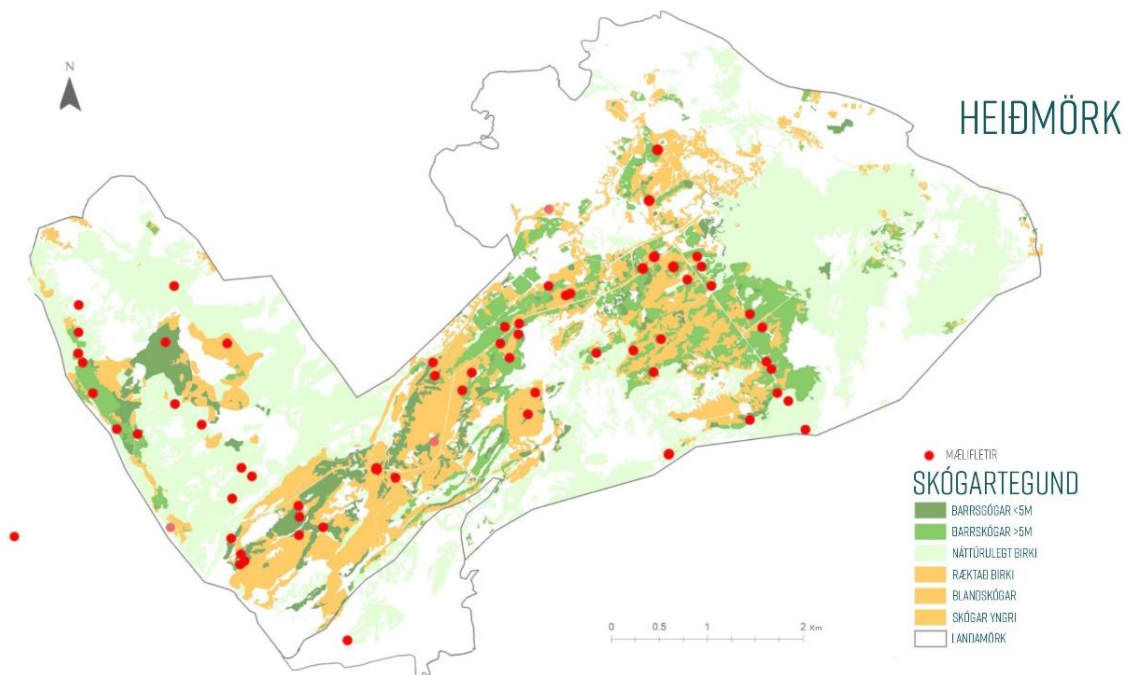
munur á aðstæðum milli svæðanna þó að þau séu öll staðsett á tiltölulega afmörkuðu landsvæði á SV-landi.

2.1.3 Gróðurfar og landgerðir á rannsóknarstöðum

2.1.3.1 Heiðmörk

Heiðmörk er útivistarskógur sem stofnað var til árið 1950 af Skógræktarfélagi Reykjavíkur (Skógræktarfélag Reykjavíkur, 2020), hann er staðsettur í útjaðri Reykjavíkur og Garðabæjar (5. mynd). Landeigendur eru Orkuveita Reykjavíkur, Reykjavíkurborg og Garðabær, en Skógræktarfélag Reykjavíkur hefur umsjón með svæðinu og er félagið eigandi og umráðaaðili trjáplantna í skóginum (Hrd. 14. október 2010 í máli nr. 684/2009).

Gróðursetningar hafa staðið yfir í Heiðmörk frá stofnun svæðisins og eru skógar þar því misgamlir og mishávaxnir. Náttúrulegur birkiskógur sem hefur breiðst mikið út á seinni árum er að mestu leiti undir 2 metra hæð, en hæstu grenitré eru um eða yfir 20 metra há. Helstu trjátegundinar í Heiðmörk eru ilmbjörk (*Betula pubescens*), stafafura (*Pinus contorta*), sitkagreni (*Picea sitchensis*), rauðgreni (*Picea abies*), blágreni (*Picea engelmannii*) og alaskaösp (*Populus trichocarpa*), en þar finnast einnig margar fleiri tegundir trjáa og runna í minna mæli.



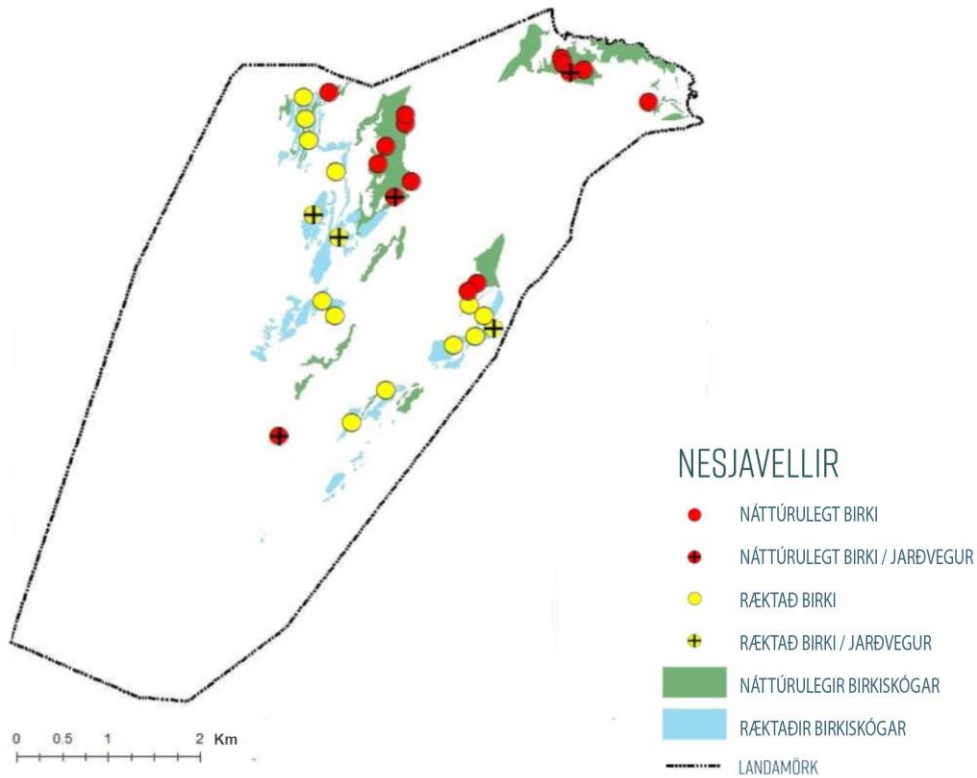
5. mynd. Kort af Heiðmörk. Skógargerðir eru merktar með mismunandi litum og mælifletir í þessu verkefni er sýndir með rauðum hring.

Heildarsvæði Heiðmerkur er í dag um 3200 ha og stór hluti þess er þakinn náttúrulegum birkiskógi (5. mynd). Við stofnun Heiðmerkur voru einhverjar leifar af náttúrulegu kjarrkenndu birki og gulvíði (*Salix phylicifolia*) á svæðinu (Skógræktarfélag Reykjavíkur, 2020), sem hafa síðan dreift mikið úr sér eftir 1950.

Áætlað er að um sex til sjö milljón plöntur hafi verið gróðursettar í Heiðmörk síðan um miðja síðustu öld (Skógræktarfélag Reykjavíkur, 2020). Árið 2005 vann Náttúrufræðistofnun gróður- og landgreiningu á Heiðmörk, þar sem ræktaður skógur var metinn 21% af flatarmáli Heiðmerkur, eða 670 ha (Kristbjörn Egilsson og Guðmundur Guðjónsson, 2006). Samkvæmt skýrslunni þá var gróið land alls 89% af 3.200 ha Heiðmerkur árið 2005 og lítt eða ógróið land var 11% (mest vatn, 8%, og svo melar, 3%). Gróna landið utan ræktaðs skógar var náttúrulegur birkiskógur og kjarr 20%, mosagróður 17%, lyngmói 13%, graslendi 8% og alaskalúpína 7%.

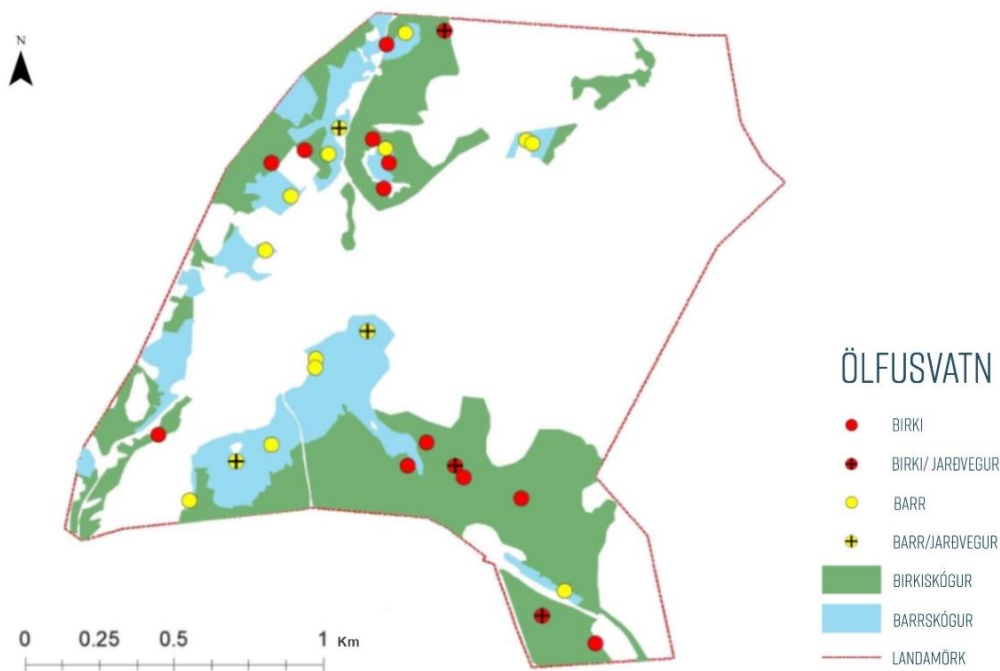
2.1.3.2 Nesjavellir og Ölfusvatn

Á Nesjavöllum og Ölfusvatni eru Landgræðsluskógar sem gróðursettir voru af Skógræktarfélagi Reykjavíkur á land í eigu Orkuveitu Reykjavíkur (6. og 7. mynd). Skógarnir þarna eru tiltölulega ungir í samanburði við Heiðmörk þar sem skógræktaraðgerðir á báðum jörðunum hófust ekki fyrr en 1989-1990. Þar hefur ekki áður verið gerð sambærileg skógarúttekt. Þó hafa verið gerðar aðrar úttektir á árangri uppgræðslu og gróðursetninga í Grafningi (Gísli Gíslason og Yngvi Þór Loftsson, 1997) og mat kolefnisbindingu með skógrækt og landgræðslu 2007 á svæðunum (Ingvi Þorsteinsson, 2007). Þar var svæðinu lýst þannig að það væri lægst í um 100 m h.y.s. á Ölfusvatni við Þingvallavatn og hæst í um 800 metra h.y.s. innan Nesjavalla. Skógræktarsvæðið á Ölfusvatni er allt neðan 200 metra h.y.s. og á Nesjavöllum er allt skógræktarsvæðið neðan 300 m h.y.s., en þó er hluti náttúrulegra birkiskóga þar yfir þeirri hæð. Hæð í náttúrulegum birkiskógi á Nesjavöllum var aðallega undir 2 metra hæð, ræktaðir birkiskógar þar voru 1-4 metrar á hæð og barrskógar voru 2-6 metrar á hæð.



6. mynd. Kort af kortlögðum skógarflokkum og mæliflötum á Nesjavöllum. Skógargerðir eru merktar með mismunandi litum og staðsetning mæliflata með rauðum eða gulum hring. Hringur með kross merkir að jarðvegsmælingar og sýnataka fór einnig fram (Owona 2019).

Stærð Nesjavallajarðarinnar allrar er 2065 ha, þar vaxa innan girðingar 92 ha af ræktuðum birkiskógi og 126 ha af náttúrulegum birkiskógi (6. mynd). Á Ölfusvatni er beitarfriðað svæði 316 ha að stærð (7. mynd). Þar af þekur gróðursett svæði 109 ha. Á Ölfusvatni voru ekki til staðar náttúrulegur birkiskógur fyrir tíma beitarfriðunar og gróðursetningu skógarplantna.



7. mynd. Kort af kortlögðum skógarflokkum og mæliflötum á Ölfusvatni. Skógargerðir eru merktar með mismunandi litum og mælifletir með rauðum eða gulum hring. Hringur með kross merkir að jarðvegsmælingar og sýnataka fór einnig fram (Owona 2019).

2.2 Rannsókn og öflun gagna

Öflun gagna var unnin af tveimur meistaranemum og aðstoðarmanni. Joel C. Owona var hinn meistaraneminn, en hans hluti rannsóknarinnar laut að kolefnisbindingu í botngróðri, feyru og jarðvegi á sömu stöðum og breytingum á öðrum efnafræðilegum og eðlisfræðilegum jarðvegspáttum. Niðurstöðurnar úr hans hluta er að finna í Owona (2019).

2.2.1 Afmörkun skóga

Vorið 2017 hófst vinna við afmörkun og endurkortlagningu skógarreita. Þá var aflað gagna um skógarreiti í ArcGIS 10.5 hugbúnað frá ESRI.

Áður hafði verið gerð úttekt á Nesjavöllum og Ölfusvatni, þar var kortlagning sem byggðist á framkvæmdarskráningu (Ingvi Þorsteinsson, 2007), sú kortlagning var endurskoðuð með nýjum loftmyndum og vettvangferðum, skógarnir voru flokkaðir í tvo flokka hvor um sig (sjá síðar).

Til þess að endurskoða kortlagningu náttúrulegra birkiskóga þá var notast við gögn um útbreiðslu á náttúrulegu birkilendi í gögnum frá Mógilsá, rannsóknarsviði Skógræktarinnar.

Á Nesjavöllum og Ölfusvatni voru til uppdráttir úr fyrri skógarúttekt (Ingvi Þorsteinsson, 2002). Þar hafði verið tekin saman ítarleg framkvæmdarskráning á skógræktarframkvæmdum á Nesjavöllum og Ölfusvatni. Það voru þekjuskjár úr gagnagrunni í landupplýsingakerfis OR. Einnig var aldur trjáa mældur með borkjarnasýnum úr GM trjám (sjá síðar).

Allir uppdráttir voru endurskoðaðir í ArcGIS með nýjustu loftmyndum (frá Loftmyndum ehf, 50 cm upplausn) og vettvangsferðum með gps tæki (GPS map 62s, Garmin) til þess að athuga afmörkun skóga. Notast var við stafræn kortagögn frá Mógilsá, rannsóknarsviði Skógræktarinnar um útbreiðslu náttúrulegra birkilenda (2014) til þess að afmarka náttúrulega skóga á Nesjavöllum og í Heiðmörk. Þau gögn voru einnig borin saman við nýjustu loftmyndir og heimsótt að hluta til og afmarkanir endurskoðaðar. Við kortlagningu skógarflokka var notast við upplausnina 1:2000.

Þessari vinnu var lokið 2019 með endurskoðuðu og uppfærðu ArcGIS korti af útbreiðslu bæði náttúrulegra birkiskóga og ræktaðra skóga árið 2017 á öllum þremur jörðunum. Það kort var svo borið saman við upphafleg kortagögn sem lágu fyrir við upphaf verkefnisins.

2.2.2 Flokkun skógarreita og staðarval úrtaks

Kortlagðir skógarreitir voru flokkaðir í sem keimlíkasta flokka eða skógargerðir (*E: strata*) þannig að breytileiki innan flokka væri sem minnstur. Einnig var reynt að halda fjölda flokka í lágmarki. Þetta er aðferðafræði sem gjarnan er beitt í landfræðilegum úttektum á náttúrulegum fyrirbærum þar sem stór hluti breytileika í því sem meta á er skýranlegur af tiltölulega einföldum breytum, svo sem trjátegund. Úrtaksaðferðin byggir á mælingum á úrtaki úr skóginum og kallast flokkað slembival (*e: stratified random sampling*). Þessi aðferð hefur lengi verið notuð við skógmælingar (Van Laar o.fl., 2007) og þykir henta vel ef mismunandi skógareiningar hafa verið vel skilgreindar og landfræðilega afmarkaðar á einstökum skógarsvæðum (Arnór Snorrason, 2021).

Eiginleikar sem skóglendi var flokkað eftir voru í þessari röð: i) náttúrulegt skóglendi, ii) ræktaðir skógar. Þeir síðar töldu voru svo brotnir upp í eftirfarandi flokka: iii) lauftré ríkjandi, iv) barrtré ríkjandi, v) blandskóg. Barrskógar voru svo flokkaðir áfram í tvo hæðarflokka: vi) undir 5 m yfirhæð eða vii) yfir 5 m. Ástæðan fyrir hæðarflokkuninni er að það er þekkt að standandi viðarforði skóga vex almennt ólínulega með aldri/hæð og því er hægt að draga umtalsvert úr breytileika í mati á viðarforða skóglenda sem byggir á takmörkuðum fjölda mæliflata ef það er byggt upp af nokkrum aldurs/hæðarflokkum (Van Laar, o.fl., 2007).

Við mat á lífmassa trjáa, kolefnisforða og kolefnisbindingu í hverjum flokki var notuð matsaðferð sem byggð er á Íslenskri skógarúttekt (Arnór Snorrason & Bjarki Þór Kjartansson, 2004). Úrtakið í hverjum flokki samanstóð af hringlaga 50 – 200 m² mæliflötum sem staðsettir voru með slembivali með aðstoð ArcGIS. Áður en fletir voru slembivaldir var settur

Tafla 3. Sýnir skráðar breytur í rannsókn.

Skráðar breytur
Trjátegund
FNAWS
Landgerð
Gróðurflokkur
Gróðurþekja
Yfirborð
Jarðvegsgerð
undirlag
Heilbrigði trjáa
Aðgengi
Landslagsgerð
Landslagsform
Hallaátt
Halli lands
Grýtni
Jarðvegisdýpt
Landgerð fyrir skógrækt
Rof
Dauð tré
Gæði trjábols
Margstofna/fjöldi stofna

5,64 m jaðar (e: buffer) innan á útlínur skógarflokka, það var gert til þess að koma í veg fyrir að mælifletir lendi að hluta utan skóga. Notast var við kortlagt flatarmál við alla útreikninga.

Mælingar voru gerðar og skráðar inn í mælitæki sem ætlað er til skóg- og gróðurmælinga (FieldMap, IFER, Tékkland; sjá: <https://www.feildmap.cz/>). Sérstakur hugbúnaður fylgir með mælitækinu sem hannaður er til gagnaöflunar af þessu tagi.

Stærð hringlaga mæliflata sem lagðir voru út var misjan eftir aðstæðum (þéttleika skógar) og var notast við 50 m², 100 m², 150 m² og 200 m² stærðir. Í ræktuðum skógum á Ölfusvatni og Nesjavöllum var stærð mæliflata ákveðin með hliðsjón af þéttleika trjáa á hverjum stað, þá var leitast við að innan mæliflata væru a.m.k. 20 tré og flestir mælifletir voru í 200 m² stærð. Í náttúrulegum birkiskógum á Nesjavöllum var notast við 50 m² mælifleti í samræmi við aðferðir íslenskrar skógarúttektar. Í Heiðmörk voru allir mælifletir 100 m², óháð skógargerð, sbr. Pic (2009).

Fjöldi flata í hverjum flokki skóga í Grafningi var ákveðin fyrirfram, en í Heiðmörk var notast við 100 m² mælifleti úr fyrri skógarúttekt frá 2007, þar sem mælifletir höfðu einnig verið slembivaldir með

ArcGIS, en fjöldi mæliflata í hverri skógargerð þar var misjafn (Pic, 2009). Í þeim flokkum þar sem fleiri fletir höfðu verið mældir árið 2007, en efni stóðu til í þessari úttekt, þá voru endurmældir mælifletir valdir handahófskennt (<https://www.random.org/>). Leitast var við að í hverri skógargerð í Heiðmörk væru a.m.k. 15 mælifletir alls, en í blandskógum voru þó aðeins

14 útlagðir fletir og í barrskógum með yfir 5 metra yfirhæð voru endurmældir fletir 19 talsins (4. Tafla). Ástæða þess að fleiri fletir voru mældir í þeim flokki var sú að þar mátti búast við langmestum forða kolefnis í trjálagi og breytileiki því meiri en í lágvaxnari skógum.

Trjámælingar á hverjum mælifleti samanstóðu af þvermáli allra trjáa við brjósthæð (1,3 m), hnjáhæð (0,5 m) eða stubbhæð (0,1 m) eftir tegund og hæð. Hæð og hæðarvöxtur síðastliðinna fimm ára var mældur á próftrjám sem voru valin með aðstoð Feild map hugbúnaðarins (FieldMap, IFER, Tékkland; sjá: <https://www.feildmap.cz/>) í trjámælitölvunni, eftir að öll tré í mælifleti höfðu verið mæld, það voru t.d. yfirhæðar tré (YH), grunnflatarmiðju tré (GM) og undirhæðartré (UH). Þvermálsvöxtur síðustu fimm ára mældur á próftrjám með borkjarna í brjósthæð og aldur próftrjáa mældur með borkjarna í stubbhæð. Hinsvegar voru aukastofnar trjáa í mæliflötum í ræktuðum skógum ekki mældir og því ekki hluti af þessu mati.

Að loknum vetvangsmælingum voru gögn flutt úr FieldMap í Microsoft Access gagnagrunn til úrvinnslu, en sú vinna var unnin með Microsoft Excel. Þar var gögnum stillt upp eftir skógum og skógarflokkum til útreikninga og tölfræðivinnslu.

Borkjarnasýni voru mæld á Mógilsá rannskónarsviði Skógræktarinnar, til þess var notuð smásjá sem er sérstaklega hönnuð fyrir áhringjagreiningar TSAP-Win software (Copyright © 2003 Frank Rinn, Heidelberg, Rinn Tech). Þegar sýni voru tekin upp til greiningar þá voru þau límd á trélista og merkt. Það er gert til að sýni skemmist síður og til að ganga úr skugga um að rétt hlið borkjarna sé mæld. Skafið var ofan af sýni með skurðhníf og borið talkúm á yfirborð til þess að áhringir séu skírari í smásjá. Við aldursgreiningu eru taldir áhringir frá miðju, en til þess að mæla þvermálsvöxt þá er áhringjavöxtur síðustu fimm ára mældur með 0.001 mm nákvæmni og margfaldað með tveim.

2.2.3 Útreikningar á kolefnisforða svæðanna og öryggismörkum

Kortlagður skógur og flokkun svæða í skógargerðir með Landupplýsingarkerfi ArcGIS var notað til þess að reikna flatarmál skóga. Til þess að ákvarða lífmassa ofanjarðar voru notuð þekkt lífmassaföll fyrir íslenskar trjátegundir (Arnór Snorrason o.fl., 2006; Þorbergur Hjalti Jónsson o.fl., 2018) sem nýta þvermál allra trjáa á mælifleti og hæð þeirra. Föllin sem notuð voru má sjá í Töflu 4.

Lífmassi grófróta var áætlaður 20% af heildarlífmassa óháð trjáhæð eða trjátegund, en það er í samræmi við niðurstöður íslenskra rannsókna (Arnór Snorrason o.fl., 2002).

Lífmassi ofanjarðar fyrir 5 árum (2012) var metinn fyrir öll vaxtarmæld tré út frá hlutfallslegum þvermálsvexti GM trjáa sem tekin voru til áhringjagreininga úr hverjum fleti og áætluðum árlegum hæðarvexti, sem byggði á mælingum á hæðarvexti próftrjáa síðustu 5 árin. Sömu jöfnur (Tafla 3) voru þá notaðar til að reikna út viðarrúmmál og lífmassa próftrjáanna í öllum mæliflötum árið 2012. Hlutfallslegur árlegur lífmassavöxtur próftrjáa á mælifleti (vaxtarprósenta lífmassa) var síðan notaður til að áætla lífmassavöxt allra trjáa á hverjum mælifleti árið 2012. Árlegur meðal lífmassavöxtur (hlaupandi vöxtur) próftrjáa var svo reiknaður út sem mismunurinn milli 2012 og 2017.

Kolefnishlutfall trjálífmassa var áætlað 50%, en það er í samræmi við niðurstöður úr innlendum rannsóknum (Arnór Snorrason o.fl., 2000). Þannig var hægt að áætla kolefnisforða og kolefnisvöxt í trjám á hverjum mælifleti.

Fyrir hvern skógarflokk var reiknað meðaltalsgildi fyrir nettókolefnisbindingu skóglendisins í lífmassa ásamt 95% tölfræðilegum vikmörkum. Bindingin í lífmassa trjáa er hér kölluð nettókolefnisbinding þar sem hún tekur ekki tillit til dauðs viðar (*E. Coarse Woody Debris*) eða grisjaðra trjáa í ræktuðum skógum. Bindingin var bæði metin sem meðal kolefnisbinding í lifandi trjám árið 2017 og sem hlaupandi árleg kolefnisbinding þeirra á síðustu 5 árum.

Tafla 4. Jöfnur sem notaðar voru við að reikna út lífmassa og rúmmál stakra trjáa.

Tegundir og Spönn óháðra breyta	Háðar breytur	Óháðar breytur	Fall	Heimild
Rauðgreni D _{1,3} : 2,7-27,9 cm H: 2.7-12.0 m	Lífmassi ofanjarðar	D _{1,3} , H	DW = 0.2465d ^{2.12} h ^{-0.167}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{1,3} , H	Volume = 0.1299d ^{1.6834} h ^{0.8598}	
	Lífmassi bolviðar	D _{1,3} , H	DW _{stem} = 0.0712d ^{1.637} h ^{0.7436}	
Blágreni D _{1,3} : 1.4-12.7 cm H: 1.7-12.7 m	Lífmassi ofanjarðar	D _{1,3} , H	DW = 0.9211d ^{1.438} h ^{0.102}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{1,3} , H	Volume = 0.4693d ^{1.311} h ^{0.781}	
	Lífmassi bolviðar	D _{1,3} , H	DW _{stem} = 0.2288d ^{1.239} h ^{0.717}	
Sitkagreni D _{1,3} : 4.9-28.6 H: 4.8-15.4	Lífmassi ofanjarðar	D _{1,3} , H	DW = 0.1334d ^{1.8716} h ^{0.4386}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{1,3} , H	Volume = 0.0739d ^{1.7508} h ^{1.0228}	
	Lífmassi bolviðar	D _{1,3} , H	DW _{stem} = 0.0558d ^{1.5953} h ^{0.9336}	
Stafafura D _{1,3} : 4.2-26.3 cm H: 2.8-12.8	Lífmassi ofanjarðar	D _{1,3} , H	DW = 0.1429d ^{1.8887} h ^{0.4332}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{1,3} , H	Volume = 0.1491d ^{1.6466} h ^{0.8325}	
	Lífmassi bolviðar	D _{1,3} , H	DW _{stem} = 0.0669d ^{1.5958} h ^{0.9096}	
Síberíu lerki D _{1,3} : 3.3-31.6 cm H: 3.0-20.0	Lífmassi ofanjarðar	D _{1,3} , H	DW = 0.1081d ^{1.53} h ^{0.9482}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{1,3} , H	Volume = 0.0983d ^{1.551} h ^{1.1483}	
	Lífmassi bolviðar	D _{1,3} , H	DW _{stem} = 0.0444d ^{1.4793} h ^{1.2397}	
Birki og Reynir D _{0,5} : 2.1-29.8 cm H: 2.1-11.6 m	Lífmassi ofanjarðar	D _{0,5} , H	DW = 0.0634d ^{2.1552} h ^{0.2877}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{0,5} , H	Volume = 0.0452d ^{1.8091} h ^{1.0487}	
	Lífmassi bolviðar	D _{0,5} , H	DW _{stem} = 0.0295d ^{1.9451} h ^{0.7672}	
Alaskavíðir og Viðja D _{0,5} : 2.1-29.8 cm H: 2.1-11.6 m	Lífmassi ofanjarðar	D _{0,5} , H	DW = 0.0348d ^{1.9123} h ^{0.8904}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
Alaskaösp D _{1,3} : 4.6 - 34 cm H: 4.6-20.7 m	Lífmassi ofanjarðar	D _{1,3} , H	DW = 0.0717d ^{1.8322} h ^{0.6397}	(Arnór Snorrason o.fl., 2006)
	Rúmmál bolviðar	D _{1,3} , H	Volume = 0.0732d ^{1.6933} h ^{1.0562}	
	Lífmassi bolviðar	D _{1,3} , H	DW _{stem} = 0.0379d ^{1.581} h ^{1.0795}	
Náttúrulegt birki D ₀ : 1.8 -6.4 D _{0,5} : 0.2 - 21.4	Lífmassi ofanjarðar	D ₀ D _{0,5}	DW = 0.0786d ^{2.5609} DW = 0.3932d _{0,5} ^{2.4771}	Þorbergur H. Jónsson o.fl., (2018).

2.2.4 Uppskölun og skekkjumat

Stærð svæðis (úrtakseining) sem hver mæliflötur stóð fyrir réðist af skilgreindu flatarmáli hvers skógarflokks fyrir sig og fjölda mæliflata sem mældir voru innan hvers flokks.

Gildi eru öll gefin upp í tonnum af bundnu koldíoxíði, CO₂, en 3,67 tonn af CO₂ þarf í eitt tonn af kolefni sem bundið er í viði. Reiknuð var út heildarsumma fyrir alla flokka; þ.e. heildarmagn lífmassa hvers flokks. Við útreikning á 95% tölfræðilegum vikmörkum fyrir heildarmagnið var beitt tölfræði flokkaðs slembivals (Van Laar, o.fl., 2007).

Við útreikning á nettó-kolefnisbindingarhraða í lífmassa skóga heillra skógarjarða á tímabilinu 2012-2017, var fundið flatarmálsvegið meðaltal af mældri hlaupandi bindingu allra skógarflokka sem voru á hverri skógræktarjörð. Meðal nettó-kolefnisbinding heilla jarða frá gróðursetningu var einnig fundinn með flatarmálsvegnu meðaltali á meðalársbindingu allra skógarflokka á hverri jörð.

Engin úttekt var gerð á gróðursetningum í Heiðmörk sem gróðursettar voru eftir að Pic (2009) gerði sína úttekt árið 2007. Í mati á kolefnisbindingu þessara svæða var stuðst við bindistuðla 9-14 ára birki, lerki og stafafuruskóga á Fljótsdalshéraði, 0,67 t CO₂ á ha og ári (Bjarni Diðrik Sigurðsson o.fl., 2008).

3. Niðurstöður

3.1 Kortlagning og flokkun skóga

Í Töflu 2. má sjá flatarmál mismunandi skógargerða (flokka) á rannsóknasvæðunum þremur eins og var metið árið 2018 eftir endurkortlagningu. Útlínur og skipting svæðanna í skógarflokka er einnig sýnt á 5. – 7. mynd.

Tafla 5. Flatarmál skógarflokka fjöldi útlagðra og mældra mæliflata, flatarmál sem hver mæliflötur stendur fyrir í skógi og fjöldi mældra trjáa á úttektarsvæðum. Mælifletir voru lagðir út í Heiðmörk og á Ölfusvatni og Nesjavöllum í Grafningi. Samarið 2017 voru allir mælifletir heimsóttir og mældir.

Flokkur	Flatarmál	Fjöldi útlagðra mæliflata	Fjöldi mældra mæliflata	Stærð úrtakseininga	Fjöldi mældra trjáa
	<i>ha</i>	<i>stk</i>	<i>stk</i>	<i>ha</i>	<i>stk</i>
Heiðmörk					
Ungskógar	103	0	0	0	0
Barrskógar >5m	268	49	19	14,1	545
Barrskógar <5m	139	42	15	9,3	304
Blandskógar	442	14	14	31,6	247
Náttúrulegir birkisk.	1008	19	15	67,2	1382
Samtals	1960	-	63	-	2478
Ölfusvatn					
Barrskógar	34	15	15	2,3	369
Ræktað birki	75	15	15	5	321
Samtals	109	-	30		690
Nesjavellir					
Ræktað birki	92	15	15	6,1	557
Náttúrulegir birkisk.	126	15	15	8,4	595
Samtals	218	-	30	-	1152
Samtals öll svæði	2287	184	123	-	4320

Samtals þöktu náttúrulegir og ræktaðir skógar 2287 ha á öllum þremur skógarjörðunum, eða 1960, 218 og 109 ha í Heiðmörk, Nesjavöllum og Ölfusvatni (Tafla 5.). Hver mæliflötur í ræktaðum skógum á Ölfusvatni og Nesjavöllum stóð að jafnaði fyrir um 6 ha/flöt, en um 18 ha/flöt í ræktaðum skógum Heiðmerkur. Hver mæliflötur stóð fyrir meira flatarmál í náttúrulegum birkiskógum, eða um 8 og 67 ha/flöt á Nesjavöllum og Heiðmörk. Alls voru mæld 4320 tré í úttektinni, eða sem svaraði til 1,9 tré per ha skógar. Einn flokkur var undanskilið við mat á standandi lífmassa og kolefnisforða í Heiðmörk, en það voru 103 ha af ungskógum sem

gróðursettir voru á allra síðustu árum og þar voru trén enn almennt minni en brjósthæð (1,3 m). Þetta var 5% af flatarmáli allra skóga í Heiðmörk árið 2017 og 11% af flatarmáli ræktaðra skóga þar (Tafla 5.).

3.2 Áhrif endurkortlagningarinnar á flatarmál skóga og skógargerða

Allir skógar í þessari rannsókn höfðu áður verið kortlagðir á einn eða annan máta, en flatarmál allra skóganna tók breytingum við endurkortlagninguna 2017. Skógarnir á Nesjavöllum og Ölfusvatni höfðu hinsvegar ekki verið flokkaðir í skógarflokka áður, en í Heiðmörk lá fyrir slík skipting í fyrri kortlagningu.

3.2.1 Heiðmörk

Við endurkortlagningu skógarflokka í Heiðmörk voru flokkunarskilgreiningar ekki þær sömu og í fyrri úttekt, auk þess sem skógar hafa vaxið út úr fyrri flokkum milli úttekta. En heildarflatarmál skóglendis jókst um 699 ha, úr 1261 ha í 1960 ha, frá fyrri úttekt sem var frá 2007 (5. Tafla). Þetta var 55% aukning, sem kom talvert á óvart. Mesti munurinn lá í flatarmáli náttúrulegra birkiskóga sem jókst um 426 ha, úr 582 í 1008 ha, eða um 73% milli úttektanna (Tafla 3 og 6). Aukningin í flatarmáli ræktaðra skóga var alls um 273 ha við endurkortlagninguna 2017, úr 679 í 952 ha. Ungskógar, sem að hluta voru svæði gróðursett eftir að síðustu úttekt voru 103 ha. Auk þess „fundust“ um 170 ha af eldri ræktuðum skógum við endurkortlagninguna 2017 (Tafla 3. og 6.).

Árið 2017 var ekki sérstakur flokkur fyrir ræktaða birkiskóga í Heiðmörk, heldur var myndaður safnflokkurinn „blandskógar“ fyrir allar skógargerðir þar sem ræktuð lauftré voru ríkjandi, oft í bland við gisinn barrskóg. Í þessum flokki voru 50% úttektarreita (7 af 14 reitum) hreinir ræktaðir birkiskógar (gögn ekki sýnd). Það var þessi flokkur sem stækkaði hlutfallslega mest á milli úttektanna, eða 140%, úr 184 ha í 442 ha (Tafla 6.). Á móti minnkaði flokkurinn „barrskógar undir 5 metra yfirhæð“ um 48%, úr 267 ha í 139 ha, en flokkurinn „barrskógar yfir 5 m yfirhæð“ breyttist minnst í flatarmáli, eða jókst um 40 ha eða um 18% (Tafla 6.).

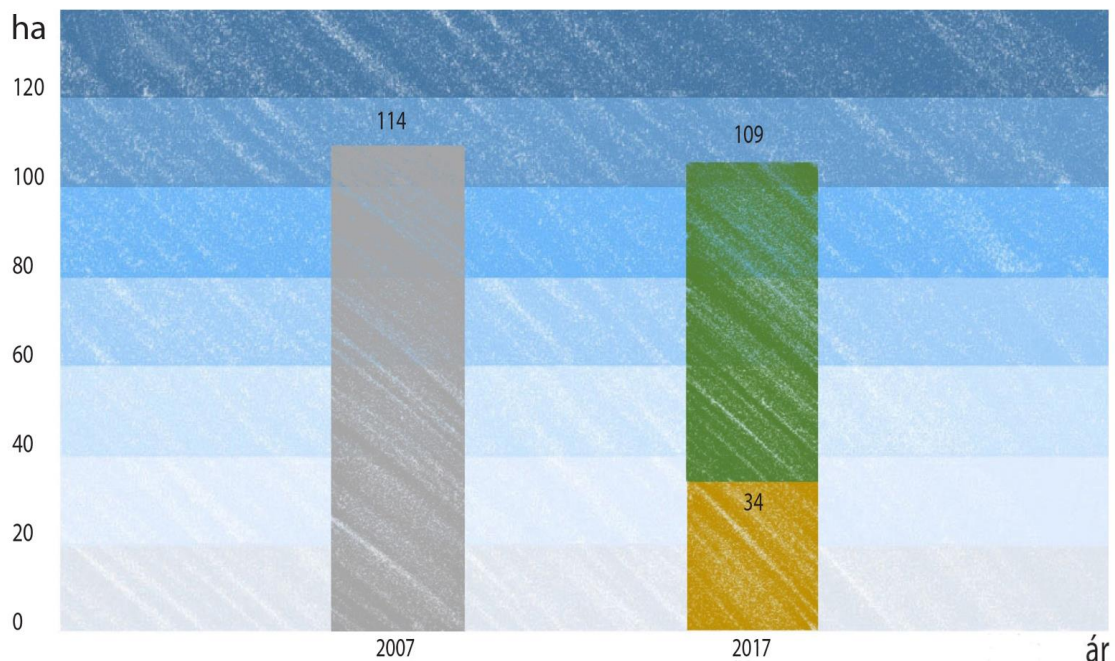
Tafla 6. Samanburður á flatarmáli kortlagðra skógarflokka í Heiðmörk. Taflan sýnir flatarmál skógarflokka eins og það var í fyrri úttekt á kolefnisbindingu skógar árið 2007 (Pic, 2009) og flatarmál skógarflokka eftir endurkortlagningu fyrir þessa úttekt sem unnin var árið 2017. Flatarmál er í hekturum en einnig er sýnd hlutfallsleg breyting á skógarflokkum milli úttekta.

Heiðmörk	2007	2017	Breyting
Náttúrulegt birki	582	1008	+73%
Blandskógar*	184	442	+140%
Barrskógar<5m**	267	139	-48%
Barrskógar>5m***	228	268	+18%
Samtals eldri skógar	1261	1960	+55%
Ungskógar	0	103	+100%

* Var flokkað sem ræktaður birkiskógur, ** <3 m og *** >3 m í Pic (2009)

3.2.2 Ölfusvatn

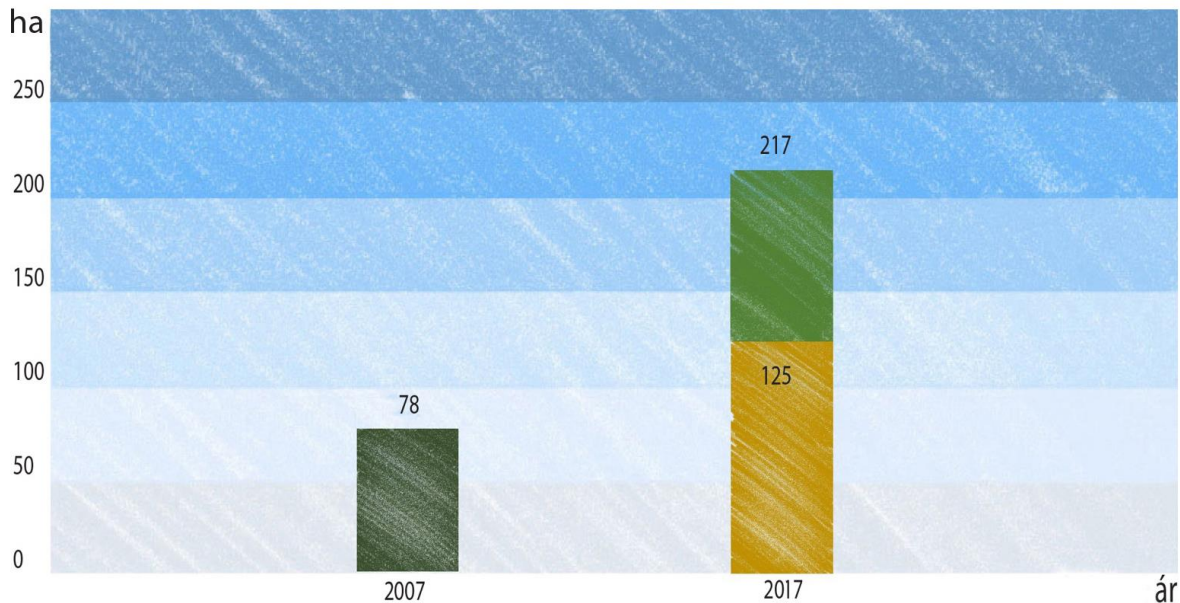
Skógur á Ölfusvatni skar sig úr hinum skógunum í þessari rannsókn að því leiti að þar óx aðeins ræktaður skógur. Í fyrri úttekt var metin heildarstærð skóglendis þar 114 ha (8. mynd), en í þessari rannsókn var skógur flokkaður í ræktaðan birkiskóg annarsvegar sem var 75 ha að stærð og hinsvegar barrskóg sem var 34 ha að stærð (2. Tafla; 8. mynd). Heildarflatarmál skóga á Ölfusvatni minnkaði því um 4,4% við endurkortlagninguna, eða um 5 ha (8. mynd).



8. mynd. Stærð skóglendis á Ölfusvatni í ha. Samanburður á úttekt frá 2007 (Ingvi Þorsteinsson, 2007) við þessa úttekt. Árið 2007 (grá súla) var skóglendi ekki flokkað en árið 2017 var skóglendi flokkað í barrskóg (gulbrúnt) og ræktaðan birkiskóg (grænt).

3.2.3 Nesjavellir

Við endurkortlagningu og flokkun skóga á Nesjavöllum þá stækkaði flatarmál skóga í matinu umtalsvert, eða um 178% (9. mynd). Flatarmál gróðursettra birkiskóga var meira en í fyrri kortlagningu, fór úr 78 ha í 92 ha, sem var 18% aukning frá úttektinni 2007. Mestu munaði hinsvegar um náttúrulegu birkiskógana sem greinilega höfðu ekki verið teknir með í síðustu kortlagningu (9. mynd).



9. mynd. Stærð skóglendis á Nesjavöllum í ha. Kortlagður skógur 2017 í samanburði við úttekt frá 2007 (Ingvi Þorsteinsson, 2007). Í fyrri úttekt var ekki lagt mat á stærð náttúrulegra birkiskóga né þeir flokkaðir en árið 2017 var skóglendi flokkað í náttúrulega birkiskóga (rauðbrúnt) og ræktaðan birkiskóg (grænt).

3.3 Samanburður á aldri gróðursetninga með borkjarna og framkvæmdarskráningu.

Þegar borin voru saman gögn úr ágætri framkvæmdarskráningu í landupplýsingakerfi um aldur skóga í Grafningi við mældan aldur 2017 með áhringjagreiningu, þá kom í ljós nokkuð vanmat í aldri áætluðum með áhringjaaðferð. Gögn úr borkjarnasýnum sem tekin voru úr ríkjandi trjám í skógum á Nesjavöllum og Ölfusvatni sýndu að meðalaldur gróðursetninga (vegið með flatarmáli) var 16,2 ár, en meðalaldur sömu gróðursetninga í framkvæmdarskráningu var 21,6 ár, það var því u.þ.b. 5 ára munur. Í framkvæmdarskráningu voru þó gjarnan nokkur ártöl í hverjum skógarreit sem gefur til kynna að þar hafi verið gróðursett yfir nokkura ára tímabil, en ekki er vitað á hvaða ári sá hluti reitsins þar sem hver mæliflötur var staðsettur var gróðursettur. Því var tekið meðaltal á skráðum gróðursetningaráldri þeirra tveggja gróðursetninga sem næstar

voru í aldri við áhringjagreiningu, þar sem fleiri en einn aldur hafði verið skráður. Þá var niðurstaðan sú að meðal mismunur aldurs í hverjum flokki miðað við árringjamælingar var:

Ölfusvatn, barrskógar: +2,9 ár

Ölfusvatn, gróðursett birki: +3,1 ár

Nesjavellir, gróðursett birki: +3,3 ár

Því var bætt við 3 árum við niðurstöður úr áhringjamælingum við aldur trjáa á Ölfusvatni og Nesjavöllum þar sem aldurinn byggði bara á þeim.

3.4 Samanburður á vaxtarhraða skóga milli Ölfusvatns, Nesjavalla og Heiðmerkur

Í Töflum 7 og 8 eru yfirlit yfir meðalgildi helstu skógmælingarbreyta í skógarflokkum sem mældir voru. Sambærilegir flokkar voru bornir saman til þess að athuga hvort marktækur munur væri í vexti skóga milli svæða. Það voru aðeins þrjú flokkar sem komu fyrir á ólíkum svæðum; i) „barrskógar <5 m“ á Ölfusvatni og í Heiðmörk, „náttúrulegir birkiskógar“ á Nesjavöllum og í Heiðmörk og „ræktaðir birkiskógar“ á Nesjavöllum og Ölfusvatni (5. Tafla).

Það var ekki marktækur munur á bolviðarrúmmál milli „barrskóga <5 m“ í Heiðmörk á Ölfusvatni (F próf; $p = 0,90$). Meðalaldur var einnig nánast sá sami og yfirhæð einnig á milli þessara skógargerða (Töflur 7 og 8).

Bolviðarrúmmál í ræktuðum birkiskógum á Nesjavöllum var $1,8 \text{ m}^3/\text{ha}$ og á Ölfusvatni var hann $1, \text{ m}^3/\text{ha}$, en munurinn var ekki marktækur (F próf; $p = 0,32$) (Töflur 7 og 8).

Það fannst ekki marktækur munur á bolviðarrúmmáli milli náttúrulegra birkiskóga í Heiðmörk og á Nesjavöllum (F próf; $p = 0,07$), þó meðalaldur náttúrulegra birkiskóga í Heiðmörk væri umtalsvert hærri (Töflur 7 og 8). Meðalársvöxtur þeirra var enn fjær því að vera marktækt ólíkur (F próf; $p = 0,22$).

Niðurstaðan var því að ekki reyndist vera neinn marktækur munur á vaxtargetu skóganna á milli þessara þriggja jarða á SV-landi. Því voru gögnin fyrir mismunandi staði sameinuð þegar leitað var svara við öðrum rannsóknaspurningum, í stað þess að endurtaka slíkan samanburð á flokkum á fleiri en einum stað.

Tafla 7. Meðaltal og staðalskekkja (e: standard error sk.st. SE) helstu skógmælingabreyta í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum árið 2017 í fjórum skógargerðum. Einingar í töflu eru eftirfarandi: Meðalaldur er í árum, grunnflötur eru fermetrar á hektara ($m^2 ha^{-1}$), yfirhæð er í metrum, viðarmagn er rúmmetrar á hektara ($m^3 ha^{-1}$), núverandi ársvöxtur (N.vöxtur) og meðalársvöxtur (M.vöxtur) eru rúmmetrar á hektara og ári ($m^3 ha^{-1} ár^{-1}$). Sjá Töflu 4 og 5. mynd fyrir nánari upplýsingar um fjölda mæliflata, stærð og staðsetningu skógarflokka.

Staður	Flokkur	Aldur	SE	Grunnflötur	SE	Yfirhæð	SE	Viðarmagn	SE	N.vöxtur	SE	M.vöxtur	SE
Heiðmörk	barr<5m	24	1,2	17,2	3,1	5,6	0,3	37,4	7,5	4,0	0,6	1,6	0,3
	barr>5m	47	2,0	32,8	4,0	11,2	0,8	150,3	25,5	11,4	1,7	3,1	0,5
	nátt.birki	62	6,3	5,5	2,2	2,3	0,3	4,0	0,9	0,3	0,1	0,1	0,02
	bland	37	3,5	9,6	3,3	5,8	0,5	15,0	4,5	1,7	0,4	0,5	0,3
Ölfusvatn	barr	22	1,0	12,8	3,1	5,7	0,6	35,9	9,8	4,1	0,4	1,6	0,4
	ræktað birki	17	0,9	0,8	0,2	2,9	0,1	1,0	0,5	0,2	0,1	0,1	0,03
Nesjavöllir	ræktað birki	21	1,6	1,7	0,5	0,3	1,8	1,8	0,6	0,2	0,1	0,1	0,03
	nátt.birki	23	3,2	3,6	1,0	0,3	3,9	3,9	1,3	0,3	0,1	0,2	0,1

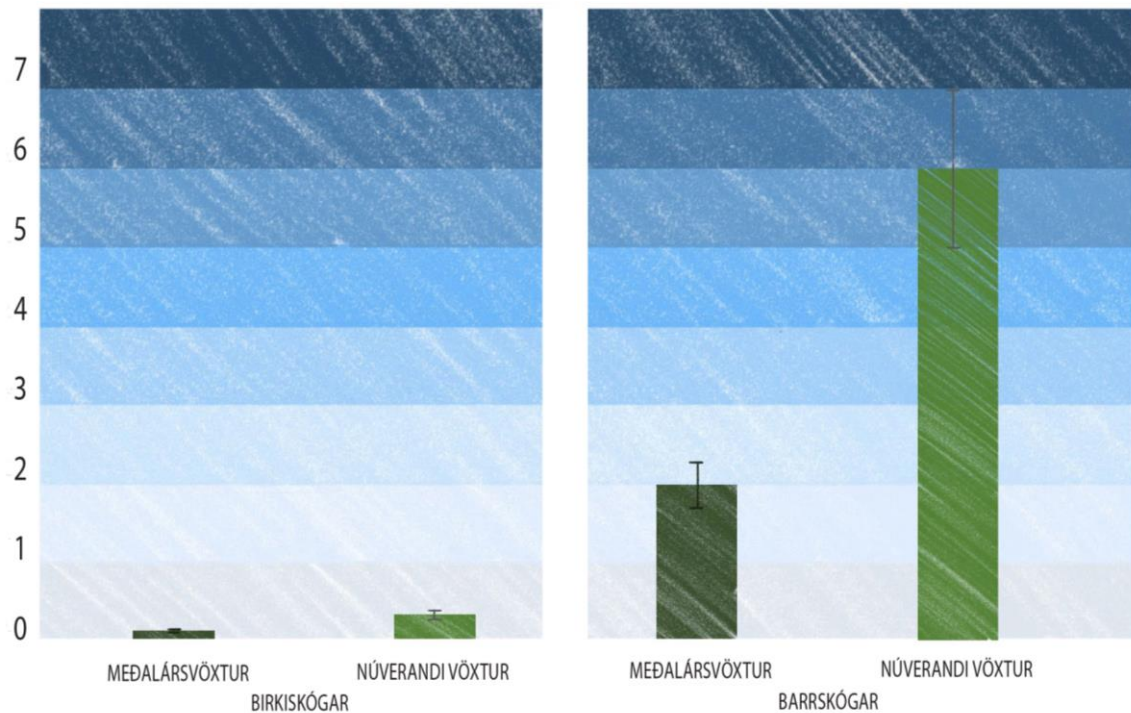
3.5 Samanburður á vexti og bindihraða skógargerða

3.5.1 Ársvöxtur og meðalársvöxtur í öllu gagnasafninu

Gögnum úr mæliflötum var slegið saman frá öllum þremur svæðunum og tveir meginflokkar, barr- og birkiskógar (bæði náttúrulegir og ræktaðir) bornir saman og skoðaður munur á þessum tveimur skógargerðum. Allir mælifletir sem höfðu verið grisjaðir voru undanskildir, ásamt mæliflötum sem voru úr skógum yfir 60 ára aldri. Í Heiðmörk voru 15 mælifletir úr barrskógum undir 5 metra hæð, 14 mælifletir úr barrskógum yfir 5 metra hæð, 4 mælifletir úr náttúrulegu birki og 7 mælifletir úr blandskógum vöxnum birki. Á Ölfusvatni voru 13 mælifletir úr barrskógum og 15 mælifletir úr ræktaðum birkiskógum. Á Nesjavöllum voru 15 mælifletir í ræktaðum birkiskógum og 12 mælifletir úr náttúrulegum birkiskógum. Alls voru þetta 95 mælifletir, 42 fletir úr barrskógi og 53 fletir úr birkiskógi.

Tafla 8. Samanburður á meðalársvexti og núverandi ársvexti birki- og barrskóga þar sem gögn hafa verið sameinuð úr Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum frá árinu 2017. Sjá 10. mynd. Sýnd eru P gildi ferveikagreingar (Anova).

Anova	Meðalársvöxtur	Núverandi ársvöxtur
birki-barr	<.0001	<.0001



10. mynd. Meðalársvöxtur og núverandi ársvöxtur bolviðar í m³ á ha og ár í birkiskógum og barrskógum í Heiðmörk, Nesjavöllum og á Ölfusvatni haustið 2017. Meðalársvöxtur var meðaltal vaxtar miðað við aldur skógar en núverandi ársvöxtur var meðaltal vaxtar síðustu fimm ára frá mælingu, það er árunna 2013-2017. Tölfræðileg greining er sýnd í Töflu 8.

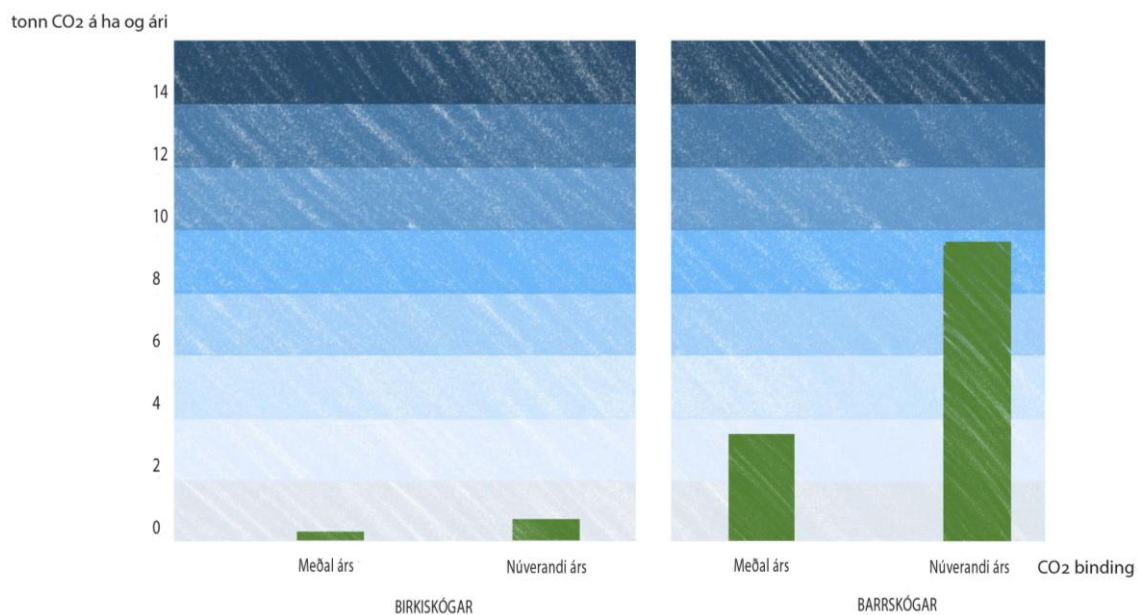
Meðalaldur birkiskóga í þessum samanburði var 25 ár og á þeim tíma höfðu að jafnaði bæst árlega við 0,1 m³ af bolviði á hvern hektara á meðan að meðaltali höfðu bæst við 2 m³ á ha í barrskógunum, sem voru að meðaltali 30 ára (10. mynd). Munurinn á vaxtarhraða þessa tveggja skógargerða fyrstu þrjá áratugi vaxtarlotunar var hámarktækur (Tafla 10). Meðalársvöxtur var marktækt lægri í báðum skógargerðum en núverandi ársvöxtur (Tafla 7), eða 33% í birkiskógunum og 36% í barrskógunum (10. mynd). Það bendir til þess að meðalársvöxtur í báðum skógargerðum hafi ekki náð hamarki sínu og sé enn að aukast.

Þegar borinn er saman núverandi ársvöxtur barrskóga (Tafla 7), þá er talsverður munur á barrskógum undir 5 metra hæð og yfir 5 metra hæð í Heiðmörk, meðalaldur barrtrjáa yfir 5 metrum var u.þ.b. helmingi hærri en meðalaldur barrtrjáa undir 5 metra hæð eða 47 ára og 24 ára. Núverandi ársvöxtur m³ á ha og ári barrtrjáa undir 5 metra hæð var þá 35% af núverandi ársvexti barrtrjáa yfir 5 metra hæð og munurinn á vaxtarhraða þessara flokka var því marktækur. Ef borinn er saman núverandi ársvöxtur barrtrjáa á Ölfusvatni við flokk barrtrjáa undir 5 metra hæð í Heiðmörk, þá er meðalaldur þeirra mjög svipaður eða 22 og 24 ára og núverandi ársvöxtur að sama skapi nánast hinn sami eða 4,1 og 4,0 m³ á ha og ári.

Þegar borinn er saman núverandi ársvöxtur birkiskóga (Tafla 7), þá er munur á milli flokka ekki marktækur, þó að meðalaldur náttúrulegra birkiskóga í Heiðmörk sé u.þ.b. þrefalt hærri en birkiskógaflokka á Nesjavöllum og Ölfusvatni. Skógarflokkur blandskóga er ólíkur barr- og birkiskógum, með talsvert lægri vöxt en barrskógar og hærri en vöxtur birkiskóga.

3.5.2 Núverandi árs kolefnisbinding barr- og birkiskóga

Núverandi árs kolefnisbinding, líkt og núverandi ársvöxtur, er mat á hversu mikill lífmassi bætist við árlega í skógi (meðaltal síðustu fimm ára), í bol, greinum, barri og grófrótum. Þegar hann var borinn saman á milli birki- og barrskóga á SV-landi árið 2017 kom í ljós hámarktækur munur í bindihraða þessara skógargerða (11. mynd). Meðalárskolefnisbinding birkiskóga var 0,3 tonn CO₂ á ha og ári samanborið við 3,6 tonn CO₂ á ha og ári í barrskógum, núverandi árs kolefnisbinding í birkiskógum var 0,7 tonn CO₂ á ha og ári samanborið við 9,8 tonn CO₂ á ha og ári í barrskógum.



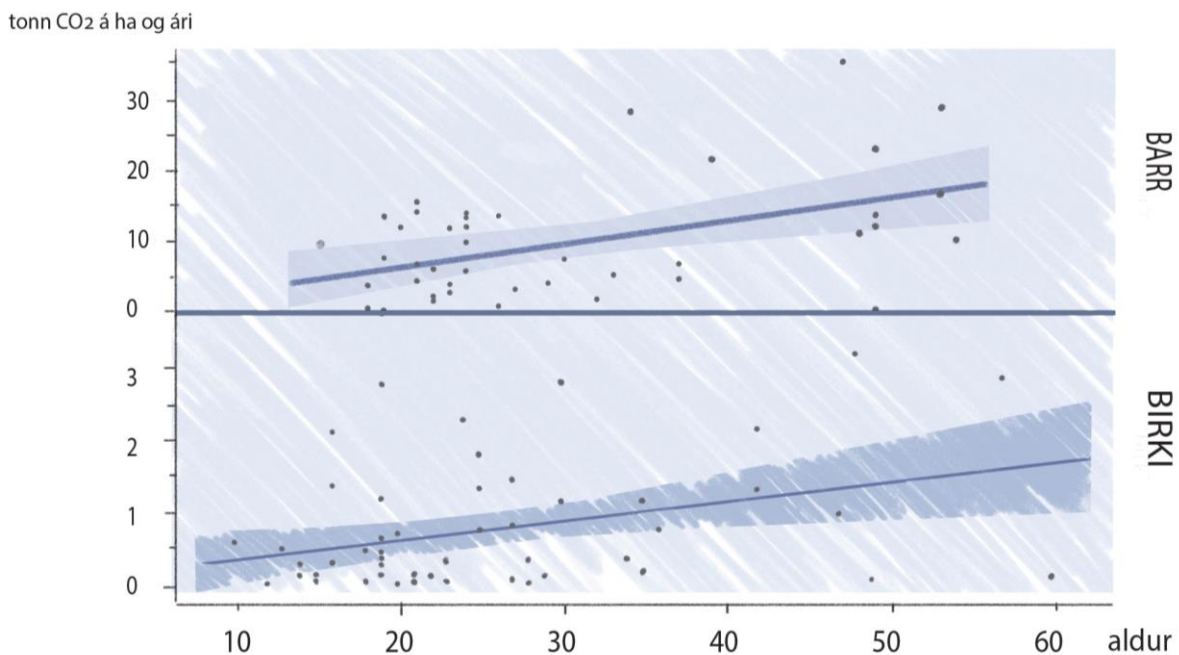
11. mynd. Meðalárs kolefnisbinding og núverandi árs kolefnisbinding birkiskóga og barrskóga (tonn CO₂ á ha og ári) í Heiðmörk, Nesjavöllum og á Ölfusvatni haustið 2017. Meðalárs kolefnisbinding var meðaltal bindingar miðað við aldur skógar en núverandi árs kolefnisbinding var meðaltal bindingar síðastliðinna fimm ára. Tölfræðileg greining er sýnd í 10. Töflu.

Í birki- og barrskógum var árleg aukning núverandi árs kolefnisbindingar marktækt ólík (12. mynd; birki $P = 0,0091$, $R^2 = 0,126$; barrskógar $P = 0,002$, $R^2 = 0,214$). Aðhvörf fyrir núverandi ársbindingu á móti aldri (A) voru:

$$\text{Birkiskógur} = 0,06377 + 0,02664 \times A \quad (1)$$

$$\text{Barrskógur} = 0,1627 + 0,3177 \times A \quad (2)$$

Jöfnur 1. og 2. sýna að núverandi ársbindingu (tonn CO_2 á ha og ári) eykst að jafnaði um 0,03 og 0,3 tonn CO_2 á ha með auknum aldri birki- og barrskóga. Ef að reiknuð er aukning núverandi árs kolefnisbindingar fyrir 25 ár þá hefðu barrskógar alls aukið bindihraða sinn um 8,1 tonn CO_2 á ha og ári og birki hefði aukið bindihraða sinn um 0,7 tonn CO_2 á ha og ári. Hvorug skógargerðin sýndi nein skýr merki um að núverandi árs kolefnisbinding væri tekinn að minnka á fyrstu 60 árum skógarframvindunnar.



12. mynd. Samanburður á breytingum á núverandi árs kolefnisbindingu í lífmassa skógar (tonn CO_2 á ha og ár) með aldri í ræktuðum birkiskógum og barrskógum árið 2017. Gögn úr Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum voru flokkuð og sameinuð.

Til að greina þessi gögn nánar voru tekin tvö aldursbil út úr gagnasettinu og munurinn á skógargerðunum borinn saman.

3.5.3 Vöxtur og kolefnisbinding yngri barr- og birkiskóga

Samanburður var gerður á barr og birkiskógum sem voru á aldrinum 15-25 ára (Tafla 8). Þá voru 24 barrskógafletir og 30 birkifletir til samanburðar í gagnasafninu. Skógargerðirnar voru

að jafnaði álíka gamlar (21 og 20 ára) og ekki var marktækur munur á þéttleika, en það skýrist af miklum breytileika innan hvers flokks (meðaltalsfjöldi trjáa á ha; 1946 (SE=1076) fyrir barrskóga og 4838 (SE=1203) fyrir birkiskóga ; F próf; p = 0,0791), það var því ekki þáttur sem skýrði ólíkan bindihraða. Hinsvegar voru allar breytur sem tengjast stærð trjáanna, viðarmagni eða kolefnisbindingu marktækt hærri fyrir barrskóginn (Tafla 8). Yfirhæð og grunnflötur birkiskóganna við 20 ára aldur var einungis 2,6 m og 2,2 m²/ha, sem þýðir að þeir voru enn mjög opnir og nýttu bara hluta sólarljóssins til vaxtar, á meðan barrkógurinn hafði á sama tíma náð fylla vaxtarrými sitt betur fyrstu 21 árin og hafði náð 5,8 m yfirhæð og 16,7 m²/ha grunnfleti. Bolviðarforði var orðinn tæplega sextánfalt meiri en í birkiskóginum (Tafla 8). Meðalársbinding í barrskóginum var 3,6 tonn af CO₂ á ha og ári og núverandi ársbinding 8,5 tonn CO₂ á ha og ári. Eins og við var að búast í svo ungum skógi var núverandi ársbinding meira en tvöfalt hærri en meðalársbinding. Samsvarandi bindistuðlar fyrir ungu birkiskógana voru 0,3 og 0,6 tonn CO₂ á ha og ári fyrir meðalárs- og núverandi ársbindingu.

Tafla 9. Aldurssamanburður á gögnum úr birkiskógum og barrskógum sem voru annarsvegar á aldursbilinu 15-25 ára og hinsvegar 40-60 ára, árið 2017. Grunnflötur er m² á ha, yfirhæð er í metrum, viðarmagn er m³ á ha, kolefnisforði er CO₂ tonn á ha, meðalársbinding og núverandi ársbinding eru tonn á ha og ári.

Aldursamanburður	Yngri skógar 15 - 25 ára			Eldri skógar 40-60 ára		
	barr	birki	P	barr	birki	P
Grunnflötur	16,7	2,2	<.0001	38,8	6,4	<.0001
Yfirhæð	5,8	2,6	<.0001	12,4	3,6	<.0001
Viðarmagn	39,6	2,5	<.0001	183,4	5,6	<.0001
Kolefnisforði (CO₂)	79,2	6,5	<.0001	275,1	13,1	<.0001
Meðalársbinding	3,6	0,3	<.0001	5,3	0,3	<.0001
Núverandi ársbinding	8,5	0,6	<.0001	17,00	1,51	<.0001

3.5.4 Vöxtur og kolefnisbinding eldri barr- og birkiskóga

Samanburður var einnig gerður á barr- og birkiskógum sem voru á aldrinum 40-60 ára, það voru 7 birkiskógafletir og 13 barrskógafletir (Tafla 9). Á þessu aldursbili var ekki heldur neinn marktækur munur á þéttleika skóganna (fjöldi barrtrjáa á ha; 2608(SE=692)) og birkitrjáa 4300 (SE=943) tré/ha; F próf; p = 0.1651) og ekki heldur á meðalaldri trjáa í þessum flokki (52 og 49 ár fyrir barr- og birkiskóga; F próf; p = 0.2806). Hinsvegar voru allar breytur sem tengjast stærð trjáanna, bolviðarforða eða kolefnisbindingu enn marktækt hærri fyrir barrskóginn (Tafla 9). Hlutfallslegur munur á milli skógargerðanna hafði hinsvegar ekki breyst mikið, nema fyrir yfirhæð þar sem birkiskógurinn hafði dregist verulega aftur úr barrskóginum. Á 49 árum náði

hann bara 29% af yfirhæð barrskógarins, miðað við að hafa náð 45% af hæð barrskógarins í ungskóginum (Tafla 9). Viðarmagn, kolefnisforði í lífmassa, meðalársbinding og núverandi ársbinding var 3%, 5%, 6% og 9% af því sem mældist í barrskóginum á þessu aldursbili (Tafla 9).

Meðalbinding í 52 ára gömlum barrskógum og var 5,3 tonn af CO₂ á ha og ári, miðað við meðalbindingu upp á 0,3 tonn CO₂ á ha og ári í 49 ára gömlum birkiskógum (Tafla 9). Það að meðalbinding var óbreytt í eldri birkiskógunum kom á óvart, þar sem núverandi árs binding þeirra var 1,5 tonn CO₂ á ha og ári, miðað við 0,6 tonn CO₂ á ha og ári í 20 ára gömlum skógum.

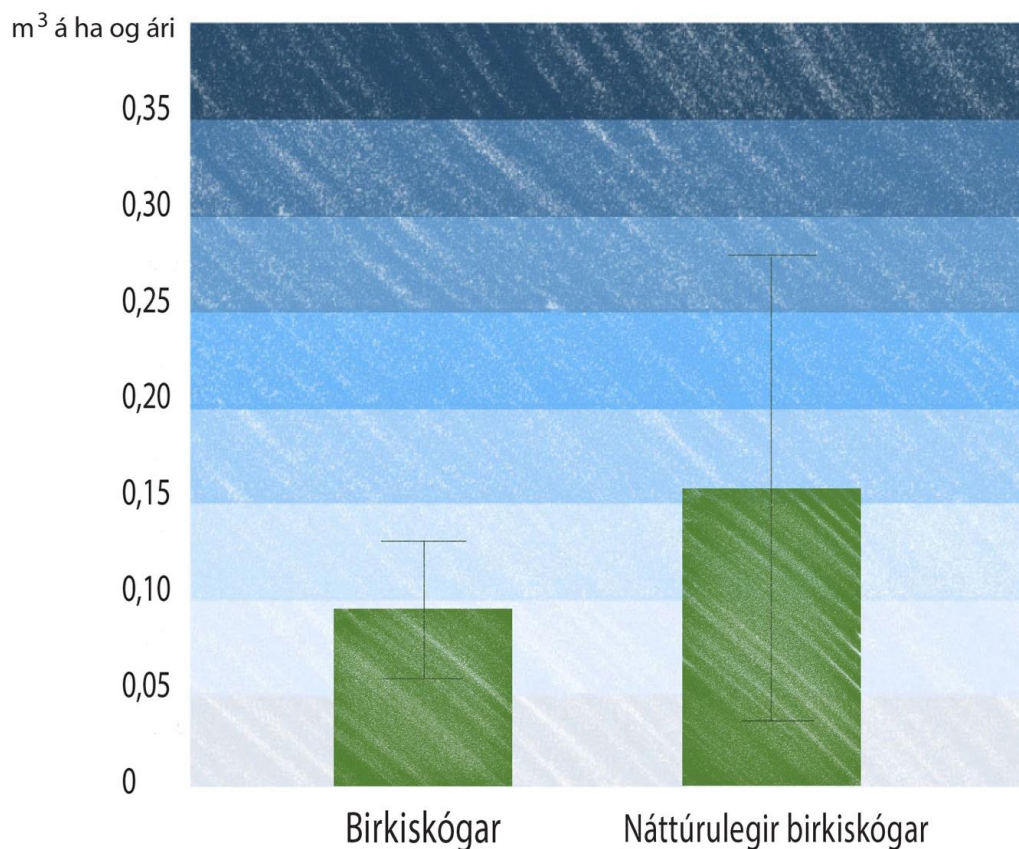
3.6 Vöxtur og kolefnisbinding í gróðursettum og náttúrulegum birkiskógum.

Gögnum úr mæliflötum var slegið saman frá öllum þremur svæðum og tveir meginflokkar birkiskóga bornir saman. Gögnunum var skipt í ræktaða birkiskóga og náttúrulega birkiskóga. Frekari flokkun á gögnum fyrir þennan samanburð var að í blandskógarflokki í Heiðmörk voru 7 af 14 mæliflötum sem innihéldu eingöngu gróðursett birki nýttir í sameinuðu gagnasetti sem ræktað birki. Gögn sem ekki voru tekin með í þennan samanburð voru mælifletir í barrskógum, tegundarblandaðir mælifletir í Heiðmörk og mælifletir í náttúrulegum birkiskógum sem höfðu ekki verið aldursmældir eða voru eldri en 60 ára. Einnig voru tveir trjálausir mælifletir í náttúrulegum birkiskógi á Nesjavöllum ekki hafðir með. Í gagnasettinu voru þá 37 mælifletir úr ræktuðum birkiskógum og 19 mælifletir úr náttúrulegum birkiskógum. Niðurstöðurnar er að finna í Töflu 10. og á 13. mynd.

Tafla 10. Samanburður á ræktuðum og náttúrulegum birkiskógum í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum sem mældir voru árið 2017. Grunnflötur er m² á ha, yfirhæð er í metrum, viðarmagn er m³ á ha, lífmassi er í tonnum CO₂ á ha, meðalársbinding og núverandi ársbinding er í tonnum CO₂ á ha og ári.

Skógarflokkur	Ræktað birki	SE	Náttúrulegt birki	SE	P
Aldur	23	1,6	31	3	0.0189
Yfirhæð	3,2	0,2	2,2	0,2	0.027
Grunnflatarmál	2	0,5	4	0,8	0.0353
Viðarmagn	2,4	0,5	3,9	1,2	0.1699
Lífmassi CO₂ t/ha	5,9	1,1	9,9	2,9	0.1149
Meðalárs CO₂ binding t/ha	0,2	0,03	0,4	0,1	0.148
Núverandi CO₂ binding t/ha	0,7	0,1	0,7	0,2	0.9559

MEÐALVÖXTUR Í BIRKI OG NÁTTÚRULEGUM BIRKISKÓGI (m³/ha) Á ÁRI



13. mynd. Samanburður á meðalvaxtarhraða m³ á ha og ári gróðursetts og náttúrulegs birkis í Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum haustið 2017. Sýnd eru 95% öryggismörk fyrir hvorn flokkinn fyrir sig.

Enginn marktækur munur fannst á meðalvaxtarhraða gróðursetts eða náttúrulegs birkis á rannsóknarsvæðum (13. mynd), né heldur á viðarmagni, kolefnisforða í lífmassa, meðalársbindingu eða núverandi árs kolefnisbindingu (Tafla 10). Hinsvegar var marktækur munur á þessum skógargerðum í yfirhæð (45% hærri fyrir ræktaða birkið) og í grunnfleti (100% hærri grunnflötur í náttúrulega birkinu) og aldri (náttúrulega birkið var að jafnaði 8 árum eldra). Þrátt fyrir að ræktaða birkið hefði meiri vaxtarhraða á hvert tré (væri marktækt herra við 8 árum lægri aldur) þá var þéttleikinn marktækt meiri í náttúrulegum birkiskógum (F próf; $p = 0.0005$) og þar með grunnflötur hans. Þessir tveir þættir (þ.e. vaxtarhraði trés samanborið við fjöldi trjáa á flatareiningu) vógu svipað þegar vaxtarhraði skóganna var borinn saman, þannig að enginn marktækur munur fannst á viðarmagni eða kolefnisbindingu (Tafla 9).

3.7 Hvernig breytist grunnflötur með aldri?

3.7.1 Ógrisjaðir barrskógar

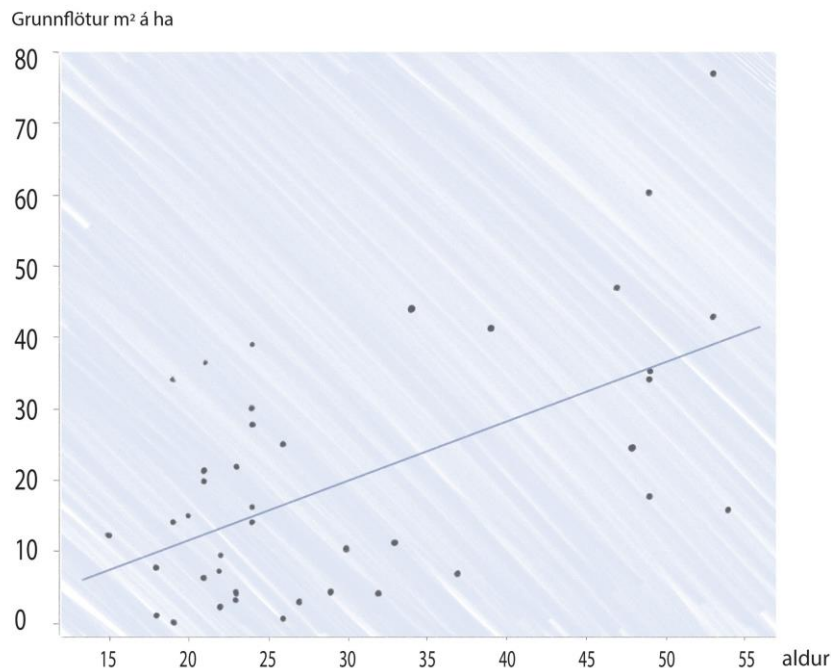
Skógfræðingar nota grunnflöt (e. Basal Area) til að stýra umhirðu í ræktuðum skógum eftir því sem þeir eldast. Til að athuga hvort mælingarnar í misgömlum lundum árið 2017 hafi náð að lýsa eðlilegum aldursháðum breytingum í barrskógum er áhugavert að skoða hvernig grunnflötur breyttist með aldri.

Gögnum úr mæliflötum var slegið saman frá Heiðmörk og Ölfusvatni úr flokkum barrskóga sem höfðu ekki verið grisjaðir og skoðað samband grunnflatar við aldur trjáa. Í gögnum voru 15 mælifletir úr barrskógum undir 5 metra hæð og 14 mælifletir úr barrskógum yfir 5 metra hæð í Heiðmörk og 13 mælifletir úr barrskógum á Ölfusvatni, alls 42 mælifletir (14. mynd).

Þegar samband aldurs og grunnflatar var skoðað í öllum mæliflötum í ógrisjuðum barrskógum (13. mynd) fékkst aðhvarfsjafnan ($P = 0,0001$; $R^2 = 0.31$):

$$G = -4,533 + 0,8241 \times A \quad (3)$$

þar sem G stendur fyrir grunnflöt og A fyrir aldur í árum. 3. jafna sýnir að jafnaði jókst grunnflöturinn um $0,8 \text{ m}^2$ á ha og hverju ári frá gróðursetningu í barrskógunum fyrstu 55 árin og enn var ekki að sjá neina skýra mettun á grunnfleti, þar sem sjálfgrisjun verður ríkjandi í framvindu skógarins (14. mynd.).



14. mynd. Breytingar á grunnfleti í brjósthæð (E: Basal area, sk.st. BA mælt í m^2 á ha) með aldri á öllum mæliflötum í ógrisjuðum barrskógum í Heiðmörk og Ölfusvatni árið 2017. Línan er aðhvarf.

3.7.2 Grisjaðir barrskógur

Á sama hátt og búast má við að grunnflötur aukist með aldri í yngri ógrisjuðum (skuggþolnum) barrskógum, þá ætti slíkt samband að hverfa eftir að skógarnir hafa verið grisjaðir.

Í gagnasafninu voru bara 7 mælifletir með grisjuðum barrskógum, 5 mælifletir úr barrskógum yfir 5 metra hæð í Heiðmörk og 2 mælifletir úr barrskógum á Ölfusvatni, alls 7 mælifletir. Þegar samband grunnflatar og aldurs var skoðað í þeim fannst ekkert marktækt samband og meðal grunnflötur í þeim öllum var 31 m² á ha (gögn ekki sýnd).

Þetta eykur tiltrú á því að gagnasettið sé að sýna raunverulegar breytingar sem verða á barrskógum með aldri og með umhirðu.

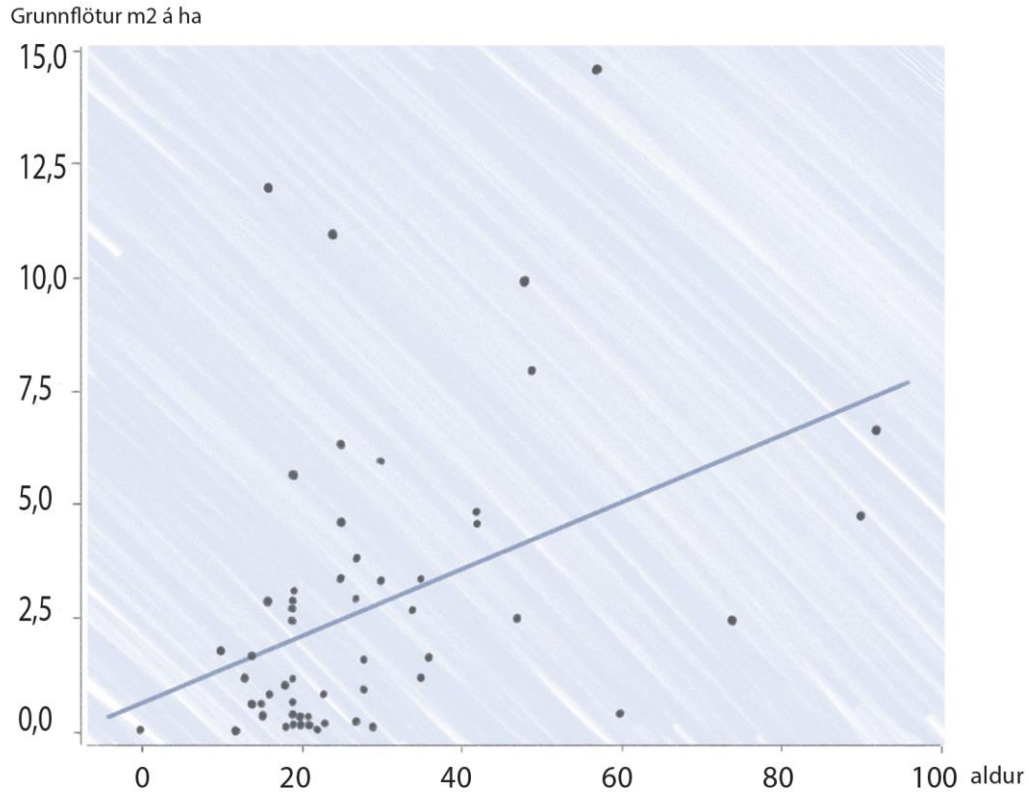
3.8 Hvernig breytist grunnflötur með aldri í birkiskógum

Gögnum úr mæliflötum var slegið saman frá Heiðmörk, Ölfusvatni og Nesjavöllum úr flokkum birkiskóga sem höfðu ekki verið grisjaðir og skoðað samband grunnflatar við aldur trjáa. Í gögnum voru 7 mælifletir úr náttúrulegum birkiskógum og 7 mælifletir með ræktuðum birkiskógum í Heiðmörk. 15 mælifletir úr ræktuðum birkiskógum á Ölfusvatni og 12 mælifletir úr ræktuðum birkiskógum á Nesjavöllum, þá alls 56 mælifletir.

Þegar samband aldurs og grunnflatar var skoðað í öllum mæliflötum í birkiskógum fannst marktækt línulegt samband, sem þó skýrði ekki nema 15% af breytileikanum í grunnfleti (15. mynd; $P = 0.031$; $R^2 = 0.151$):

$$G = 0.7387 + 0.07139 * A \quad (4)$$

þar sem G stendur fyrir grunnflöt, A fyrir aldur í árum. Jafna 4 sýnir að jafnaði jókst grunnflöturinn um 0,07 m² á ha og ári (elsti var 92 ára), en allir mælifletir sem voru eldri en 58 ára falla neðan við aðhvarfslínuna. Það bendir sterklega til mettunar grunnflatar með aldri í birkiskógum, við gildi sem eru mun lægri en barrskógurinn nær á fyrstu 30 árunum eftir gróðursetningu (15 mynd).



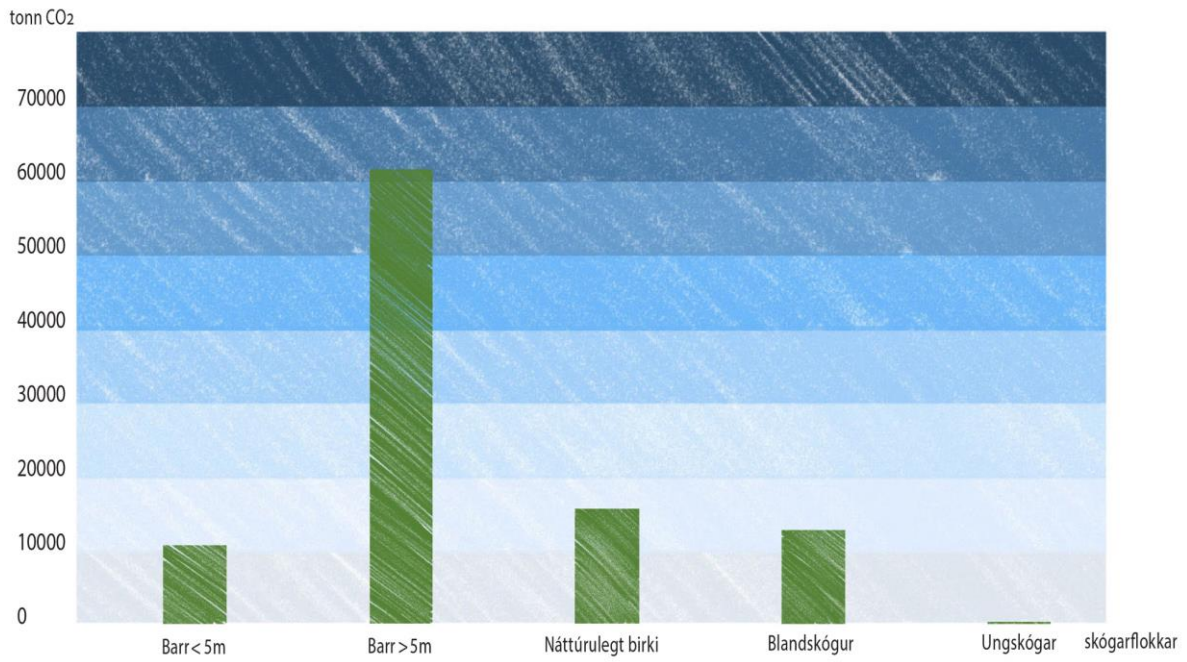
15. mynd. Breytingar á grunnfleti í hnéhæð (BA mælt í m² á ha) með aldri í birkiskógum í Heiðmörk og Ölfusvatni árið 2017. Línan er aðhvarf.

3.9 Heildarmat á kolefnisforða og núverandi árs kolefnisbindingu í lífmassa trjáa

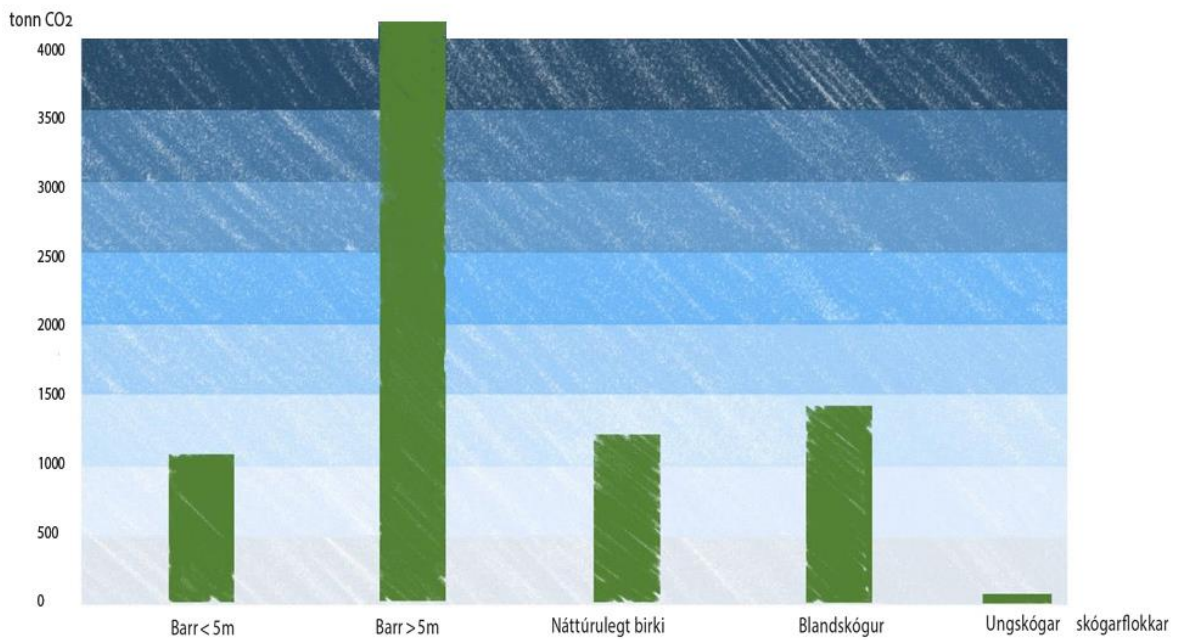
Til að meta hver heildarforði kolefnis var í lífmassa skóganna á jörðunum þremur voru úttektarflétir í hverri skógargerð notaðir, ásamt kortlögðu flatarmáli hvers skógargerðar á hverri jörð (Tafla 4). Breytileikinn milli úttektarflatanna gerir það kleift að reikna vikmörk (skekkjumörk) á matið.

3.9.1 Heiðmörk

Í flokki ungskóga í Heiðmörk fóru ekki fram mælingar, en til þess að varpa ljósi á kolefnisbindingu í þeim flokki var tekið meðaltal nokkurra bindistuðla úr greininni Mælingar á kolefnisbindingu mismuandi skógargerða (Bjarni D. Sigurðsson o.fl., 2008), það var frá 18 ára birki, 14 ára stafafuru og 9 ára sitkagreni, meðaltal þessara bindistuðla reyndist vera 0,67 tonn CO₂ á ha og ári. Gert er ráð fyrir að meðalaldur sé 5 ára vegna þess að þetta voru gróðursetningar síðastliðinna 10 ára.

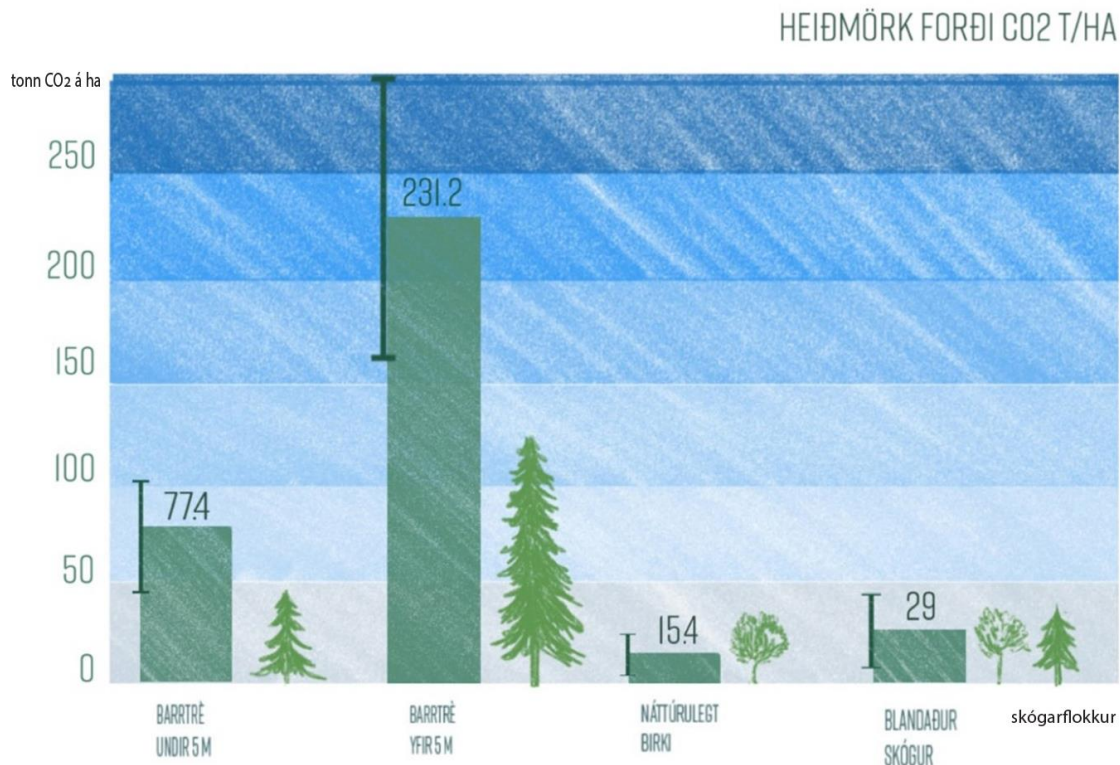


16. mynd. CO₂ bundið í lífmassa í trjám í Heiðmörk haustið 2017 (tonn CO₂). Þetta er heildarmagn í 1960 ha skóga.



17. mynd Núverandi árs CO₂ binding í lífmassa í trjám árið 2017 í Heiðmörk. Myndin sýnir metinn heildar lífmassa flokka í tonnum CO₂.

Mat á kolefnisforða trjágróðurs í Heiðmörk árið 2017 var alls 101.132 ±23.535 tonn CO₂ í lífmassa í skóginum öllum (16. mynd). Þar af höfðu náttúrulegir birkiskógar, blandskógar, barrskógar <5m eða barrskógar >5m bundið 15%, 13%, 11%, 61% af kolefnisforðanum. Meðalaldur þessara skógargerða var 62, 37, 24 og 47 ár (gögn ekki sýnd) og veginn meðalaldur skógarins alls (með flatarmáli hvernarr skógargerðar) var 48 ár.



18. mynd. Áætlað magn CO₂ á ha bundið í lífmassa í mismunandi skógargerðum í Heiðmörk árið 2017. Myndin sýnir lífmassa flokka í tonnum CO₂ á ha með 95% vikmörkum.

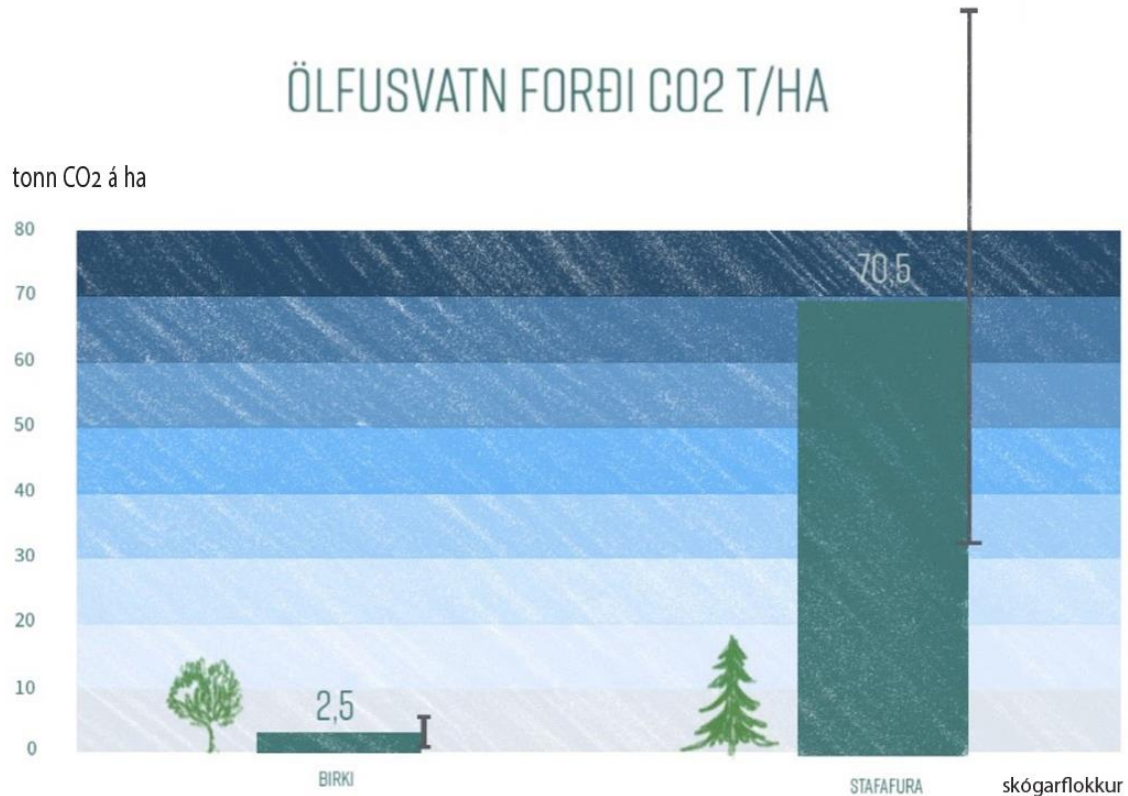
Tafla 11. Helstu niðurstöður kolefnisbindingar skóga í Heiðmörk, þ.e. árleg binding koldíoxíðs, meðal binding koldíoxíðs og viðarmagn skóga. Í töflunni er birt mat ársins 2017 í tonnum á hektara.

Heiðmörk	Barr < 5m	Barr > 5m	Nátt.birki	Blandsk.
Árleg CO ₂ binding t/ha	7,8	15,2	1,2	3,2
95% öryggismörk	2,5	2,2	2,5	2,7
Meðal CO ₂ binding t/ha	3,4	4,7	0,3	0,9
95% öryggismörk	1,4	1,5	0,2	0,4
Rúmmál m ³ /ha	37,4	150,3	4	15
95% öryggismörk	15,3	51,4	1,8	9,2

Skógurinn allur var að binda 7.749 tonn CO₂ (±1742) á hverju ári í lífmassa þegar úttektin átti sér stað (meðaltal fyrir 2012-2017). Það er núverandi árs kolefnisbindihraði alls skógarins. Þetta samsvarar um 4 tonnum CO₂ á hvern ha skógarins alls á ári á tímabilinu 2012-2017.

3.9.2 Ölfusvatn

Á Ölfusvatni var kolefnisforði 24 t CO₂ á hverjum ha skógarins (±12 t) haustið 2017 samkvæmt þessari úttekt (19. mynd). Þar af höfðu barrskógar og ræktaðir birkiskógar bundið 93% og 7% af kolefnisforðanum. Meðalaldur þessara skógargerða var 22 og 17 ár (gögn ekki sýnd) og flatarmálsveginn meðalaldur skógarins alls (með flatarmáli hvernar skógargerðar) var 19 ár.



19. mynd. Áætlað magn CO₂ bundið í lífmassa í skóglendi á Ölfusvatni. Myndin sýnir lífmassa í tonnum CO₂ á ha með 95% vikmörk.

Tafla 12. Helstu niðurstöður kolefnisbindingar skóga á Ölfusvatni, þ.e. árleg binding koldíoxíðs, meðal binding koldíoxíðs og viðarmagn skóga. Í töflunni er birt mat ársins 2017 í tonnum á hektara.

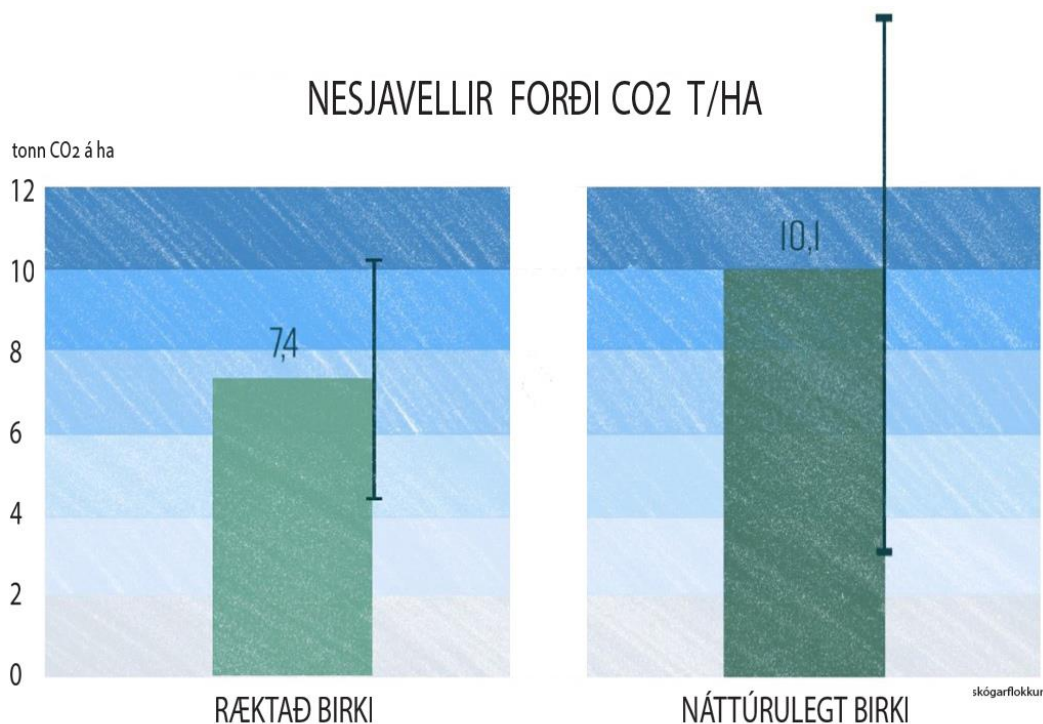
Ölfusvatn	Birki	Stafafura
Árleg CO ₂ binding t/ha á ári	0,4	8,0
95% öryggismörk	0,3	3,7
Meðal CO ₂ binding t/ha á ári	0,2	3,2
95% öryggismörk	0,0	1,5
Rúmmál m ³ /ha	1,0	35,9
95% öryggismörk	0,9	19,8

Heildarmat á kolefnisforða Ölfusvatns árið 2017 var 2585 tonn CO₂ í lífmassa í skóginum öllum (±1290 t CO₂; gögn ekki sýnd). Um þessar mundir (2012-2017.) er skógurinn að binda 300 tonn

CO₂ (±123) á hverju ári í lífmassa skógarins öllum samkvæmt þessari úttekt. Það er núverandi árs kolefnisbindihraði skógarins.

3.9.3 Nesjavellir

Á Nesjavöllum var kolefnisforði 8 t CO₂ á hverjum ha skógarins (±4 t) haustið 2017 samkvæmt þessari úttekt (20. mynd). Þar af höfðu ræktaðir birkiskógar og náttúrulegir birkiskógar bundið 35% og 65% af kolefnisforðanum. Meðalaldur þessara skógargerða var 21 og 23 ár (gögn ekki sýnd) og flatarmálsveginn meðalaldur skógarins alls var 22 ár.



20. mynd. Áætlað magn CO₂ bundið í lífmassa í skóglendi á Nesjavöllum. Myndin sýnir lífmassa flokka í tonnum CO₂ á ha með 95% vikmörk.

Tafla 13. Helstu niðurstöður kolefnisbindingar skóga á Nesjavöllum, þ.e. árleg binding koldíoxíðs, meðal binding koldíoxíðs og viðarmagn skóga. Í töflunni er birt mat ársins 2017 í tonnum á hektara.

Nesjavellir	Ræktað birki	Náttúrulegt birki
Árleg CO ₂ binding	0,6	0,7
95% öryggismörk	0,4	0,7
Meðal CO ₂ binding t/ha á ári	0,3	0,4
95% öryggismörk	0,1	0,1
Rúmmál m ³ /ha	2,8	5,5
95% öryggismörk	1,5	3,5

Heildarmat á kolefnisforða Nesjavalla árið 2017 var 1752 tonn CO₂ í lífmassa í skóginum öllum (±875 t CO₂; gögn ekki sýnd). Um þessar mundir (2012-2017) er skógurinn að binda 148 tonn CO₂ (±74) á hverju ári í lífmassa skógarins öllum samkvæmt þessari úttekt. Það er núverandi árs kolefnisbindihraði skógarins.

3.10 Hverju breytti það að flokka barrskóga í undir 5m og yfir 5m hæð?

Barrskógar í Heiðmörk voru flokkaðir í tvo flokka, annarsvegar undir 5 metra hæð (<5m) og hinsvegar yfir 5 metra hæð (>5m). Umtalsverður munur var á þessum flokkum sökum aldurs þeirra, en skógur þar sem metinn meðalhæð skógarins var 5 metrar hæð eða hærri voru að jafnaði um helmingi eldri en skógur í flokkinum þar sem metinn meðalhæð skógarins var undir 5 metra hæð (Tafla 14). Í undir 5 metra hæðar skógunum voru 15 mælifletir sem allir nema einn voru 30 ára eða yngri, en einn flötur var 37 ára. Í yfir 5 metra hæðar skógunum voru bara 3 af 19 flötum undir 37 ára aldri, en þeir voru 32, 33 og 34 ára gamlir. Aldursskörunin á milli þessara skógarflokka, sem eingöngu byggðu á hæð, var því mjög lítil. Þvermál í brjósthæð barrtrjáa í skógum yfir 5 metra hæð var að meðaltali 12,9 cm en í skógum undir 5 metra hæð var 8,6 cm, eða 67% og marktækt minna (F próf; p = 0.0341; gögn ekki sýnd). Eins var þurrvigt bolviðar í tonnum á ha í yfir 5 metra hæð barrskóginum 62 tonn á ha en bara 17 tonn á ha í undir 5 metra hæðar skógunum (F próf; p = 0.0006). Aðrar mælibreytur fyrir þessa tvo flokka eru sýndar í Töflu 14.

Tafla 14. Samanburður á barrskógarflokkum yfir 5 metra hæð og undir 5 metra hæð í Heiðmörk árið 2017. Aldur er í árum, grunnflötur er m² á ha, yfirhæð var metrar, viðarmagn er m³ á ha, CO₂ lífmassi er í tonnum CO₂ á ha, CO₂ meðalbinding og núverandi árleg binding er í tonnum CO₂ á ha og ári.

Flokkur	barrskógar < 5 m hæð			barrskógar > 5 m hæð			F
	mean	min	max	mean	min	max	
Gildi							
Aldur	24	18	37	47	32	59	<.0001*
Grunnflötur	17,2	2,2	38,9	32,8	4,1	76,9	0.0089*
Yfirhæð	5,6	3,5	7,6	11,2	4,0	16,9	<.0001*
Viðarmagn	37,3	4,2	98,2	150,3	6,9	406,0	0.0006*
Kolefnisforði (CO₂)	77,4	9,3	199,7	231,3	17,1	589,4	0.001*
CO₂ meðalársvöxtur	3,4	0,4	8,3	4,8	0,6	11,1	0,1697
CO₂ núverandi ársvöxtur	7,8	1,5	15,3	15,2	0,2	35,0	0.0092*

Það var marktækur munur milli flokkana fyrir nánast allar breytur (Tafla 14). T.d. var viðarmagn á ha hjá barrtrjám yfir 5 metra hæð marktækt meira en hjá þeim sem voru undir 5 metra hæð.

Lægri barrskógar höfðu að meðaltali fjórðung af viðarmagni yfir 5 metra hæðar flokks. Einungis var ekki marktækur munur fyrir meðalbindingu CO₂, eins og búast mátti við, þar sem sú breyta „leiðréttir“ fyrir muninum á aldri flokkanna. Þegar hinsvegar er horft til núverandi ársbindingar CO₂ (bindihraði árin 2012-2017) þá var munurinn marktækur. Núverandi ársbinding var um helmingi meiri í yfir 5 metra hæðar barrskógunum en þeim sem voru undir 5 metra hæð.

4. Umræður

Meginmarkmiðið í þessu verkefni var að meta kolefnisbindingu í lífmassa náttúrulegra og ræktaðra skóga einstakra skógarjarða á Suðvesturlandi með aðferðum sem mæta ströngustu kröfum (Tier 3) IPCC (IPCC, 2006). Verkefnið snýst um að nýta viðurkennda aðferðafræði fyrir slíkar úttektir og greina niðurstöðurnar á vexti og kolefnisbindingu mismunandi skógagerða og draga lærdóma af þeim.

4.1 Áhrif endurkortlagningar og flokkunar skóglendis

Þegar kolefnisbinding skógar eða heillar skógræktarjarðar er metin þá er nákvæm (endur)kortlagning mikilvæg (Van Laar o.fl., 2007).

Vinnutilgátan var að slík nákvæm endurkortlagning skógarjarðanna myndi leiða til minnkunar á metnum kolefnisforða og kolefnisbindingu, þar sem aukin nákvæmni myndi minnka stærð skógræktarsvæðis á hverri jörð. Niðurstöðurnar í þessu verkefni voru hinsvegar að kortlagt flatarmál skóga jókst í Heiðmörk (+55%) og á Nesjavöllum (+178%) en minnkaði lítillega á Ölfusvatni (-4,4%) (Tafla 6).

Það kom á óvart á Nesjavöllum að flokkur ræktaðra birkiskóga jókst um 18%, en viðbúin var viðbót vegna náttúrulegra birkiskóga. Umtalsverðar breytingar urðu á kortlögðu flatarmáli skógarflokka í Heiðmörk, við endurkortlagningu var einum skógarflokki breytt frá ræktuðu birki í blandskóga. Skógar í þessum flokki eru misjafnir en stór hluti þeirra er ræktað birki, blandað með öðrum tegundum af furu, greni, víði o.sfrv. Það fundust 170 ha sem ekki höfðu verið í fyrri úttekt, en að sama skapi minnkaði flokkur minni barrskóga um tæpan helming (Tafla 6). Mögulegar skýringar á því að það fundust skógar gætu falist í að hluti þessara skóga væru sjálfsáðir og/eða að misbrestur hafi verið á framkvæmdarskráningu á tímabili. Breyting á flatarmáli skóga á Ölfusvatni endurspeglar vinnutilgátu. Þessi rannsókn er því raunverulegt dæmi þar sem áhrif endurkortlagningar geta bæði verið til að minnka eða auka áætlaðan standandi kolefnisforða skógarjarðar.

Flatarmál skóga á Ölfusvatni breyttist lítið við endurkortlagningu, en meðal þéttleiki skóga var talsvert minni en í fyrra mati, sem unnin var úr framkvæmdarskráningu (Ingvi Þorsteinsson, 2007). Í barrskógum var þéttleiki trjáa á ha 1968 og fyrir birki aðeins 1050, en í úttekt frá 2007 (Ingvi Þorsteinsson, 2007) er meðalþéttleiki metinn 2500 tré á ha og ekki hafði farið fram grísjun á svæðinu. Í ræktuðum skógum hér á landi er algengur þéttleiki skóga eftir upphafsafföll

um 2000 tré á ha (Arnór Snorrason og Lárus Heiðarsson, 2021; Jón Hilmar Kristjánsson, 2020). Þéttleiki trjáa á ha sem nemur 1000 tré á ha getur talist fremur lágur, á tíunda áratug síðustu aldar var miðað við að gróðursetja 1600-4600 tré á ha í nytjaskóga eftir aðstæðum og tegundum (Haukur Ragnarsson, 1990; Snorri Sigurðsson, 1990) og mælt með að þéttleiki trjáa á ha í landgræðsluskógum væri ekki meiri en 1000-1600 tré á ha (Ása Aradóttir og Sigurður H. Magnússon, 1992). Algennt er að þéttleiki trjáa á ha sé misjafn, í úttekjum má finna sambærilegan þéttleika á ræktuðu birki (Arnór Snorrason, 2021) og mun minni þéttleika trjáa (Arnór Snorrason og Björn Traustason, 2021; Arnór Snorrason og Lárus Heiðarsson, 2021).

4.2 Áhrif aðferða við skógarúttetir á mat kolefnisforða skógar

Þegar kolefnisforði skógarjarða er metinn með beinni úttekt (Tier 3) þá skiptir máli hvernig mæliflötum er dreift út. Valið stendur á milli tveggja megin aðferða: a) að dreifa öllum flötum með tilviljun á allt skógarsvæðið óháð landgerð eða skógargerð (E. *simple random sampling*), eða b) fyrst flokka skógarsvæðið í ákveðna skógarflokka, leggja svo ákveðinn lágmarksfjölda mæliflata á hverja skógargerð (E. *stratified random sampling*) og meta kolefnisforða hvernar skógargerðar fyrir sig og reikna síðan samtölu eftir hlutfallslegu flatarmáli innan hvernar skógarjarðar. Báðar þessar aðferðir hafa sína kosti og galla. Sumar rannsóknir hafa mælt með flokkun skógarlunda eftir tegundum og aldri (Van Laar o.fl., 2007).

Á Íslandi hefur aðferð a) gjarnan verið beitt við mat á kolefnisforða skóga, t.d. notar ÍSÚ þá aðferðafræði til að meta breytingar á landsvísu (Arnór Snorrason, 2004; Arnór Snorrason o.fl., 2010) henni hefur verið beitt í viðarmagnsspám (Benjamín Davíðsson, 2012; Lárus Heiðarsson o.fl., 2015; Ellert Arnar Marísson, 2020) og henni var einnig beitt í rannsókn á einni skógarjörð á Vesturlandi (Guðmundur Rúnar Vífilsson, 2015).

Helsti gallinn við þessa aðferð er að hún krefst tiltölulega margra útttektaflata til að geta metið kolefnisforða á heilum skógarjörðum með sæmilegri nákvæmni, einkum ef aldursdreifingin í skóginum er ekki jöfn (þá geta fremur sjaldgæfir eldri skógarlundir vegið mjög þungt í heildar kolefnisforða, en ef þeir eru sjaldgæfir þá koma þeir sjaldan eða aldrei inn ef mæliflötum er dreift með hreinni tilviljun).

Í úttekjum Mógilsár á einstökum jörðum í eigu Landsvirkjunar voru flokkaðir skógarflokkar, þá er kortlögðum skógarflokki skipað saman til þess að gera flokkana sem keimlíkasta, en flokkum haldið í lágmarki til þess að takmarka fjölda mæliflata (Arnór Snorrason, o.fl., 2013;

Arnór Snorrason, o.fl., 2017; Arnór Snorrason, o.fl., 2021). Sigríður Júlía notaði þessa aðferð líka í meistararitgerð sinni um vottun kolefniseininga (Sigríður Júlía Brynleifsdóttir, 2011).

Í ritgerð Pic (2009) um kolefnisforða Heiðmerkur þá var aðferð b) beitt, en með mjög mörgum mæliflötum; þ.e. skógurinn flokkaður í mismunandi skógarflokka en fjöldi mæliflata í hverjum skógarflokki var óreglulegur. Hann skrifaði þó í umræðukafla að það þyrfti að yfirfara kortlagningu og flokkun skóga í Heiðmörk til þess að bæta nákvæmni niðurstaðna í rannsókninni. Kortlagning og skipting skógarflokka sem notuð var til grundvallar þeirrar úttektar í Heiðmörk var ekki fullnægjandi eins og komið hefur fram hér.

Í þessu verkefni beitti ég aðferð b) til að gera vinnuna við úttektina fjárhagslega raunhæfa (minnka fjölda mæliflata sem þarf að mæla). Ég mæli því fremur með að þeir sem vinni framtíða úttektir fyrir einkaaðila eða einstaka skóga beiti henni í mælingum til vottunar á kolefnisbindingu slíkra svæða/jarða.

4.3 Aldur trjáa. Áhringjamæling samanborið við framkvæmdarskráningu

Á Ölfusvatni og Nesjavöllum voru til staðar gögn á aldri gróðursetninga úr framkvæmdarskráningu, en aldur í ákveðnum reitum var einnig metinn með áhringjagreiningu í þessu verkefni. Tilgátan sem sett var fram var sú að áhringjaaldur trjáa endurspegladi aldur úr framkvæmdaskráningu gróðursetningar.

Niðurstaðan reyndist vera að áhringjamælingar (teknað í 30-40 cm hæð) sýndu að meðaltali að tré væru 3 árum yngri en aldur þeirra var í framkvæmdarskráningu fyrir Ölfusvatn og Nesjavelli. Að þekkja slíkt meðaltal/skekkju er mikilvægt ef eingöngu liggja fyrir aldursgreiningar skógargerða með áhringjamælingum, eins og raunin var í Heiðmörk. Þetta góða samræmi sýnir einnig að gæði framkvæmdaskráningarinnar voru góð og henni mátti treysta. Ekki fundust aðrar rannsóknir á Íslandi sem borið hafa saman áhringjaaldur í ræktuðum skógum og áætlaðan aldur.

Niðurstöður þessarar rannsóknar eykur trú okkar á að beita megi áhringjagreiningu til að meta aldur skógarlunda/gerða í skógrækt þar sem framkvæmdaskráning er ekki góð.

4.4 Samanburður á vaxtarhraða skóga milli Ölfusvatns, Nesjavalla og Heiðmerkur

Skógarnir vaxa á nálægum stöðum á SV-hluta landsins og er veðurfar svipað milli svæða, ennfremur bentu niðurstöður Owona (2019) til þess að ekki væri afgerandi munur á

jarðvegsskilyrðum á milli þeirra skóga sem hér er fjallað um. Tilgátan var sú að ekki væri marktækur munur í vaxtarhraða milli jarðanna ef tekið væri tillit til skógargerðar og aldurs. Þessi tilgáta var staðfest þegar skógargerðir voru bornar saman innbyrðis (Tafla 7). Þessi niðurstaða gerði mér einnig kleift að sameina gögn úr mæliflötum frá öllum þremur skógarjörðunum þegar leitað var svara við spurningum um mun á milli skógargerða.

4.4.1 Samanburður á vaxtarhraða og kolefnisbindingu mismunandi skógargerða í lífmassa

Nokkar tilgátur voru settar fram í upphafi um vaxtarhraða og kolefnisbindingu mismunandi skógargerða; ein var að vöxtur, viðarforði og kolefnisbinding í lífmassa í barrskógi væri meiri en í birkiskógi á sama aldri. Sú tilgáta reyndist standast þar sem marktækur munur var á viðarvexti, kolefnisforða og bindingu barrskóga og birkiskóga. Þar voru í öllum tilfellum barrskógar með meiri framleiðni en birkiskógar, eða 13, 17 og 15 sinnum meiri (Tafla 9). Þessi niðurstaða rímar einnig við niðurstöður Juliu Bos o.fl. (2022) sem fundu að birkiskógar bundu 4 sinnum minna kolefni samanborið við lerkiskóga á Fljótsdalshéraði, þó að þeir hefðu hlutfallslega meiri kolefnisbindingu neðanjarðar en lerkiskógar (hærra hlutfall af minna magni). Fleiri íslenskar rannsóknir hafa fundið að viðarvöxtur, standandi lífmassi og kolefnisbinding birkiskóga sé minni en í gróðursettum barrskógum; svo sem (Ásrún Elmarsdóttir o.fl., 2007; Ragnhildur Sigurðardóttir, 2000; Bjarni Diðrik Sigurðsson o.fl., 2008).

Þar að auki hefur gróskustig (frjósemi) á hverjum stað talsverð áhrif t.a.m. bindur birki í besta gróskuflokk helmingi minna en stafafura í meðalgróskuflokki fyrstu 59 árin eftir gróðursetningu (Arnór Snorrason og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir, 2018). Miklu máli skiptir því að nota rétta tegund á réttum stað (þ.e.a.s. í réttum gróskuflokki) til þess að auka kolefnisbindingu.

Nýlega var gerð rannsókn sem sýndi meiri kolefnisbindingu gróðursettra ungsjóga af birki en af sitkagreni. Þetta var M.S. ritgerð Jóns Hilmars Kristjánssonar (2020) frá LBHÍ sem bar saman ræktaða ungsjóga birkis, sitkagrenis og alaskaaspar í Gunnarsholti og fékk út að birkið þar hafði bundið jafn mikið kolefni og öspin á fyrstu 15 árunum og mun meira en grenið, vegna hærri lifunar og meiri upphafspétteika birkisins. Þarna er það þéttleiki skógargerðanna sem skýrir muninn í upphafi, en um leið og skógurinn eldist og tegundirnar fylla upp í vaxtarrými sitt þá fer skuggþol og vaxtargeta að skipta meira máli en upphafspétteiki (Jón Hilmar Kristjánsson 2020).

Tilgáta var jafnframt sett fram um hámarks standandi viðarforði birkiskóga væri minni en hjá barrskógum. Það reyndist vera marktækt minni standandi viðarforði í birkiskógum þegar þeir voru bornir saman við barrskóga á svipuðum aldri (Tafla 9). En það kom ekki á óvart þar sem birki er ljóselsk tegund (Bjarni D. Sigurðsson o.fl., 2005) sem byggir ekki upp mikinn kolefnisforða í lífmassa samanborið við skuggþolnari tegundir barrviða (Uri o.fl., 2017; Hytönen og Aro, 2012; Black o.fl., 2009).

Munurinn á vaxtar- og bindigetu birki- og barrskóga jókst frekar en minnkaði á fyrstu 50 árum ræktunarlotunnar (Tafla 9). Það virðist því ekki vera aldur skógargerðanna heldur vaxtargeta þeirra sem skýrir þennan mikla mun á kolefnisbindingu í ungskógum.

Þekking á bindihraða mismunandi trjátegunna í skógarlundum eftir því á hvaða aldurs skeiði þær eru getur þjónað vel í verkfærakistu þess sem leitast við að fá sem mesta kolefnisbindingu á hverjum tíma í sínum skógi. Það eru t.d. frumherja tegundir sem þrífast betur við erfið skilyrði eða fyrstu gróðursetningu eins og t.d. stafafura og rússalerki. Þær hefja fljótlega vöxt og geta búið í haginn fyrir aðrar tegundir sem geta síðan orðið enn stærri, eins og sitkagreni.

Munur á kolefnisforða og kolefnisbindingu skóga getur verið mikill eftir tegundum, aldri og þéttleika (Þorbergur Hjalti Jónsson, 2004).

Önnur tilgáta var sú að vöxtur og kolefnisbinding í lífmassa í gróðursettum birkiskógi væri sambærileg náttúrulegum birkiskógi á sama aldri. Skýrasta dæmið um þetta í rannsókninni fólst í samanburði á ræktuðum og náttúrulegum birkiskógi á Nesjavöllum, en þar var ekki marktækur munur á þessum skógargerðum sem voru á mjög svipuðum aldri. Þó að ræktaða (Bæjarstaðar) birkið yxi hraðar í upphafi þá voru gróðursettu birkiskógarnir ekki eins þéttir og þeir sjálfsánu, og það vóg upp þennan mun í vaxtarhraða ungskóganna þegar forðinn var metinn á stærra samfelldara svæði. Þessa niðurstöður minna því á M.S. ritgerð Jóns Hilmars Kristjánssonar (2020) frá LBHÍ þar sem þéttleiki skipti meira máli en vaxtarhraði í upphafi; þ.e. svipuð upphafs kolefnisbinding birkis og aspar í Gunnarsholti vegna meiri upphafsþéttleika (minni affalla) birkisins. Það má spyrja sig hvort niðurstaðan yrði sú sama ef úttektin væri endurtekin eftir 20-30 ár þegar ræktaði birkiskógurinn hefur fyllt upp í vaxtarrými sitt og sjálfgrísjun hefur hafist? Mun þá hávaxnara bæjarstaðarbirkið enn hafa álíka mikinn lífmassa (kolefnisforða) og lágvaxnara og þéttara heimkvæmið á Nesjavöllum?

Ein tilgátan var sú að hlaupandi vöxtur væri enn hærri en meðalvöxtur í öllum skógargerðum þar sem hann var metinn. Ef það væri raunin, þá mun meðalbindihraði halda áfram að aukast á næstu áratugum á þessum skógarjörðum, þar sem það er þekkt að meðalvöxtur og viðarmagn

(kolefnisforði) eykst í samfelldum skógum þar til núverandi ársvöxtur verður lægri en meðalársvöxtur (Philip, 1994) Einnig er það vel þekkt að almennt hafa skógar bara náð um 2/3 af hámarks standandi lífmassa/kolefnisforða þegar núverandi ársvöxtur verður jafn meðalársvexti. Þannig að skógar halda áfram að binda meira kolefni í lífmassa í langan tíma eftir að þeim punkti er náð, þó að það dragi þá smám saman úr árlegri bindingu (Cannell og Milne 1995).

Það var áhugavert að sjá að núverandi ársbinding í barrskóginum hafði farið úr því að vera um 140% hærri en meðalársbindingin við 21 ára aldur í að vera 220% hærri við 52 ára aldur. Þetta gefur til kynna að enn sé mjög langt í að það fari að hægja á bindingu í barrskógunum. Það sama má segja um birkiskóginn, þar sem núverandi ársbinding var um 250% hærri en meðalársbinding (Tafla 9).

Það reyndist vera marktækt hærri núverandi ársvöxtur í öllum skógargerðum, bæði ræktuðum skógum og sjálfsánum birkiskógum (Tafla 7). Þetta eru góðar fréttir fyrir eigendur þessara skóga og búast má við að loftslagsáhrif þeirra munu því halda áfram að aukast á næsta áratug/áratugum.

4.4.2 Besta mat og skekkjumörk á standandi viðar- og kolefnisforða í lífmassa

Heiðmerkur.

Heiðmörk var eina skógarjörðin þar sem hægt var að bera niðurstöðurnar saman við eldri úttekt. Við samanburð á fyrri rannsókn í Heiðmörk (Pic, 2009) þá var sett fram tilgáta um að viðarmagn, kolefnisforði og núverandi árleg kolefnisbinding Heiðmerkur myndi hafa aukist um meir en 50% frá fyrra mati Pic (2009) frá árinu 2007. Sú tilgáta stóðst þar sem viðarmagn og kolefnisforði Heiðmerkur var metinn 383% og 360% hærri en í verkefni Pic (Tafla 15).

Fyrri kortlagningar af svæðum voru notaðar til að endurskoða og flokka skóga í keimlíka flokka. Í ritgerð um mat á kolefnisbindingu í Heiðmörk 2007 (Pic, 2009) þá nefnir höfundur að það hefði haft slæm áhrif á þá rannsókn að endurskoða ekki eldri kortlagningu (Einar Gunnarson, 2003), en allar kortlagningar voru endurskoðaðar í minni rannsókn. Þá breyttist til að mynda flatarmál mismunandi skógarflokka í Heiðmörk, en það hafði umtalsverð áhrif á niðurstöður.

Þar sem notast var við mælifleti úr fyrra mati á kolefnisbindingu (Pic, 2009) sem var tíu ára þegar þeir voru endurmældir, þá var endurskoðuð flokkun skóga. Skógar voru flokkaðir í

náttúrulegan birkiskóg, blandskóg (áður ræktað birki), barrskógar undir fimm metra hæð (áður barrskógarlundir undir 3 metra hæð) og barrskógar yfir fimm metra hæð (áður barrskógar yfir þriggja metra hæð). Breytingar á flokkum skóga helgast af því annars vegar hversu mikill hæðarvöxtur var í barrskógarflokkum síðastliðin áratug, því var notast við fimm metra í stað þriggja metra. Hinsvegar var skógarflokkurinn sem nefndur var ræktaðir birkiskógar illa skilgreindur (Pic, 2009) þar sem umræddir skógar voru gjarnan blanda af gróðursettu birki og öðrum tegundum eins og t.d. víði, furu og greni. Því breyttist sá flokkur talsvert við endurkortlagningu og tók einnig nokkuð svæði af flokki barrskóga undir 5 metra hæð. Bætt var við kortlagningu flokk yngri gróðursetninga, það stóð ekki til að gera úttekt á honum en það átti að vera framlag til bættrar kortlagningar Heiðmerkur. Þessi kortlagning skilaði ekki tilætluðum árangri vegna þess að framkvæmdarskráning árána 2007-2012 fannst ekki og ljóst er að þessi flokkur er þegar orðin úreltur vegna gróðursetninga eftir 2017 og þarfnast endurskoðunar fyrir næstu úttekt.

Niðurstöður þessarar rannsóknar eru bornar saman niðurstöður Pic (2009) í Töflu 15. og umtalsverð aukning hafði átt sér stað síðstliðin áratug. En samkvæmt þessum samanburði við mat Pic frá 2007 var 2% af kolefnisforða náttúrulegra birkiskóga samanborið við niðurstöður þessa verkefnis árið 2017. Sama saga er með hina flokkana eins og blandskóga 5%, barr undir 3 metra hæð var 37%, barr yfir 3 metra hæð var 27% og heildarmat forða 2008 var einungis 21% af þessu mati frá 2017.

Tafla 15. Samanburður við niðurstöður úr fyrri úttekt (Pic, 2009) á skógum í Heiðmörk sem fór fram árið 2007 við niðurstöður úr þessari úttekt. Einingar eru heildarlífmassi trjáa í tonnum á ha.

Flokkur	2003	2007	2012	2017
Náttúrulegt birki	0,1	0,2	5,2	8,4
Lauf/blandskógar	0,3	1,0	7,2	15,8
Barr<3/<5 hæð	1,9	8,0	20,9	42,2
Barr>3/>5 hæð	19,8	39,4	84,4	126,0

Það atriði sem vó þyngst í þeim mun sem er á áætlaðri heildarbindingu skógarflokka var munur á kortlögðu flatarmáli hvers skógarflokks (Tafla 5). Við endurkortlagningu breyttist flatarmál allra flokka og jókst heildarflatarmál skógar um 55%, þar juku náttúrulegt birki og blandskógar mikið við flatarmál sitt á meðan barrskógar undir 5 metrum minnkuðu um helming og barrskógar yfir 5 metra hæð jók minna við sig eða um 18%.

4.4.3 Besta mat og skekkjumörk á meðal árs vexti lífmassa Heiðmerkur

Niðurstöðurnar í þessari rannsókn sýndu að lífmassi hvers skógarflokks hafði aukist með tímanum í Heiðmörk (Tafla 15). Þegar skoðaður er munur á rúmmáli skógarflokka milli árána 2007-2017 þá var rúmmál í blandskógum metið 0,8 m³ á ha árið 2007 en árið 2017 var það metið 15 m³ á ha, fyrir barrskóga undir 5 metra hæð hafði rúmmál aukist úr 7,5 m³ á ha 2007 en 37,4 m³ á ha 2017 og rúmmál í barrskógum yfir 5 metra hæð var metið 44 m³ á ha 2007 en hafði aukist í um 150 m³ á ha 2017. Tilgátan var studd; þ.e. hraði kolefnisbindingar jókst meira en 50% milli þessarra tveggja úttekta.

Miðað við niðurstöður þessarar rannsóknar þá má búast við því að meðalársbinding skóga í Heiðmörk muni halda áfram að aukast. Það voru ekki vísbendingar um mettun á grunnfleti sem hefur aukist um 0,8 m² á ha og ári frá gróðursetningu í barrskógum fyrstu 55 árin (14. mynd). Þá var yngsti aldursflokkur ræktaðra skóga ekki inn í þessari úttekt og þar að auki eru nokkrir tugir þúsunda skógarplantna gróðursettar í Heiðmörk á hverju ári.

Að meðaltali yfir öll svæði, skógargerðir og aldur reita þá höfðu skógarnir um 12% meiri kolefnisforða í jarðvegi árið 2017 miðað við skóglausu samanburðarsvæðin, en aukning var einkum í efsta lagi jarðvegsins (0-10 cm). Magn feyru, C-forði hennar og þykkt jukust að jafnaði í kjölfar nýskógræktarinnar en það dró úr magni C-forða botngróðurs (Owana, 2019).

Áhrif skógarumhirðu á vöxt skóga geta verið talsverð, ef grisjun er mikil á ákveðnu árabili þá getur það haft neikvæð áhrif á meðalvöxt í ákveðnum skógargerðum/aldursbilum. Þetta kom m.a. fram í rannsókn á lerkiskógum á Fljótsdalshéraði (Julia Bos o.fl., 2022). Hinsvegar verða ekki neikvæð áhrif af slíkri skógarumhirðu á heilum skógarjörðum nema að mjög mikið sé fellt af skógi (meira en nemur árlegum vexti allra skógarlunda á heilli jörð). Ekki hefur verið tekið saman hversu stór hluti Heiðmerkur hefur verið grisjaður, en að jafnaði síðastliðin áratug hafa verið grisjaðir 3-7 ha af barrskógi á ári hverju (Helgi Gíslason, munnleg heimild, 3. Október 2019).

4.4.4 Besta mat á standandi kolefnisforða í lífmassa Ölfusvatns og Nesjavalla

Í fyrri úttekt á kolefnisbindingu í Grafningi þá var miðað við að árleg meðalbinding skóga sé 4,4 tonn af CO₂ á ha að jafnaði (Ingvi Þorsteinsson, 2007). Þetta var meðaltal sem Bjarni Diðrik Sigurðsson og Arnór Snorrason (2000) settu fyrst fram sem mjög grófa nálgun að bindihraða, óháð skógargerð og vaxtaráðstæðum.

Hvernig kom þessi grófa nálgun út miðað við raunúttekt á kolefnisbindingu?

4.4.4.1 Ölfusvatn

Mælingar á Ölfusvatni sýndu að meðaltali að 22 ára barrskógur var að binda 27% minna á ha en Ingvi Þorsteinsson (2007) gaf sér, eða 3,2 tonn CO₂ á ha árlega. Forsendur Ingva leiddu því til 38% ofmats. Munurinn varð mjög mikill þegar litið var til gróðursetta birkiskógarins á Ölfusvatni, þegar 4,4 t CO₂/ha/ári stuðullinn var notaður fyrir hann leiddi það til 22 sinnum (2200%) ofáætlunnar á raunverulegri kolefnisbindingu. Birkiskógurinn var að meðaltali 17 ára og var var að binda 0,2 tonn CO₂ á ha árlega. Þetta sýnir glögglega hversu mikilvægt er að skógareigendur noti raunverulega úttekt þegar þeir áætla kolefnisbindingu skóga sinna ef hún á að endurspeгла raunveruleikann.

Gjarnan þegar verið er að meta kolefnisbindingu skóglenda, þá er tekið landsmeðaltal af vexti yfir ákveðna vaxtarlotu eins og t.d. 70 ár eða 90 ár. Þá er hafa bindistuðlar verið notaðir sem gerðir hafa verið fyrir landsmeðaltal skóga af ákveðinni tegund eða gerð. (Þannig metur Kolviður t.a.m. árlega meðalbindingu ræktaðra skóga á Íslandi vera 7,2 tonn af CO₂ á ha (Kolviður, 2021).

Athygli vekur að birki á Ölfusvatni var að binda minna en birkiflokkarnir á Nesjavöllum (Tafla 7.). En þar er örugglega aðallega áhrif þess að aðeins eru að meðaltali 1050 tré á ha þar miðað við 2856 og 7693 tré á Nesjavöllum í ræktuðum og náttúrulegum birkiskógum (Tafla 7.). Minni þéttleiki gæti átt rætur sínar að rekja til upphafspéttleika við gróðursetningu, en hann hafði átt að vera 2500 tré/ha eins og áður sagði. Það gæti því bent til að afföll hafi verið meiri á Ölfusvatni en Nesjavöllum, en birki í þessum skógum var ungt og skýrir það lágan vaxtarhraða. Það vakti einnig athygli við mælingar að takmörkuð gróska var í birki á þessum stað, sérstaklega á flatlendi. Kolefnisbinding birkiskóga er misjöfn, á Ölfusvatni var hún í minna lagi samanborið við gróskumeiri og þéttari skóga (Arnór Snorrason og Björn Traustason, 2021), en svipuð og hún hefur verið metinn í gisnum birkiskógum með sambærilegan þéttleika (Arnór Snorrason, 2021).

Það var munur á svæðinu sem birki óx í samanborið við stafafuru, þar sem forði og vöxtur í furunni var margfaldur (Tafla 12). Það væri því hægt að gróðursetja stafafuru í gisna birkiskóga á Ölfusvatni til þess að auka kolefnisbindingu. Barrskógar á Ölfusvatni eru í góðum vexti og munu bæta umtalsvert við sig á komandi árum.

4.4.4.2 Nesjavellir samanburður við fyrri úttekt

Í fyrri úttekt á Nesjavöllum var áætluð árleg bindigeta fyrir ræktaða skóga 4,4 tonn af CO₂ á ha, þá var áætlað að flatarmál skógar væri 78 ha, en við endurkortlagningu þá var stærð ræktaðra birkiskóga metin 92 ha, þar að auki bætist við binding í náttúrulegum skógum.

Í ræktuðum birkiskógum var meðalþéttleiki trjáa 2007 áætlaður 2545 tré á ha en reyndist vera að meðaltali 2850 tré á ha. Flokkurinn ræktað birki jókst því í flatarmáli og þéttleika frá fyrra mati. Þessi þéttleiki er álíka mikill miðað við aðrar úttektir á ræktuðum birkiskógum (Jón Hilmar Kristjánsson, 2020; Arnór Snorrason og Lárus Heiðarsson, 2021).

Frá gróðursetningu fyrir 21 ári þá hafa að meðaltali bæst við 0,3 tonn af CO₂ á ha á ári, en meðaltal síðastliðin 5 ár hafa verið 0,9 tonn á ha (12% aukning á ári) og hefur bætt við lífmassa sinn um 60% af heild á sama tímabili. Meðal forði CO₂ sem bundist hafði var 7,4 tonn á ha á svæði sem var 92 ha. En í náttúrulegum skógi var meðal forði CO₂ 10,1 tonn á ha á svæði sem var 126 ha.

4.5 Aðferðaleg álitaefni

Aðferðir sem notaðar voru til skógarúttektar í þessari rannsókn byggja á traustum grunni (Van Laar o.fl., 2007) og eru áreiðanlegar fyrir skógarjarðir til að votta kolefnisbindingu í lífmassa. Eftir á að hyggja voru atriði sem hefði mátt gera öðruvísi, það hefði verið ákjósanlegt að bæta við mæliflötum í Heiðmörk í skógarflokka sem höfðu bætt við sig talsverðu flatarmáli frá fyrri úttekt og að leggja út mælifleti í ungskóga sem höfðu verið gróðursettir síðan síðasta úttekt fór fram.

4.6 Kolefnisbinding í lífmassa vs. kolefnisbinding vistkerfis

Þessi ritgerð tekur eingöngu til kolefnisbindingar í lífmassa trjáa í skógi, en ekki til annarra kolefnisforða skógarins. Samkvæmt IPCC (2014) þá þurfa kolefnisúttektir að sýna fram á breytingar í eftirfarandi kolefnisforðum: i) lífmassa lifandi trjáa, dauðum trjám, botngróðri, feyru (e; litter) og í jarðvegi.

Í öðru MS verkefni (Owona 2019) voru allir þessir forðar teknir út á hluta af sömu mæliflötum og voru notaðir í þessari rannsókn.

Megin niðurstöður Owona voru að í skógunum var 12% meiri kolefnisforði í jarðvegi miðað við skóglausu samanburðarsvæðin og átti aukning sér einkum stað í efstu 10 cm jarðvegsins.

Þykkt feyru og kolefnisforði jókst með nýskógrækt en botngróður minnkaði og kolefniforði þess einnig. Lítil breyting varð að jafnaði á rúmþyngd, sýrustigi og C/N hlutfalli jarðvegs eftir nýskógrækt (Owona, 2019).

Það var að jafnaði meiri kolefnisforði í efstu 30 cm undir barrskógum en birkiskógum, en munurinn var meiri í feyrulaginu þar sem barrskógar höfðu 92% meiri C-forða en birkiskógar. Botngróður minnkaði undir barrskógum en breyttist ekki marktækt í birkiskógum, en kolefnisforði botngróðurs var langminnstur af þessum forðum og hafði varla teljandi áhrif á kolefnisjöfnuð í vistkerfinu (Owona, 2019).

Þetta sýnir að umtalsvert meira kolefni er bundið og binst árlega í trjám, jarðvegi og feyru á þessum jörðum miðað við skóglaus samanburðarsvæði.

Í ritgerð Owona (2019) vantaði einn forða, það var dauður viður (*E. Course Woody Debris*). En það skiptir litlu þar sem það var varla til staðar í skógunum vegna þess að skógarnir voru það ungir að lítið hefur fallið til af bolum og greinum á skógarbotn sem telst til þess forða. Þetta er forði sem á eftir að hafa meiri áhrif eftir því sem skógarnir eldast.

5. Ályktanir

Flokkun skóga (stratification) og gæði kortlagningar skiptir afar miklu máli við úttekt á kolefnisbindingu skóga. Þessi atriði hafa afgerandi áhrif á niðurstöður og áreiðanleika skógarúttektar af þessu tagi. Hvert lágmarksmagn mæliflata í skógarflokki þarf að vera, fer að mestu eftir hversu breytilegur vöxturinn er innan skógarflokkanna. Einnig getur stærð mæliflata haft áhrif ef svokallaður mikróbreytileiki vaxtar er mikill.

Mikilvægt er að velja þá þætti sem notaðir eru til þess að flokka skóga af kostgæfni. Með því að notast við flokkað slembival þá má fækka mæliflötum sem þarf að taka út í skógi og því til mikils að vinna að flokkar séu raunverulega ólíkir hvor öðrum. Jafnframt þá hefur flokkun áhrif á næstu skógarúttekt sem fer fram í skóginum, en ef kortlagning og flokkun skógar er ekki vönduð í fyrstu úttekt, þá getur það haft neikvæð áhrif á aðra úttekt sérstaklega þegar kemur að samanburði á milli úttekta.

Hvorki birki- né barrskógar sýndu nein skýr merki um að núverandi árs kolefnisbinding væri tekinn að minnka á fyrstu 6 áratugum skógarframvindunnar. Það verður áhugavert að sjá hvernig árleg kolefnisbinding muni þróast með auknum aldri skóga á Íslandi og við hvaða aldur fer að draga úr vexti svo núverandi ársvöxtur verður jafn meðalvexti eða minni.

Náttúrulegir birkiskógar eru gjarnan ólíkir ræktuðum skógum þegar þegar litið er til þéttleika stofna og massa hvers stofns. Munur getur legið í gróskustigi og mögulega þarf að taka undirlag birkiskóga sterkar til greina við flokkun skóga. En þó ræktaðir og náttúrulegir birkiskógar séu ólíkir, þá þarf það að ekki að þýða að vöxtur og kolefnisbinding sé marktækt ólík.

Vöxtur barrtrjáa í Heiðmörk tekur stökk milli skógarflokkanna undir og yfir fimm metra hæð. Skógar í flokknum undir 5 metra voru gróðursettir fyrir um aldarfjórðung samanborið yfir fimm metra sem var helmingi eldri. Þá var núverandi ársvöxtur yngri skógarflokksins að binda um 35% af því sem eldri flokkurinn batt árlega. Einnig þá var viðarmagn á ha í yngri flokknum aðeins fjórðungur að því sem hafði bundist í eldri barrskógarflokki. Það sýnir hvernig binding var ólík á mismunandi aldri ef horft er á núverandi ársvöxt.

Geta ólíkra skógargerða til vaxtar og kolefnisbindingar er augljóslega ólík, bæði eftir tegundum en einnig eftir aldri skóga og sögu landnýtingar. Mikilvægt er að átta sig á því hvaða þættir í skógum lýsa best þessum mun á sem bestan máta. Fyrirfram hefði ég t.d. talið að meiri munur væri á ræktuðum og náttúrulegum birkiskógum en rauninn var. Ef athugaður er þéttleiki stofna á ha þá var munurinn mikill, en munur á núverandi ársvexti var ekki marktækt ólíkur, jafnvel

Þrátt fyrir talsverðan aldursmun. Meðalbinding í birkiskógi reyndist ekki breytast þegar skoðaður var munur milli aldursflokka, sem kom á óvart. Ef til vill er það vegna meiri sjálfgrísjunar í birkiskógum en barrskógum sem gæti stuðlað að óbreyttri meðalbindingu til lengri tíma, þrátt fyrir að mælingar á núverandi ársbindingu sýni aukna bindingu á ákveðnu tímabili.

Samanburður á aldri trjáa eftir framkvæmdarskráningu samanborið við árh-ringjagreiðningu sýndi að það væri ákjósanlegt að bæta 3 árum við aldur trjáa ef þau hafa verið aldursgreind með árh-ringjagreiðningu, en það hefur áhrif á árh-ringjasýnið að það er tekið aðeins ofan við rótarháls.

Niðurstöður sýndu að ekki væri afgerandi munur milli svæða með tilliti til skógargerða, aldurs eða jarðvegs- og veðurfarsskilyrða í þessum skógum. Með því að sameina gögn milli svæða og skoða eftir tegund og aldri þá sást að flokkar fylgdu sama mynstri. Það styrkir tiltrú mína að þessi þekkta nálgun við skógarúttektir sem hefur hér verið til umfjöllunar þjóni vel við að varpa ljósi á skóga og kolefnisbindingu þeirra.

6. Heimildaskrá

- Arnór Snorrason. (1997). Áætluð koldíoxíðsbindingeta skógræktar á Íslandi. *Rit mógilsár* Rannsóknastöð Skógræktar ríkisins.
- Arnór Snorrason. (2021). Úttekt á kolefnisbindingu skógræktar á svæðum Kolviðar á Hofssandi við Stóra-Hof á Rangárvöllum. *Rit Mógilsár*, 43/2021.
- Arnór Snorrason. (2010). National Forest Inventories reports: Iceland. *National Forest Inventories – Pathways for common reporting*. Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R. E., Springer. 277-289.
- Arnór Snorrason. (23.3.2017). *Landskógauðttekt*. Fagráðstefna Skógræktar 2017, Harpa í Reykjavík. (<https://www.skogur.is/static/files/fagradstefna-skograektar-2017/Arnor-Snorrason.pdf>).
- Arnór Snorrason, Bjarni D. Sigurdsson, Grétar Guðbergsson, Kristín Svavarsdóttir, and Þorbergur Hjalti Jónsson. (2002). Carbon sequestration in forest plantations in Iceland, *Icelandic Agricultural Sciences*, 15, 81-93.
- Arnór Snorrason, Bjarki Þór Kjartansson.(2004). Íslensk skógarúttekt. *Skógræktarritið*, 2004(2), 101-108.
- Arnór Snorrason, Björn Traustason (2021). Úttekt á kolefnisbindingu skóglendis á Drumboddstöðum II í Biskupstungum. *Rit Mógilsár*, 42/2021.
- Arnór Snorrason, Björn Traustason. (2013). Úttekt á kolefnisbindingu skógræktar á svæðum í eigu Landsvirkunar. *Rit Mógilsár*, 29/2013.
- Arnór Snorrason, Björn Traustason og Bjarki Þór Kjartansson. (2017). Önnur úttekt á kolefnisbindingu skógræktar á vegum Landsvirkjunar. Landsvirkjun. LV-2017-040.
- Arnór Snorrason, Lárus Heiðarsson. (2021). Inventory of Carbon stock changes at Óseyri afforestation area in Stöðvarfjörður, East-Iceland. *Rit Mógilsár Nr 41/2021*.
- Arnór Snorrason, Sigríður Júlía Brynleifsdóttir (2018). Áhrif fjórföldunar nýskógræktar á Íslandi. *Skógræktarritið(1)*, 36-47.
- Arnór Snorrason og Stefán Freyr Einarsson (2006). Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry. *Icelandic Agricultural Sciences*, 19, 15-24.
- Arnór Snorrason, Þorbergur Hjalti Jónsson, Kristín Svavarsdóttir, Grétar Guðbergsson & Tumi Traustason (2000). Rannsóknir á kolefnisbindingu ræktaðra skóga á Íslandi. *Ársrit Skógræktarfélags Íslands(1)*, 71-89.
- Ása L. Aradóttir, Kristín Svavarsdóttir, Þorbergur Hjalti Jónsson og Grétar Guðbergsson. (2000). Carbon accumulation in vegetation of degraded areas. *Icelandic Agricultural Sciences*, 13, 99-113.
- Ása L. Aradóttir, Sigurður H. Magnússon. (1992). Ræktun Landgræðsluskóga 1990, árangur gróðursetninga. *Skógræktarritið 1992*. Skógræktarfélag Íslands. Bls. 58-69.
- Ásrún Elmarsdóttir, Bjarni D. Sigurdsson, Bjarni E. Guðleifsson, Borgþór Magnússon, Edda S. Oddsdóttir, Erling Ólafsson, Guðríður Gyða Eyjólfsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jón Á. Jónsson, Kristinn H. Skarphéðinsson, María Ingimarsdóttir og Ólafur K. Nielsen. (2007). ICEWOODS: Age-related dynamics in biodiversity and carbon cycling of Icelandic Woodlands. Experimental design and site descriptions. *Effect of afforestation on ecosystems*,

landscape and rural development, Proceedings of the AFFORNORD conference, Reykholt, Ísland, Júní 18-22, 2005, 147-151.

- Baritz, R., Seufert, G., Montanarella, L., & Van Ranst, E. (2010). Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest Ecology and Management, 260(3), 262–277.*
- Bárcena, Teresa G., Lars, P.K., Vesterdal, L., Helena Marta Stefánsdóttir, Gundersen, P. og Bjarni D. Sigurdsson. (2014). Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis, *Global Change Biology, 20: 2938-2952.*
- Booth, B.B.B., Jones C.D., Collins, M., Totterdel, Ian. J., Cox, P.M., Sitch, S., Huntingford, C., Betts, R.A., Harris, G.R., Lloy, J. (2012). High sensitivity of future global warming to land carbon cycle processes. *Environmental Research Letters, 7(2)2.*
- Benjamín Davíðsson. (2012). The present and future resource situation in larch (*Larix sukeczewii*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) stands in eyjafjörður, northern Iceland. (M.Sc. ritgerð), Norwegian University of Life Sciences, Ås:Norway.
- Bjarni Diðrik Sigurðsson. (2014). The impact of afforestation in Iceland on soil and biomass C stocks. in Guðmundur Halldórsson, Bampa, F., Anna Björk Þorsteinsdóttir, Bjarni D. Sigurdsson, Montanarella L., and Andrés Arnalds. *JRC Science and Policy Reports. Soil carbon sequestration for climate, food security and ecosystem services* (European Commission: Ispra, Italy)
- Bjarni Diðrik Sigurðsson, Arnór Snorrason. (2000). Carbon sequestration by afforestation and revegetation as a means of limiting net-CO₂ emissions in Iceland, *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment, 4, 303-07.*
- Bjarni Diðrik Sigurðsson (2001). *Environmental control of carbon uptake and growth in a Populus trichocarpa plantation in Iceland.* Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 174.
- Bjarni Diðrik Sigurðsson, Ásrún Elmarsdóttir, Brynhildur Bjarnadóttir, and Borgþór Magnússon. (2008). Mælingar á kolefnisbindingu mismunandi skógargerða. *Rit Fræðafings landbúnaðarins, 5, 301-09.*
- Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon. (2019). Kolefnishringrás Íslands. *Rit Mógilsár Nr. 37/2019. 17-24.*
- Bjarni Diðrik Sigurðsson, Borgþór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir og Brynhildur Bjarnadóttir. (2005). Biomass and composition of understory vegetation and the forest floor carbon stock across Siberian larch and mountain birch chronosequences in Iceland. *Annals of Forest Science, 62(8).* bls. 881-888.
- Bjarni Diðrik Sigurðsson, Sverdrup, H., Belyazid, S. og Brynhildur Bjarnadóttir. (2008). Effects of afforestation on the carbon cycle. in G. Halldórsson, E.S. Oddsdóttir and B.D. Sigurdsson (eds.), *AFFORNORD: Effects of afforestation on ecosystems, landscape and rural development.*
- Black, K., Byrne, K.A., Mencuccini, M., Tobin, B., Nieuwenhuis, M., Reidy, B., Bolger, T., Saiz, G., Green, C., Farrel, E.T. og Osborne, B. (2009). Carbon stock and stock changes across Sitka spruce chronosequence on surface-water gley soils. *Forestry: An International Journal of Forest Research, 82(3).* 255-272.

- Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D. Sigurdsson og Lindroth, A. (2009). A young afforestation area in Iceland was a moderate sink to CO₂ only a decade after scarification and establishment. *Biogeosciences*, 6, 2895-2906.
- Brynhildur Bjarnadóttir. (2009). Carbon stocks and fluxes in a young Siberian larch (*Larix sibirica*) plantation in Iceland. *Meddelanden från Lunds Universitets Geografiska Institution*. Avhandlingar 182., Lund University.
- Brynhildur Bjarnadóttir, Sungur, G.A., Bjarni D. Sigurdsson, Bjarki T. Kjartansson, Hlynur Óskarsson, Edda S. Oddsdóttir, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, Black, B. (2021). Carbon and water balance of an afforested shallow drained peatland in Iceland. *Forest Ecology and Management*. 482.
- Burns, B. (1997). Vegetation change along a geothermal stress gradient at the Te Kopia steamfield. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 27(2), 279–293.
- Cannell, M. G. R., Milne, R. (1995). Carbon pools and sequestration in forest ecosystems in Britain. *Forestry* 68(4), 361-378.
- Chapin, III. F.S., Matson, P.A., Vitousek, P.M. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, second edition. Springer.
- Ciais, P., C. Sabine, G.B., L.B., Brovkin, V., Canadell J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni R.B., Piao, S., Thornton, P. (2013). *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Einar Gunnarson, Skarphéðinn Smári Þórhallsson. (2003). Kortlagning Heiðmerkur. *Skógræktarritið*, 2003(1), 40-50.
- Ellert Arnar Marísson. (2020). *Viðarmagnsspá fyrir Vesturland*. (meistararitgerð) Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Fahey, T.J., Woodbury, P.B., Battles, J.J., Goodale, C.L., Hamburg, S.P., Ollinger, S.V., Woodall, C.W. (2010). Forest carbon storage: ecology, management, and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(5).
- FAO (2004) Global forest resources assessment update 2005—terms and definitions. *Forest Resources Assessment Programme*, Working paper 83/E.
- FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome.
- Gísli Gíslason og Yngvi Þór Loftsson. (1997). *Jarðir Reykjavíkur í Grafningi og Ölfusi. Nesjavellir, Ölfusvatn, Úlfjótuvatn og Kolviðarhóll: Landnýtingaráætlun júní 1997*. Unnið fyrir Borgarskipulag, Borgarverkfræðing, Hitaveitu og Rafmagnsveitu Reykjavíkur.
- Gunnhildur E.G. Gunnarsdóttir. (2017). *A novel approach to estimate carbon loss from drained peatlands in Iceland*. (Meistararitgerð) Háskóli Íslands.
- Guðmundur Rúnar Vífilsson. (2015). *Úttekt á skógræktaráætlunum fyrir bændaskógrækt: Ferstikla I í Hvalfjarðarsveit*. (meistararitgerð) Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Gústaf Jarl Viðarsson og Arnór Snorrason. (2012). Kolefnisforði og kolefnisbinding trjágróðurs í byggðum hverfum Reykjavíkurborgar, *Skógræktarritið*, 2012(1), 41-46.

- Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson, Trausti Jónsson. (2018). Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – *Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Veðurstofa Íslands.
- Halldór Björnsson, Trausti Jónsson, Sigróður Sif Gylfadóttir og Einar Örn Ólason. (2007). Mapping the annual cycle of temperature in Iceland. *Meteorologische Zeitschrift*, 16(1), 045-056.
- Harmon, M.E., Ferrell, W.K., Franklin, J.F. (1990). Effect on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science, New series*, 247(4943), 699-702.
- Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson. (1998). Geological map of Iceland, 1: 500,000. *Bedrock Geology*. Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Haukur Ragnarsson. (1990). Umhirða skóga. *Skógræktarboðin*. Skógræktarfélag Íslands. Bls. 157-165.
- Hendriks, K., Gubbay, S., Arets, E. og Janssen, J. (2020). *Carbon stocks and sequestration in terrestrial and marine ecosystems; A quick scan for terrestrial and marine EUNIS habitat types*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Internal Report.
- Hytönen, J., Aro, L. (2012) Biomass and nutrition of naturally regenerated and coppiced birch on cutaway peatland during 37 years. *Silva Fennica*, 46(3). 377-394.
- Hjalti Franzson. (2000). *Hydrothermal evolution of the Nesjavellir high temperature system in Iceland*. National Energy Authority, Geoscience Division, Reykjavik.
- Hrd. 14. október 2010 í máli nr. 684/2009. *Skógræktarfélag Reykjavíkur g. Kópavogsbæ*.
- Hunziker, M., Ólafur Arnalds, N. J. Kuhn. (2019). Evaluating the carbon sequestration potential of volcanic soils in southern Iceland after birch afforestation', *Soil*, 5: 223-38.
- Ingi Þorsteinsson. (2002). *Landgræðsla á jörðum Orkuveitu Reykjavíkur í Grafningi, 1989-2001*. Orkuveita Reykjavíkur.
- Ingi Þorsteinsson. (2007). *Kolefnisbinding með uppgræðslu og skógrækt á jörðum Orkuveitu Reykjavíkur í Grafningi*. Skýrsla unnin fyrir Orkuveitu Reykjavíkur.
- IGBP Terrestrial Carbon Working Group. (1998). CLIMATE: The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 280(5368), 1393–1394.
- IPCC. (2003). National greenhouse gas inventories programme. *Institute of Global Environmental Strategies*. Japan.
- IPCC. (2006). Good practice guidance and adjustments under Article 5. paragraph 2. of the Kyoto Protocol FCCC/KP/CMP/2005/8/Add.3 Decision 20/CMP.1. *National Centre for Atmospheric Research*, Boulder, Colorado, USA.
- 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* (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex og P.M. Midgley (ritsj.)). Cambridge University Press, United kingdom og New York, NY, USA. Bls. 1535.

- IPCC. (2014). *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, Hirashi, T., Krug, T., Tanabe, K., Sirivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. And Troxler, T.G. (ritsj.). IPCC, Switzerland.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzess, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou (ritsj.)). Cambridge University Press, Englandi og New York, Bandaríkin.
- Jón Auðunn Bogason, Jón Ágúst Jónsson og Bjarni Diðrik Sigurðsson. (2018). Er framleiðsla iðnvíðar með skammtuskógrækt raunhæf hérlandis? Raunveruleg dæmi. *Skógræktarritið*, 2018(2), 32-44.
- Jón Ágúst Jónsson og Bjarni Diðrik Sigurðsson. (2008). Áhrif skógræktaraðgerða á víðarvöxt og kolefnisbindingu í ungum asparskógi. *Rit Fræðafþings landbúnaðarins*, 5: 103-10.
- Jón Hilmar Kristjánsson. (2020). *Effects of tree species composition and planting methods on survival and growth in a 15-year-old forest in southern Iceland*, (meistararitgerð), Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Julia C. Bos. (2021). *Áhrif nýskógræktar á jarveg, kolefnisforða og líffræðilega fjölbreytni á Fljótsdalshéraði*, (meistararitgerð), Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Julia C. Bos, Ásrún Elmarsdóttir, Bjarki Þór Kjartansson, Edda S. Ólafsdóttir og Bjarn D. Sigurðsson. (2022). Effects of afforestation on carbon stocks and biodiversity in Fljótsdalshérað. *Skógræktarritið*, 2022(2), 68-77.
- Kärenlampi, P.P. (2019). Wealth accumulation in rotation forestry – Failure of the net present value optimization? *PLoS ONE* 14(10).
- Kolviður. (2021). *Vissir þú að*. Sótt 10. apríl 2021 af <https://kolvidur.is/vissir-thu/>
- Kristbjörn Egilsson og Guðmundur Guðjónsson. (2006). *Gróður í Heiðmörk*. Náttúrufræðistofnun Íslands. Skýrslur; NÍ-06001.
- Krisján Sæmundsson. (1992). Geology of the Thingvallavatn Area. *Oikos*, 64(1/2).
- Lárus Heiðarsson, Benjamín Davíðsson, og Arnór Snorrason. (2015). Viðarmagnsspá fyrir bændaskógrækt á Fljótsdalshéraði. *Rit Mógilsár*, 34(1).
- Lárus Heiðarsson og Pukkala. T. (2012). Models for simulating the temporal development of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) plantations in Hallormstaður. *Icelandic Agricultural Sciences*, 25, 13-23.
- Loetsch, F., Zohrer, F., og Haller K. (1973). *Forest Inventory*, 34(2). I. Munich: BLV Verlagsgesellschaft.
- Lundmark. T., Bergh. J., Nordin. A. Fahlvik. N., Poudel. B.C. (2016). Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden. *Ambio* 45, 203-213.
- McRoberts, R.e., Stahl, G., Vidal, C., Lawrence, M., Tomppo, E., Schadauer, K., Chirici, G., Bastrup-Birk, A. (2010). National Forest Inventories: Prospects for Harmonised International Reporting. *National Forest Inventories – Pathways for common reporting*. Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R. E., Springer. Bls 33-44.

- Nicole Keller, Martina Stefani, Sigríður Rós Einarisdóttir, Ásta Karen Helgadóttir, Rafn Helgason, Birgir Urbancic Ásgeirsson, Diljá Helgadóttir, Inga Rún Helgadóttir, Leon Tinganelli, Sigmundur Helgi Brink, Arnór Snorrason og Jóhann Þórisson. (2022). *National Inventory Report, Emissions of greenhouse gases in Iceland from 1990 to 2022*, UST-2022:02
- Nilsson, U., Fahlvik, N., Johansson, U., Lundstöm, A., Rosvall, O. (2011). Simulation of the effect of intensive forest management on forest production in Sweden. *Forests* 2011, 2(1), 373-393.
- Official Statistics of Finland (OSF): *Greenhouse gases [online publication]. Reference period: 2021.* Helsinki: Statistics Finland (Sótt: 3.1.2023). <https://stat.fi/en/publication/cktlcpwag38sg0c5561iqop0y>
- Owona, J.C. (2019). *Changes in Carbon-stock and soil properties.* (meistararitgerð) Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Peichl, M., Thevastan, N.V., Gordon, A.M., Huss, J., Abohassan, R.A. (2006). Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* 66(3):243-357
- Pétur Halldórsson, Arnlín Óladóttir, Gunnlaugur Guðjónsson og Þröstur Eysteinnsson. (2019). *Skógarkolefni, skilyrði fyrir kolefnisbindingu með skógrækt til vottunar.* Skógræktin, vefútgáfa: sótt 24.04.2021.
- Pic, G. (2009). *Management optimisation of the Heidmörk's forest, Iceland. Valuation of timber stock and carbon sequestration,* (óútfinn meistaraprófsritgerð). Universite Joseph Fourier, Grenoble. Frakklandi.
- Philip, M.S. (1994). *Measuring trees and forests, second edition.* Aberdeen University Press.
- Pretzsch, H., Schütze, G. (2016). Effect of tree species mixing on size structure, density, and yield of forest stands. *European Journal of Forest Research.* 135, 1-22.
- Ragnhildur Sigurðardóttir. (2000). *Effects of different forest types on total ecosystem carbon sequestration in Hallormastaður forest, Eastern Iceland.* (doktorsritgerð). Yale University. New Haven.
- Ranneby, B., Cruse, T., Hägglund, B., Jonasson, H., Swärd, J. (1987). Designing a new national forest survey for Sweden. *Studia Forestalia Suecica* 177, 1-29.
- Rytter, R.M., Rytter, L. (2020). Carbon sequestration at land use conversion – Early changes in total carbon stocks for six tree species grown on former agricultural land, *Forest Ecology and Management* 466.
- Snorri Sigurðsson. (1990). Gróðursetning skógarplantna. *Skógræktarbókin.* Skógræktarfélag Íslands. Bls. 147-155.
- Sedjo, R., Sohngen, B. (2012). Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Resource Economics* 4(1), 127-144.
- Sigríður Júlía Brynleifsdóttir. (2011). *The Forest carbon certification project in Iceland: a case study.* (meistararitgerð) Norwegian University of Life Sciences.
- Skógræktarfélag Reykjavíkur. (2020). *Saga Skógræktarfélags Reykjavíkur.* Opnað 06.04.2020. <http://heidmork.is/um-okkur/saga/>
- Skógræktin. (4.1.2023). *Skógarkolefnisreiknir.* <https://reiknival.skogur.is/>

- Tomppo, E., Heikkinen, J. (1999). *National Forest Inventory of Finland – Past, Present and Future*. Finnish Forest Research Institute.
- United Nations. (2020). *Summary of GHG Emissions for Sweden*. Framework convention on climate change. (Sótt3.1.2023)
https://di.unfccc.int/ghg_profiles/annexOne/SWE/SWE_ghg_profile.pdf
- UNFCCC. (1992). United Nations Framework Convention On Climate Change. United Nations, FCCC/INFORMAL/84 GE. 05-62220 (E) 200705, Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany.
unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf.
- UNFCCC. (2002). *1/CP.3 Adoption of the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNFCCC. <https://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a03.pdf>
- Uri, V., Kukumagi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, M., Karoles, K. (2017). Ecosystem carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. *Forest Ecology and Management*. 399(1). 82-93.
- Vesterdal, L., Clarke, N., Bjarni D. Sigurdsson, Gundersen, P. (2013). Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests?, *Forest Ecology and Management*. 309: 4-18.
- Wamelink, G.W.W., Wieggers, H.J.J., Reinds, G.J., Kros, J., Mol-Dijkstra, J.P., Oijen, M., de Vries, W. (2009). Modelling impacts of changes in carbon dioxide concentration, climate and nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and forest soils. *Forest ecology and Management*, 258(8), 1794-1805.
- Ward, P. L. (1971). New Interpretation of the Geology of Iceland. *Geological Society of America Bulletin*, 82(11), 2991-3012.
- Van Laar, A., Akça, A. (2007). *Forest Mensuration*, Dordrecht, Springer.
- Þorbergur Hjalti Jónsson og Arnór Snorrason. (2018). Single tree aboveground biomass models for native birch in Icelandi. *Icelandic Agricultural Sciences*, 31, 65-80.
- Þorbergur Hjalti Jónsson. (2004) Stature of sub-arctic birch in relation to growth rate, Lifespan and tree form. *Annals of Botany* 94, 753-762.
- Þorbergur Hjalti Jónsson og Úlfur Óskarsson. (1996). Skógrækt og landgræðsla til að nema koltvísýring úr andrúmslofti, *Ársrit Skógræktarfélags Íslands*, 65-87.