

Mælingar á kolefnisbindingu mismunandi skógargerða

Bjarni D. Sigurðsson¹, Ásrún Elmarsdóttir², Brynhildur Bjarnadóttir³ og Borgþór Magnússon²

¹Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri, 311 Borgarnesi; ²Náttúrufræðistofnun Íslands, Hlemmi 3, 125 Reykjavík; ³Rannsóknarstöð Skógræktar ríkisins, Mógilsá, 116 Reykjavík

Útdráttur

Markmiðið með þessari grein er að sýna nýjustu niðurstöður mælinga á kolefnisbindingu ofanjarðar og í grófrótum fyrir allar helstu trjátegundir sem notaðar eru í skógrækt hérlendis. Til samanburðar verða sýndar nýjar niðurstöður hermílikans sem spáir fyrir um þróun kolefnisforða ofan- og neðanjarðar í misgömlum rauðgreniskógum í mið Svíþjóð. Um 45 ára ógrisjaður stafafuruskógur hafði hæstan bindistuðul (11,2 t CO₂/ha og ári). Það jafnast á við árlega losun frá ríflega fjórum Toyota Yaris einkabílum miðað við 20.000 km akstur (losar 2,7 t CO₂). Ógrisjaðir og grisjaðir lerki eða sitkagreniskógar á svipuðu aldursbili höfðu bindistuðul upp á 5-7 t CO₂/ha á ári. Yngri skógar höfðu mun lægri bindistuðla. Mælingarnar sýndu að kolefnisforði jarðvegs jókst með aldri skógargerða (um 1,3-3,0 t CO₂/ha á ári), en breytingin var ekki tölfræðilega marktæk í öllum tilfellum. Þörf er á frekari rannsóknum á lífrænu efni í íslenskum eldfjallajarðvegi svo að hægt sé að nota hermílikön til að spá fyrir um áhrif skógræktar á kolefnisbindingu ofan- og neðanjarðar.

Inngangur

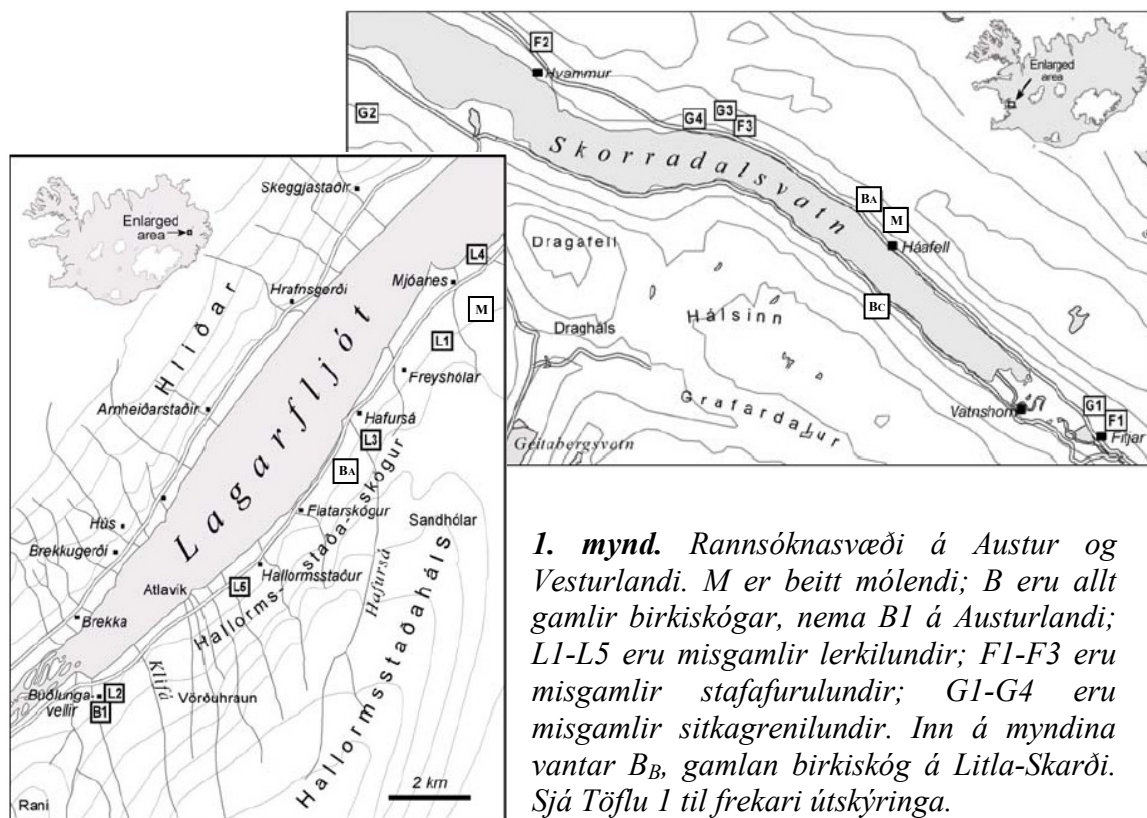
Miklar rannsóknir fara nú fram víða um lönd á kolefnishringrás náttúrulegra vistkerfa, sem og á því hvernig mismunandi landnýting og ræktun hefur áhrif á hana (t.d. Hyvönen o.fl. 2007). Talsverðar rannsóknir hafa farið fram hérlendis á síðustu árum á kolefnishringrás náttúrulegra og gróðursettra skóga. Yfirlitsgreinar um slíkar rannsóknir fyrir skógrækt og landgræðslu eru í þessu hefti og einnig má benda á Bjarni D. Sigurðsson o.fl. (2005) til yfirlits.

Það er tiltölulega einfalt að meta kolefnisforða ofanjarðar í skógi ef fyrir hendi eru föll sem gera kleift að umbreyta hefðbundnum skógvaxtarmælingum í lífmassa og kolefnisforða (t.d. Brynhildur Bjarnadóttir o.fl. 2008). Hinsvegar er innan við helmingur kolefnisforða skóganna bundinn í trjánum. Afgangurinn er í lífrænu efni í og á jarðvegi (t.d. Arnór Snorrason o.fl. 2002).

Markmiðið með þessari grein er að sýna nýjustu niðurstöður mælinga á kolefnisbindingu ofanjarðar og í grófrótum fyrir allar helstu trjátegundir sem notaðar eru í skógrækt hérlendis. Einnig voru útbúnir bindistuðlar sem gilda fyrir tegundir og fyrir mismunandi aldur skóga. Til samanburðar verða sýndar nýjar niðurstöður hermílikans sem spáir fyrir um kolefnisbindingu mis-gamalla rauðgreniskóga í mið Svíþjóð. Að lokum verður fjallað um áhrif skógræktar á kolefnisforða jarðvegs, og hvaða frekari rannsóknir er þörf til að við getum betur spáð fyrir um breytingar sem verða á kolefnisforðum vistkerfis í kjölfar skógræktar.

Efni og aðferðir

Mælingar voru gerðar á kolefnisforða misgamalla skóga fimm trjategunda á Austur og Vesturlandi (1. mynd; Tafla 1). Þetta voru annars vegar náttúrulegir birkiskógar (*Betula pubescens*) og hins vegar gróðursettir lerkiskógar (*Larix sibirica*), stafafuruskógar (*Pinus contorta*) og sitkagreniskógar (*Picea sitchensis*). Rannsóknirnar voru hluti af verkefni SKÓGVIST, sem betur er lýst í Ásrún Elmarsdóttir o.fl. (2003), Bjarni D. Sigurdsson o.fl. (2005) og Ásrún Elmarsdóttir o.fl. (2007).



1. mynd. Rannsóknasvæði á Austur og Vesturlandi. M er beitt mólendi; B eru allt gamlir birkiskógar, nema B1 á Austurlandi; L1-L5 eru misgamlir lerkilundir; F1-F3 eru misgamlir stafafurulundir; G1-G4 eru misgamlir sitkagrenilundir. Inn á myndina vantar B_B, gamlan birkiskóg á Litla-Skarði. Sjá Töflu 1 til frekari útskýringa.

Kolefnisforði í viði og laufi/barri var fundinn með hefðbundnum skógvaxtarmælingum á þremur til fimm hringlaga 50-100 m² mæliflötum í hverjum lundi á árunum 2002-2004. Þvermál allra stofna á hverjum fleti var mælt í 50 cm (birki, ung barrtré) eða 130 cm hæð (eldri barrtré) með klafa, auk þess sem hæð og lengd þeirra var mæld með hæðarstöng. Lífmassi ofanjarðar og grófróta (>2 mm) var fundinn með birtum lífmassaföllum (Ragnhildur Sigurðardóttir 2000; Arnór Snorrason & Stefán F. Einarsson, 2006; Brynhildur Bjarnadóttir o.fl. 2008). Magn kolefnis var ákvarðað sem 0,50 hlutfall af þurrvigt lífmassa (Arnór Snorrason o.fl., 2002). Allur dauður viður með þvermál >2 cm var mældur sérstaklega á skógmælingaflötum. Kolefnisforði botngróðurs og feyru (e: litter) var fundinn með uppskerumælingum á 15 33×50 cm römmum í hverjum lundi og birtum kolefnis-hlutföllum fyrir mismunandi gróðurgerðir (Arnór Snorrason o.fl. 2000).

Kolefnisforði efstu 30 cm jarðvegs var fundinn með því að mæla heildarmagn kolefnis í 15 jarðvegssýnum á fimm 50 m löngum sniðum í hverjum lundi. Jarðvegssýnin voru tekin í uppskerureitum botngróðurs eftir að feyrulag hafði verið fjarlægð. Hverju sýni var skipt í þrjú dýptarbil, 0-10 cm, 10-20 cm og 20-30 cm, og voru efnagreiningar gerðar fyrir hvert bil sérstaklega. Efnagreiningar voru unnar á

Efnagreiningum Keldnaholti. Jarðvegsdýpt var skráð og einnig voru tekin sýni á sömu stöðum til mælinga á rúmþyngd jarðvegs. Þessar þrjár breytur eru nauðsynlegar þegar áætla á kolefnisforða jarðvegs. Grjót var ekki mikið í efstu 30 cm jarðvegsins á umræddum svæðum, og því var ekki tekið tillit til þess í forðamatinu.

Tafla 1. Nánari lýsing á rannsóknsvæðum á Austur- og Vesturlandi.

Rannsóknasvæði	Gróðurlendi	Stærð (ha)	Gróðursetning eða friðun	Aldur (ár)	Ríkjandi hæð (m)	Grunnflötur (m ² /ha)
Austurland						
M	Rýrt mólendi	7,4	Beitt	0	0	0
B1	Birki	5,1	1979*	18	3,4	1,2
B _A	Birki	6,1	Friðað 1905	-	7,8	17,0
L1	Lerki	4,6	1990	12	3,9	1,8
L2	Lerki	7,2	1984	18	6,5	12,5
L3	Lerki	9,5	1983	19	6,8	10,9
L4	Lerki	3,2	1966	36	10,4	33,4
L5	Lerki	7,3	1952**	50	14,7	33,7
Vesturland						
M	Rýrt mólendi	>3	Beitt	0	0	0
B _A	Birki	>3	Beittur	-	2,3	4,5
B _B	Birki	>3	Friðaður 1985	-	2,4	3,4
B _C	Birki	>3	Friðaður 2004	-	4,6	6,1
F1	Fura	>3	1990	14	3,2	2,3
F2	Fura	>2	1965-1968	39	8,8	36,8
F3	Fura	1,8	1958-1959	46	11,7	63,9
G1	Greni	>2	1995	9	1,5	0,1
G2	Greni	1,2	1970	34	6,9	17,1
G3	Greni	3,2	1960-1961	43	8,8	32,9
G4	Greni	4,1	1961**	43	14,3	42,9

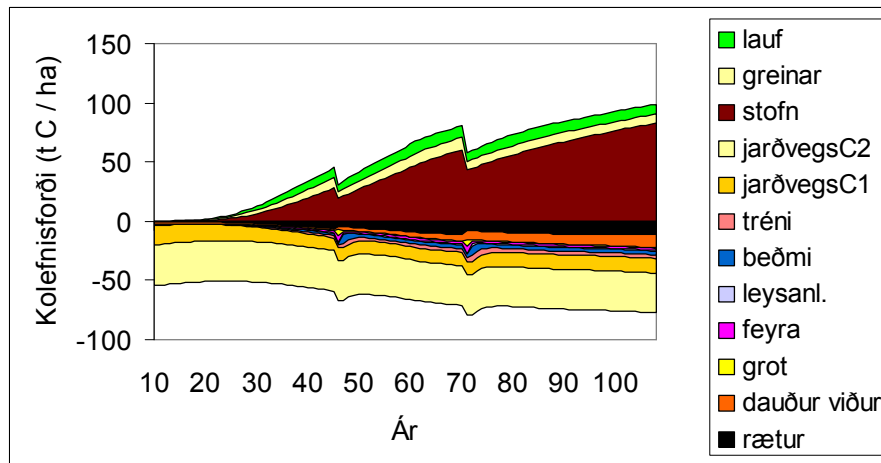
* Skógur vaxið upp með sjálfsáningu eftir friðun 1979

** Þessir skógar hafa verið grisjaðir og hafa lægri þéttleika en aðrir skógar sömu tegundar.

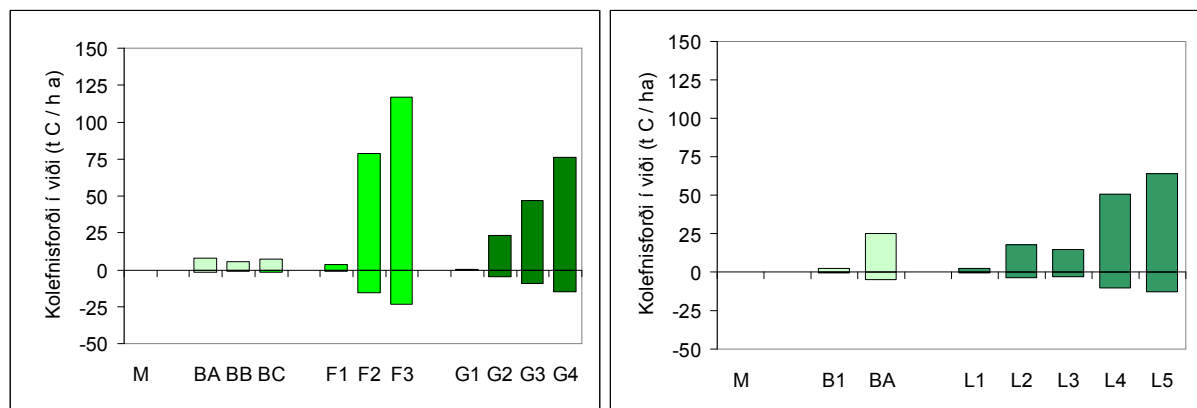
Hermilíkanið CO2FIX, útg. 3,11 (Schelhaas o.fl. 2004) var notað hér til að sýna breytingar á kolefnisforða í ræktuðum rauðgreniskógum (*Picea abies*) í mið Svíþjóð. Þetta var gert til að hafa raunverulegan samanburð við íslensku mælingarnar. Breytingar á kolefnisforðum í lífmassa, dauðum viði og feyru byggja á raunverulegum mælingum í sænskum rauðgreniskógum (Bjarni D. Sigurðsson, óbirt gögn). Niðurbrot lífræns efnis og flutningur á milli feyru, grots og kolefnissambanda í jarðvegi byggir á Berg o.fl. (1991) og umsetning jarðvegs-kolefnis byggir á mælingum á 5.500 ára jarðvegsprófil undir náttúrulegum greniskógi í Finnlandi (Liski et al., 1998). Þessir útreikningar eru gerðir í norrænu verkefni, CAR-ES (<http://www.nordicforestry-cares.org/>), þar sem markmiðið er að spá fyrir um áhrif séðrar styttingar á vaxtarlotum í nytjaskógrækt á kolefnisbindingu, vatnsgæði og líffræðilegan fjölbreytileika. Íslendingar sjá þar um útreikninga áhrifa á kolefnisbindingu ofanjarðar og í jarðvegi (Bjarni D. Sigurðsson og Jón Ágúst Jónsson, óbirt handrit).

Niðurstöður og umræður

Hér verður einungis fjallað um mælingar á áhrifum skógræktar á tvo stærstu kolefnisforða vistkerfisins, lifandi trjáa og jarðvegs. Bjarni D. Sigurdsson o.fl. (2005) fjölluðu um hvernig kolefnisforði botngróðurs, dauðs viðar og feyru breyttist með aldri skóganna á Austurlandi. Þar kom í ljós að þessir þrjú kolefnisforðar eru tiltölulega litlir miðað við hina forðana, og að almennt var minnkun í forða botngróðurs með aldri skóganna vegin upp í aukningu kolefnisforða dauðs viðar og feyru.



2. mynd. Spá hermílikansins CO₂-FIX um þróun kolefnisforða ofanjarðar (pósítifar tölur) og neðanjarðar (negatífar tölur) í rauðgreniskógi (*Picea abies*) í mið-Svíþjóð. Vaxtargeta skógarins er 24 m við 100 ára aldur og jarðvegur er 1 m djúpur þurlendisjarðvegur vaxinn aðalbláberjalyngi. Grisjun veldur tímabundinni minnkun í forða ofanjarðar, en aukningu neðanjarðar þegar greinar, barr og toppar grisjaðra trjáa lenda á skógarbotni (Bjarni D. Sigurdsson og Jón Ágúst Jónsson, óbirt handrit).



3. mynd. Kolefnisforði í viði ofanjarðar (pósítifar tölur) og grófrótum neðanjarðar (negatífar tölur) í birkiskógum (B) og misgömlum stafafuruskógum (F1-F3), sitkagreniskógum (G1-G4) og lerkiskógum (L1-L5) á Vestur- og Austurlandi. M eru skóglaus sammanburðarsvæði; B eru allt gamlir birkiskógar, nema B1 á Austurlandi. Ath að kvarði ofanjarðar er sá sami og á 2. mynd. Sjá Töflu 1 til frekari skýringa á aldri einstakra lunda.

Kolefnisforði í viði

Kolefnisforði í viði og grófrótum bætist við aðra kolefnisforða þegar land er tekið til skógræktar og kolefnisbinding með nýskógrækt felst einkum í aukningu á þessum forðum (2. mynd). Magn þessara forða eykst eftir því sem skógur eldist og tré stækka, en grisjanir og önnur skógarumhirða getur minnkað forðann ofanjarðar tímabundið (2. mynd).

Heildar kolefnisforðinn í viði, greinum, laufi/barri og grófrótum í 40-50 ára gömlum stafafuru, sitkagreni og lerkiskógum var 140, 91 og 77 t C/ha (3. mynd). Ógrisjaður sænskur rauðgreniskógur með meðalvöxt fyrir Svíþjóð ($5,9 \text{ m}^3 / \text{ha}$ á ári) hefur náð um 120 t C/ha forða ofanjarðar og í rótum á sama aldri (2. mynd). Þetta eru einnig svipaðir viðarforðar og mældir voru í tveimur lerkiskógum á svipuðum aldri á Norður- og Austurlandi og sitkagreniskógi á Suðurlandi (Arnór Snorrason o.fl. 2002). Einnig eru niðurstöður Ragnhildar Sigurðardóttur (2000) fyrir 50 ára grisjaða lerkiskóga á Hallormsstað samhljóða L5 (78 t C / ha) og um 50 ára ógrisjaðir stafafuruskógar á sama stað höfðu um 115 t C / ha kolefnisforða í viði og rótum í hennar rannsókn.

Það var stafafura sem safnaði upp mestum kolefnisforða fyrstu 40-50 árin í þessari rannsókn (3. mynd). Ógrisjuð stafafura batt einnig meira en grisjað lerki og birkiskógar á svipuðum aldri í rannsókn Ragnhildar Sigurðardóttur (2000). Þegar tegundirnar eru bornar saman er rétt að bera saman ógrisjaða skóga á sem líkustum aldri og við sem sambærilegust skilyrði (F2 og G3 eða L4).

Gamlir íslenskir kynslóðablandaðir birkiskógar á Vesturlandi höfðu aðeins um 6-9 t C/ha kolefnisforða í viði og grófrótum (3. mynd). Þetta er sambærilegur forði og í um 15-20 ára gömlum ræktuðum barrskógum (3. mynd). Náttúrulegir birkiskógar Vesturlands eru mun lágvaxnari en sambærilegir skógar á Norður- og Austurlandi. Það kemur því ekki á óvart að kolefnisforði viðar og róta í gamla Hallormsstaðaskógi var mun hærri, eða um 30 t C/ha. Kolefnisforði gamals kynslóðablandaðs birkiskógar á Austurlandi, Hallormsstaðaskógar, er sambærilegur við um 25-35 ára gamla ræktaða barrskóga (3. mynd). Það er mikilvægt að gera sér grein fyrir því að ræktaðir birkiskógar geta haft hærri kolefnisforða en náttúrulegir birkiskógar vegna meiri þéttleika, jafnari stærðar og aldursdreifingu trjáa. Arnór Snorrason o.fl. (2002) fundu að um 55 ára gamall ræktaður birkiskógur á Rangárvöllum hafði um 58 t C/ha í viði og grófrótum og Ragnhildur Sigurðardóttir (2000) mældi um 45 t C/ha forða í 60-65 ára sjálfsáðum birkiskógum á Hallormsstað. Skógurinn B1 á Austurlandi, sem var sjálfsáinn skógur þar sem elstu trén voru tæpra 20 ára hafði hinsvegar ekki náð að safna upp nema um 3 t C/ha (2. mynd). Meiri rannsókn er þörf á möguleikum og getu birkis til kolefnisbindingar.

Þegar áætla á kolefnisbindingu með skógrækt er gjarnan notaður einhverskonar bindistuðull \times flatarmál nýræktaðra skóga. Bindistuðullinn er meðalbinding í t CO_2/ha á ári eða t C/ha á ári yfir ákveðið árabil. Slíkir bindistuðlar fyrir misgamla birki, lerki, stafafuru og sitkagreniskóga eru sýndir í Töflu 2. Um 45 ára ógrisjaður stafafuruskógur hafði hæstan bindistuðul (11,2 t CO_2/ha og ári). Það jafnast á við árlega losun frá ríflega fjórum Toyota Yaris einkabílum miðað við 20.000 km akstur (losar 2,7 t CO_2). Ógrisjaðir og grisjaðir lerki eða sitkagreniskógar á svipuðu aldursbili höfðu bindistuðul upp á 5-7 t CO_2/ha á ári, sem jafnast á við losun 2-3 Toyota smábíla í hverjum hektara skógar eða árlegri losun 100-150 smábíla ef bindingin á einum hektara er lögð saman fyrir 50 ár.

Þegar kolefnisbinding með nýskógrækt hefur verið áætluð á landsvísu hefur bindistuðullinn 4,4 t CO₂/ha og ári oft verið notaður sem varfærið meðaltal fyrir allar gerðir ræktaðra barrskóga (Bjarni D. Sigurðsson o.fl. 2005). Eins og sjá má á Töflu 1 þá sýna niðurstöður SKÓGVISTAR að allir barrskógar sem mældir voru og sem höfðu náð 35 ára aldri höfðu hærri meðalbindingu í viði og grófrótum en 4,4 t CO₂. Niðurstöðurnar styðja því þá fullyrðingu að 4,4 sé varfærið mat á kolefnisbindingu fyrstu 50 árin eftir gróðursetningu.

Tafla 2. Mældir bindistuðlar í lifmassa trjáa ofanjarðar og í grófrótum í mismunandi skógargerðum á Austur- og Vesturlandi. Sjá Töflu 1 til nánari lýsingar á skógum.

Tegund og aldur	Bindistuðlar		Tegund og aldur	Bindistuðlar	
	t CO ₂ / ha á ári	t C / ha á ári		t CO ₂ / ha á ári	t C / ha á ári
18 ára birki	0,6	0,2	14 ára stafafura	1,2	0,3
			39 ára stafafura	8,9	2,4
12 ára lerki	0,9	0,3	46 ára stafafura	11,2	3,0
18 ára lerki	4,3	1,2	9 ára sitkagreni	0,2	0,1
19 ára lerki	3,4	0,9	34 ára sitkagreni	3,0	0,8
36 ára lerki	6,2	1,7	43 ára sitkagreni	4,8	1,3
50 ára lerki*	5,6	1,5	43 ára sitkagreni*	7,8	2,1

* grisjaðir skógar

Hér er einungis gefinn upp bindistuðull fyrir ungan sjálfsáinn birkiskóg, þar sem aðrir birkiskógar í rannsókninni voru kynslóðablandaðir gamlir skógar, og því ekki af einum ákveðnum aldri. Þessi stuðull gildir fyrir bindingu í viði og grófrótum, en ekki fyrir uppsöfnun í jarðvegi (sjá síðar). Arnór Snorrason o.fl. (2002) gáfu upp slíkan bindistuðul fyrir um 55 ára ræktaðan birkiskóg á Rangárvöllum sem 3,9 t CO₂/ha og Ragnildur Sigurðardóttir (2000) fékk um 2,4 t CO₂/ha bindistuðul fyrir þrjá 60-65 ára gamla sjálfsáða birkiskóga á Hallormsstað. Það ætti því að nota lægri bindistuðul fyrir ræktaða birkiskóga en ræktaða barrskóga, ef kolefnisbinding þeirra er áætluð með bindistuðla-aðferðinni.

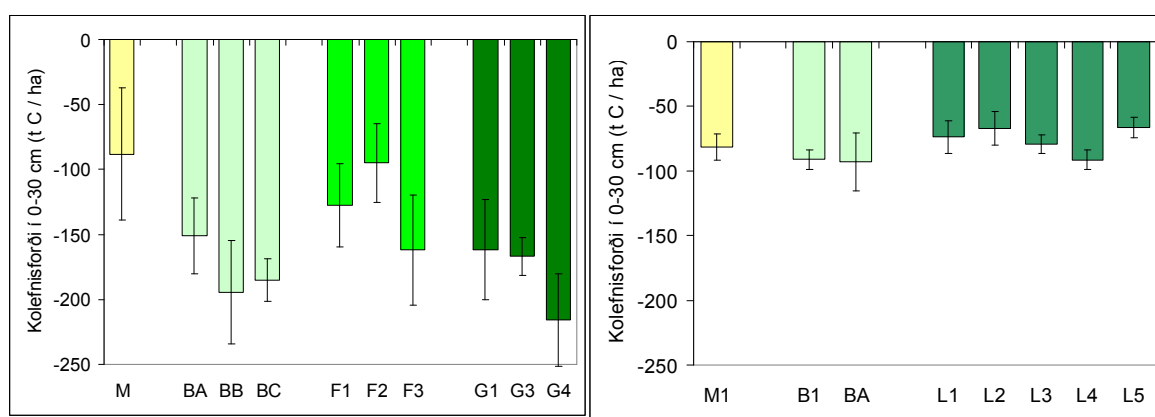
Það er mikilvægt að fólk geri sér grein fyrir að bindistuðlar gilda aðeins fyrir samfelldan skóg. Ef bindistuðlar eru notaðir til áætlunar á kolefnisbindingu verður fyrst að finna samfellt nettó-flatarmál skógar, áður en það er margfaldað saman við stuðulinn. Einnig er mikilvægt að hafa í huga að þeir gilda aðeins sem meðaltal yfir það tímabil sem þeir eru fundnir fyrir. Það er varasamt að beita þeim bæði fyrir lengri eða skemmri tímabil. Þetta er auðskiljanlegt þegar 2. mynd er skoðuð. Bindistuðull er einföld línuleg aukning frá upphafi aðgerða, á meðan að kolefnisforði eykst ekki línulega í raun. Niðurstöður þessa verkefnis eru fyrsta tilraun til að útbúa aldursháða bindistuðla á Íslandi, og niðurstöðurnar nýtast vonandi til betri áætlana á kolefnisbindingu með skógrækt.

Kolefnisforði í jarðvegi

Á Vesturlandi kom í ljós að einn af greniskógunum, G2, óx á svæði þar sem berggrunnurinn var mikið blandaður líparíti á meðan að öll hin svæðin voru á basalt berggrunni. Þetta hafði mikil áhrif á alla eðliseiginleika jarðvegs, og kolefnisforði hans var mun hærri en á öðrum svæðum (gögn ekki sýnd). Vegna þessa er G2 sleppt hér þegar jarðvegsforði er sýndur. Jarðvegsforðinn var áberandi meiri undir bæði gömlum náttúrulegum birkiskógum og ræktaðum barrskógum á Vesturlandi en á

Austurlandi (4. mynd). Á Vesturlandi var breytileiki í jarðvegsforðanum einnig almennt mun meiri, bæði í skógum og skóglausu landi. Þetta stafar ef til vill af því að brattlendi er meira í Skorradal.

Jarðvegsforði efstu 30 cm skóglauss lands var svipaður í báðum landshlutum, eða um 81-88 kg C/ha (4. mynd). Þetta er umtalsvert meiri forði en er að finna í 1 m þykkum jarðvegi í mið Svíþjóð (2. mynd). Eldfjallajarðvegur inniheldur mun meira kolefni en allar aðrar þurrlendisjarðvegsgerðir (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004), og samanburðurinn sýnir það vel. Upphaflega var hugmyndin að átla breytingu á kolefnisforða jarðvegs með einföldum samanburði við skóglausu svæðin. Sá munur sem sést á kolefnisforða jarðvegs á milli skóga og skóglausra svæða á Vesturlandi er þó of mikill svo að hann megi útskýra með áhrifum skógræktar á nokkrum áratugum. Réttari aðferð er því að bera saman breytingar á kolefnisforða með aldri, innan hverrar skógargerðar.



4. mynd. Kolefnisforði í efstu 30 cm jarðvegs rannsóknasvæðanna (meðaltöl og staðalfrávik; $n = 5$ snið) á Vestur- og Austurlandi. M eru samanburðarsvæði; B eru allt gamlir birkiskógar, nema B1 á Austurlandi, L1-L5, F1-F3 og G1-G4 eru misgamlir lerki, furu- og greniskógar. Sjá Töflu 1 til frekari skýringa á aldri einstakra lunda.

Allar skógargerðirnar sýndu aukningu í kolefnisforða jarðvegs með aldri. Aukningin nam 1,3 t CO₂/ha á ári fyrir lerki, 1,7-2,0 t CO₂/ha á ári fyrir birki og furu og um +3,0 t C/ha á ári fyrir greni (4. mynd). En þrátt fyrir að hafa efnagreint 45 (3x15) jarðvegssýni á hverjum stað sýndi fyrsta úrvinnsla að breytileiki innan svæða er of mikill svo að tölfræðilega marktækt línulegt samband fáiast á kolefnisbindingu í jarðvegi með skógrækt, nema fyrir sitkagreni (línulegt aðhvarf innan skógargerða $P > 0.05$). Þó má fullyrða með tölfræðilegri vissu að skógrækt á þurrlendisjarðvegi leiði ekki til taps á kolefni úr jarðvegi í þessari rannsókn. Frekari úrvinnsla býður, þar sem breytingarnar á kolefnisforða einstakra jarðvegslaga, til dæmis 0-10 cm, verður skoðuð betur.

Næsta skref í úrvinnslu þessara rannsókna er að aðlaga CO₂-FIX hermilíkanið að íslenskum skógræktarsvæðum. Gagnasafn SKÓGVISTAR er mjög gagnlegt til slíkra útreikninga. Þessi vinna er þegar hafin. Það sem helst skortir fyrir slíka útreikninga við íslenskar aðstæður er aukin þekking á mismunandi gerðum lífræns efnis og kolefnisferlum í íslenskum eldfjallajarðvegi.

Heimildir

- Arnór Snorrason, Þorbergur Hjalti Jónsson, Kristín Svavarsdóttir, Grétar Guðbergsson & Tumi Traustason. 2000. Rannsóknir á kolefnisbindingu ræktaðra skóga á Íslandi. Skógræktarritið 2000, bls. 71-89.
- Arnór Snorrason & Stefán Freyr Einarsson. 2006. Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry. *Icelandic Agricultural Sciences* 19, bls. 15-24.
- Arnór Snorrason, Bjarni D. Sigurdsson, Grétar Guðbergsson, Kristín Svavarsdóttir & Þorbergur Hjalti Jónsson. 2002. Carbon sequestration in forest plantations in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 15:81-93.
- Ásrún Elmarsdóttir, Bjarni D. Sigurdsson, Guðmundur Halldórsson, Ólafur K. Nielsen & Borgþór Magnússon. 2003. Áhrif skógræktar á lífríki, Ráðunautafundur 2003, bls. 196-199.
- Ásrún Elmarsdóttir, Bjarni D. Sigurdsson, Borgthor Magnusson, Bjarni E. Guðleifsson, Edda Oddsdóttir, Erling Ólafsson, Guðmundur Halldórsson, Guðridur Gyða Eyjolfssdóttir, Kristinn H. Skarphedinsson, María Ingimarsdóttir & Ólafur K. Nielsen. 2007. Age-related dynamics in biodiversity and carbon cycling of Icelandic woodlands (ICEWOODS): Experimental set-up and site descriptions, Í: Guðmundur Halldórsson o.fl. (ritstj.). Effects of afforestation on ecosystems, landscape and rural development. *TemaNord* 508. bls. 100-107.
- Berg, B., H. Boottink, A. Breymeyer, A. Ewertsson, A. Gallardo, B. Holm, M.-B. Johansson, S. Koivuouja, V. Meentemeyer, P. Nyman, J. Olofsson, A.-S. Pettersson, A. Reurslag, H. Staaf, I. Staaf & L. Uba. 1991. Data on needle litter decomposition and soil climate as well as site characteristics for some coniferous forest sites. Part II. Decomposition data. 42, *Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för ekologi och miljövärd, Uppsala*.
- Bjarni Diðrik Sigurdsson, Arnór Snorrason, Bjarki Þór Kjartansson & Brynhildur Bjarnadóttir. 2005. Kolefnisbinding með nýskógrækt. Hvar stöndum við og hverjir eru möguleikarnir. *Fræðaging landbúnaðarins* 2005: bls. 20-24.
- Bjarni D. Sigurdsson, Borgþór Magnusson, Ásrún Elmarsdóttir & 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, bls. 881-888.
- Brynhildur Bjarnadóttir, Anna Cecilia Inghammar & Bjarni D. Sigurdsson. 2008. Lífmassa- og rúmmálsföll fyrir ung lerkitré (*Larix sibirica*) á Austurlandi. *Fræðaging landbúnaðarins* 5, (þetta hefti).
- Hlynur Óskarsson, Ólafur Arnalds, Jón Guðmundsson & Grétar Guðbergsson. 2004. Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion. *CATENA* 56, bls. 225-238.
- Hyvönen, R., G.I. Ågren, S. Linder, T. Persson, M.F. Cotrufo, A. Ekblad, M. Freeman, A. Grelle, I.A. Janssens, P.G. Jarvis, S. Kellomäki, A. Lindroth, D. Loustau, T. Lundmark, R.J. Norby, R. Oren, K. Pilegaard, M.G. Ryan, Bjarni D. Sigurdsson, M. Strömgren, M. van Oijen & G. Wallin. 2007. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 171:275-296.
- Liski J., H. Ilvesniemi, A. Mäkelä & M. Starr. 1998. Model analysis of the effects of soil age, fires and harvesting on the carbon storage of boreal forest soils. *Eur. J. Soil Sci.* 49, bls. 407-416.
- Ragnhildur Sigurðardóttir. 2000. Effects of different forest types on total ecosystem carbon sequestration in Hallormsstaður forest, eastern Iceland, doktorsritgerð, Yale University, USA.
- Schelhaas, M.J., P.W. van Esch, T.A. Groen, B.H.J. de Jong, M. Kanninen, J. Liski, O. Masera, G.M.J. Mohren, G.J. Nabuurs, T. Palosuo, L. Pedroni, A. Vallejo & T. Vilén. 2004. CO2FIX V 3.1 – description of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. *ALTERRA Report* 1068. Wageningen, The Netherlands.