

# Norðlenskur iðnviður fyrir PCC á Bakka

---

*Lokaskýrsla 2021*





## Efnisyfirlit

Inngangur .....	2
Samantekt .....	3
Forsendur .....	4
Kísilmálmverksmiðja PCC BakkiSilicon hf. ....	4
Hráefni og kolefnislosun.....	4
Viðargæði .....	7
Gæðakröfur í kísilmálmvinnslu.....	7
Sýnataka og viðarefnamælingar .....	9
Niðurstöður efnagreininga .....	9
Túlkun niðurstaðna og álitaefni.....	10
Ný þekking á gæðum íslensks viðar.....	10
Umhverfi og viðarefnastyrkur .....	11
Kalsíum, vaxtarstaðir og vaxtarhraði.....	12
Ræktun og efnagæði .....	13
Grisjunarafli til 2050 .....	15
Viðaraflasvæði.....	15
Aldurskipting skóganna .....	15
Grisjunarafli til 2050 .....	15
Verð og afli .....	16
Hver á skóginn? .....	17
Land til asparræktunar .....	18
Viðarvöxtur og kolefnisbinding .....	19
Heimildir .....	19

## Inngangur

Á árinu 2020 hófst tveggja ára samstarfsverkefni Skógræktarinnar og PCC BakkiSilicon hf sem nefnist Norðlenskur iðnviður fyrir PCC á Bakka. Markmið verkefnisins er að kanna möguleika á notkun viðar úr norðlenskum skógum við framleiðslu verksmiðjunnar og meta hvort það er fýsilegt að rækta asparskóga Norðurlandi til að binda kolefni og skila viði fyrir verksmiðjuna á Bakka. Á árinu 2020 styrktu Samtök atvinnuþróunar og sveitarfélaga á Norðurlandi eystra (SSNE) fyrri áfanga verkefnisins um eina milljón króna og var styrkurinn hluti af áhersluverkefni SSNE 2020.

Fyrri áfangi verkefnisins skiptist í fjóra verkþætti:

- 1) hráefnisgæði lerkis, stafafuru, rauðgrenis og alaskaaspar fyrir kísiliðnað,
- 2) hve mikinn við má sækja í núverandi skóga?,
- 3) hve mikið land þarf til að mæta hráefnisþörf verksmiðjunnar?,
- 4) hve mikið land er innan marka hagkvæmrar flutningsleiðar til Bakka?.

Verkefnisstjóri er Dr. Brynjar Skúlason, sérfræðingur í trjákyrbótum hjá rannsóknastöð Skógræktarinnar á Akureyri. Á árinu 2020 voru aðalþátttakendur frá fyrirtækinu PCC BakkiSilicon hf þeir Ólafur Ármann Sigurðsson umhverfisstjóri og Dr. Gunnar B. Ólason sérfræðingur rannsóknastofu. Elma Sif Einarsdóttir tók þátt í undirbúningi verkefnisins fyrir hönd fyrirtækisins. Auk Brynjars tóku þátt af hálfu Skógræktarinnar þeir Þorbergur Hjalti Jónsson sérfræðingur í iðnviðarræktun og skógarhagfræði og Rúnar Ísleifsson skógarvörður á Norðurlandi Eystra. Björn Traustason, sérfræðingur í landupplýsingum hjá rannsóknastöð Skógræktarinnar tók saman upplýsingar úr gagnasöfnum Skógræktarinnar og úr gagnagrunni Nytjalands.

Í þessari skýrslu eru fyrst reifaðar forsendur verkefnisins og hráefnisgæði lerkis, stafafuru, rauðgrenis og alaskaaspar af Norðurlandi fyrir kísilmálmframleiðslu. Síðan er farið yfir hve mikinn við má sækja í núverandi skóga, hve mikið land þarf til að mæta hráefnisþörf verksmiðjunnar á Bakka og hve mikið land er innan marka hagkvæmrar flutningsleiðar til Bakka. Veigamestu niðurstöður eru settar fram í samantekt.

## Samantekt

Niðurstöður fyrri áfanga verkefnisins má draga saman í eftirfarandi lykilpunkta:

- Rannsókuð voru hráefnisgæði viðar með og án barkar af lerki, rauðgreni og stafafura úr Fnjóskadal og alaskaösp víðsvegar af landinu. Felld voru 10 tré af lerki, 10 tré af stafafuru og 10 af rauðgreni, alls 30 tré. Af alaskaösp voru mæld sýni af 32 trjám. Á rannsóknastofu PCC á Bakka var mælt bundið kolefni, heildarmagn kolefnis, rokgjörn efni, aska og styrkur brennisteins (S), járns (Fe), áls (Al), kalsíum (Ca), títans (Ti), fosfórs (P), króms (Cr), mangans (Mn), kopars (Cu), magnesíum (Mg), natríums (Na) og kalí (K) í viðnum. Einnig var reiknuð uppsöfnun efnanna í kísilmálmi sem gerður væri miðað við núverandi notkun viðarkurlis við framleiðsluna.
- Heildarmagn efna sem skila sér sem óhreinindi í kísilmálmi var í öllum tegundum innan við 0,5% af þurrmassa viðar án barkar sem er lágt í alþjóðlegum samanburði. Hærri gildi mældust í viði af alaskaösp og lerki en rauðgreni og stafafuru og hærri í viði með berki en án barkar. Allar tegundirnar með og án barkar reyndust hæft hráefni fyrir kísilmálmvinnslu miðað við núverandi hlutföll hráefna í framleiðslunni.
- Stafafura hvort heldur með eða án barkar reyndist úrvalshráefni og gæti hentað í viðarkol sem notuð væru í stað alls jarðefnakolefnis í ofnrekstrinum.
- Nýræktun skógar sem næði því marki myndi kolefnisjafna reksturinn áður en skógurinn yrði nýttur og með sjálfbærri skógrækt yrði hálfur kolefnisforðinn sem safnaðist upp við ræktunina varanlega bundinn á landinu.
- Innan 250 km flutningsleiðar til Bakka við Húsavík eru um 12.000 hektarar af ræktuðum skógi sem getur gefið grisjunarafla á næstu áratugum. Meginhluti skóganna var gróðursettur eftir 1990 og um 60% af skóginum er lerki.
- Án þess að skerða framleiðni skóganna er næstu árin mögulegt að sækja árlega tæplega 8.000 m<sup>3</sup> í skógana en viðaraflinn vex í um 36.000 m<sup>3</sup> um miðja öldina. Hve mikið verður hægt að grisja eftir þann tíma fer eftir því hve mikið verður gróðursett næstu áratugi.
- Við Eyjafjörð og í Þingeyjarsýslum eru um 22.400 ha af hentugu landi til asparræktunar. Vegin meðal flutningsvegaleið af hentugu asparlandi á svæðinu og til Bakka er um 90 km. Helmingur ræktunarlandsins er innan 75 km fjarlægðar (11.700 ha, 52%) og mest allt innan 100 km fjarlægðar (19.600 ha, 86%).
- Frá 20 – 25 ára aldri gætu 22.400 ha af góðu asparlandi gefið um 224.000 rúmmetra af bolviði árlega eða 128.000 tonn af viðarkurli á ári fyrir kísiliðnað á Bakka. Til að fullnægja núverandi kurlþörf kísilmálmverksmiðjunnar á Bakka þyrfti að rækta asparskóga á um 35% þessa svæðis sem hentar til asparræktunar við Eyjafjörð og í Þingeyjarsýslum. Til að fullnægja allri kurlþörf verksmiðjunnar eftir áformaða stækkun þyrfti að rækta iðnviðarskóg á um 70% alls góðs asparlands á svæðinu.
- Asparræktun á öllu góðu asparlandi í Eyjafirði og Þingeyjarsýslum gæti bundið um 9 milljón tonn af CO<sub>2</sub> á 20 árum (árleg koltvísýringsbinding um 400.000 tonn CO<sub>2</sub>).

## Forsendur

### Kísilmálmverksmiðja PCC BakkiSilicon hf.

PCC BakkiSilicon hf. starfrækir kísilmálmverksmiðju á Bakka við Húsavík sem hóf rekstur vorið 2018. Með fullum afköstum er ársframleiðslan 33.000 tonn af yfir 98% hreinum kísilmálm og fyrirtækið hefur heimild til stækkunar í 66.000 tonna ársframleiðslu.

Í fullum rekstri notar verksmiðjan 45.000 tonn af viðarkurli og um 8.000 tonn af viðarkolum.<sup>1</sup> Hingað til hefur allur viður og viðarkol verið flutt inn. Viðar- og viðarkolaflutningur er dýr og sjóflutningar til Íslands er um 40% af verði í innflutningshöfn. Nærtæk innlend hráefnislind gæti reynst hagkvæm og styrkt rekstraröryggi verksmiðjunnar.

Grisjun og nýting núverandi skóga á Norðurlandi gæti strax skilað iðnviði til reksturs verksmiðjunnar. Frá árinu 1988 hefur rannsóknastöð Skógræktarinnar á Mógilsá gert tilraunir með hraðvaxna asparskóga til viðarframleiðslu fyrir kísiliðnað. Allur ferillinn frá nýræktun til endurnýjunar hefur verið sannprófaður á 85 hektara tilraunaskógi á Sandlækjarmýri í Skeiða- og Gnúpverjahreppi auk afmarkaðra tilrauna víðsvegar um land. Nýræktun asparskóga á viðaraflasvæði verksmiðjunnar gæti á tveimur áratugum mætt hluta eða öllum framtíðarþörfum hennar og kolefnisjafnað reksturinn.

Verksmiðja PCC á Bakka leggur áherslu á framleiðslu hágæða kísilmálms með lítið kolefnisspor. Gæði framleiðslunnar ræðst öðru fremur af hreinleika hráefna sem notuð eru við framleiðsluna. Því eru hráefnisgæði norðlensks viðar forsenda þess að verksmiðjan noti innlendan við í stað innflutts.

Kaup verksmiðjunnar á viði úr norðlenskum skógum myndi skapa ný störf og styrkja afkomu skógræktar og tengdra atvinnugreina á svæðinu. Árið 2012 gerði kísiljárnverksmiðja Elkem Ísland langtímasamning við Skógræktina um kaup á grisjunarviði fyrir kísiljárnverksmiðju fyrirtækisins á Grundartanga. Þessi samningur skilar tekjum og atvinnu við grisjun og viðarflutninga sem fram að því voru hverfandi litlar. Grisjanir og viðarsala til verksmiðju PCC á Bakka gæti því haft veruleg jákvæð áhrif á atvinnulíf á Norðurlandi og einkum í dreifbýli.

### Hráefni og kolefnislosun

Verksmiðja PCC BakkiSilicon hf. framleiðir kísilmálm í ljósbogaofnum með kolefnisrafskautum og notar til þess kvarsít, kolefni og raforku. Í ofnunum er súrefni slitið frá kvarsíti ( $\text{SiO}_2$ ) við háan hita svo eftir situr kísilmálmur (Si) sem seytlar niður ofnfulluna, safnast neðst í ofninn og er tappað þaðan í deiglu. Áður en efnahvarfið gengur til baka hrifsar kolefnið til sín súrefnið og bindur í koleínóxíð ( $\text{CO}$ ) sem leitar upp úr ofnfullunni. Þar oxast það við súrefni og mynda koltvíoxíð ( $\text{CO}_2$ ) sem berst með útblæstri frá ofninum í andrúmsloftið.

Kolefnið fæst úr kolum, koxi, viðarkolum eða trjáviði. Kol og koks eru jarðefnakolefni og bruni þess bætir koltvíoxíði ( $\text{CO}_2$ ) við forða andrúmsloftsins og stuðlar að hlýnun jarðar. Viðarkol og trjáviður eru skógarkolefni úr hringrás kolefnis milli andrúmslofts og lífríkis jarðar. Bruni skógarkolefnis úr sjálfbærri skógrækt hefur ekki varanleg áhrif á hitajöfnuð lofthjúpsins. Endurnýjun og vöxtur skógarins tekur upp það kolefni sem losnaði við brunann. Í loftslagssáttmála Sameinuðþjóðanna og samþykktum sem á honum byggja er gerður skýr greinarmunur á kolefni eftir uppruna. Bruni skógarkolefnis úr sjálfbærri skógrækt í sífelldri hringrás endurnýjunar og nýtingar telst ekki kvótasett

<sup>1</sup> Kísilmálmverksmiðja á Bakka við Húsavík með allt að 66 þúsund tonna framleiðslugetu. Mat á umhverfisáhrifum. Matskýrsla, 21. maí 2013. Efla verkfræðistofa.

losun og sætir ekki takmörkunum. Allur bruni jarðefnakolefnis og bruni skógarkolefnis við skógeyðingu er kvótasett losun og sætir takmörkunum.

Kolefnisspor kísilfyrirtækja stafar fyrst og fremst af raforku og kolefnishráefnum. Aðrar uppsprettur eins og flutningar eru litlar saman borið við þessa aðalþætti. Víðast hvar utan Evrópu er raforka fyrir kísiliðnað að mestu fengin frá raforkuverum sem brenna jarðefnakolefni. Kolefnisspor kísilmálms og kísiljárns sem framleitt er með raforku frá jarðefnaorkuverum er mjög hátt. Kísiliðnaður á Evrópsku efnahagssvæði er að meginhluta í Noregi og á Íslandi. Hann nýtir raforku með lítið kolefnisspor sem að mestu fæst úr vatnsafls- og jarðvarmavirkjunum.

Mælt í kísilinnihaldi var heimsframleiðsla kísilmálms og kísilmálmblendis árið 2019 liðlega 7,7 milljón tonn<sup>2,3</sup>. Framleiðslan er mest í Kína en þeir framleiða um 64% af öllum kísilmálmi og kísilmálmblendi í heiminum. Hluttur Íslands er 1,1%. Kolefnisspor á hvert tonn kísilmálms frá verksmiðju PCC á Bakka er 5,0 CO<sub>2</sub>/t mg-Si en meðal kolefnisspor kísilmálms frá Kína er 17,7 CO<sub>2</sub>/t mg-Si.<sup>4</sup>

Um helmingur kolefnishráefna sem notuð eru í kísilmálmverksmiðja PCC á Bakka eru skógarkolefni sem er hátt hlutfall í alþjóðlegum samanburði. Á árinu 2018 var losun verksmiðjunnar 50.402 tonn af koltvíoxíði vegna bruna jarðefnakolefnis sem fellur undir losunarheimildir en 45.221 tonn losnuðu vegna bruna skógarkolefnis.<sup>5</sup> Skógarkolefni var því 47,3% af kolefnisnotkun verksmiðjunnar það ár.

Góð viðarkol eru besta hráefnið fyrir ofnrekstur kísilvera og við framleiðsluna er hægt að skipta öllu jarðefnakolefni út fyrir viðarkol.<sup>6,7</sup> Viðarkol er töluvert dýrara hráefni en steinkol úr jörðu og kolefnishráefni eru verulegur hluti rekstrarkostnaðar kísilvera.<sup>8</sup> Væri kostnaðarverð viðarkola álíka hátt eða lægra en jarðefnakolefnis yrði hagkvæmt að skipta jarðefnakolefni út fyrir skógarkolefni og verksmiðjurnar yrðu þá nánast kolefnishlutlausar.

Kísilfyrirtæki á Evrópsku efnahagssvæði verða að eiga losunarheimildir sem dugar fyrir allri starfseminni. Árið 2005 stofnaði Evrópusambandið viðskiptakerfi með losunarheimildir (ETS) fyrir stóriðju.<sup>9</sup> Frá árinu 2013 hefur Ísland og Noregur verið aðilar að ETS-markaðnum.<sup>10</sup> Á markaðnum geta fyrirtækin keypt og selt losunarheimildir.<sup>11</sup> Losunarheimildirnar rýrna eftir ákveðinni reglu og því þurfa fyrirtækin annað hvort að draga úr losun eða kaupa heimildir til að viðhalda eða auka framleiðslu.

<sup>2</sup> Kísilmálmur (hrákísill) og kísiljárn mælt sem hreinn kísill.

<sup>3</sup> Heimild: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> (September 2020).

<sup>4</sup> Heimild: [http://www.pcc.is/wp-content/uploads/2019/08/PCC-Si\\_Metal\\_TDS-v1.6-2019.pdf](http://www.pcc.is/wp-content/uploads/2019/08/PCC-Si_Metal_TDS-v1.6-2019.pdf), sótt 19.6.2020.

<sup>5</sup> [https://ust.is/library/Skrar/Einstaklingar/Mengandi-Starfssemi/Verksmidjur/PCC-Bakka/Gr%c3%a6nt%20B%c3%b3khalld\\_2018\\_PCC%20BakkiSilicon.pdf](https://ust.is/library/Skrar/Einstaklingar/Mengandi-Starfssemi/Verksmidjur/PCC-Bakka/Gr%c3%a6nt%20B%c3%b3khalld_2018_PCC%20BakkiSilicon.pdf) (Sótt 10.3.2021).

<sup>6</sup> Bodil Monsen, B., Grønli, M., Nygaard, L. & Tveit, H (2001). The use of biocarbon in Norwegian ferroalloy production. INFACON IX 2001, The Ninth International Ferroalloys Congress and the Manganese 2001 Health Issues Symposium. Official Proceedings pp 268-276. Quebec City, The Ferroalloys Association 2001. <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconIX/268-Monsen.pdf> (Sótt 13.4.2021).

<sup>7</sup> Surup, G. R., Trubetskya, A & Tangstad, M. (2020). Charcoal as an alternative reductant in ferroalloy production: A Review. Processes 2020, 8, 1432; doi:10.3390/pr8111432

<sup>8</sup> Heimild: Bogdan Marciniec and Julian Chojnowski (eds.). Progress in organosilicon chemistry. Gordon and Breach Publishers. Basel Sviss. 1995.

<sup>9</sup> Viðskiptakerfi ESB – ETS. <https://ust.is/loft/vidskiptakerfi-esb-ets/> (Sótt 30.10.2020)

<sup>10</sup> Lög um loftslagsmál, 2012/70. <https://www.althingi.is/lagas/nuna/2012070.html> (Sótt 3.11.2020).

<sup>11</sup> EU-ETS markaðurinn. [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en) (Sótt: 26.10.2020).

Evrópskur kísiliðnaður er í harðri samkeppni við innflutning sem að meginhluta hefur mikið hærra kolefnisspor. Útlend fyrirtæki sem flytja framleiðslu sína á Evrópumarkað þurfa ekki að kaupa ETS-heimildir fyrir sína framleiðslu. Þyrftu Evrópsk kísilver að greiða hátt gjald fyrir ETS-heimildir stæðu þau höllum fæti í samkeppni við meira mengandi innflutning.<sup>12</sup> Væri ekkert að gert myndi meira mengandi starfsemin ryðja minna mengandi Evrópskri framleiðslu af markaðnum. Þetta er nefnt kolefnisleki. Í reglum Evrópska viðskiptakerfisins með losunarheimildir er undanþáguákvæði fyrir fyrirtæki í þessari stöðu og þau fá heimildir sínar án greiðslu.<sup>13</sup> Þetta fyrirkomulag setur fyrir kolefnislekann en minna mengandi starfsemi hefur eftir sem áður lítið samkeppnisforskot.

Í desember 2019 kynnti framkvæmdastjórn Evrópusambandsins loftslagsstefnu sem miðar að grænni uppbyggingu Evrópu og nefndist „*European Green Deal*“.<sup>14</sup> Ísland og önnur lönd á Evrópsku efnahagssvæði eru aðilar að loftslags- og grænni uppbyggingarstefnu Evrópusambandsins. Með þessari stefnu á Evrópska efnahagssvæðið að verða kolefnishlutlaust árið 2050. Jafnframt á að efla efnahaginn, bæta heilsufar, lífsgæði og hlú að náttúrunni. Þetta á að gera þannig að allir Evrópubúar njóti ávaxtanna.<sup>15</sup>

Mikilvægur hluti stefnunnar er innleiðing kolefnistolla sem nema kolefnisspori vörunnar og fylgdu verði losunarheimilda á ETS-markaði.<sup>16,17</sup> Gjaldið legðist bæði á frumframleiðslu svo sem kísilmálm og kísiljárn og fullunnar vörur svo sem bíla eða sílikonkítta. Evrópskir framleiðendur í ETS-kerfinu sem flytja framleiðslu sína til landa utan Evrópska efnahagssvæðisins munu við útflutninginn fá losunargjöld sín endurgreidd. Um leið falla niður undanþágur á greiðslu fyrir ETS-heimildir fyrir mengandi starfsemi í samkeppni við meira mengandi innflutning (kolefnisleka).

Þetta kerfi gefur minna mengandi starfsemi á Evrópsku efnahagssvæði forskot í samkeppni við meira mengandi starfsemi. Jafnframt hækkar kostnaðarverð jarðefnakolefnis vegna kaupa á ETS-heimildum. Möguleikar kísilfyrirtækja til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda frá hráefnanotkun felast fyrst og fremst í að skipta jarðefnakolefni út fyrir skógarkolefni. Áhrifin verða væntanlega þau að skógarkolefni verður notað í meira mæli við framleiðsluna.

Nýræktun skógar sem gæti að hluta eða öllu leiti staðið undir þörf verksmiðjunnar á Bakka fyrir kolefnishráefni myndi binda mikið kolefni úr andrúmslofti. Bindingin verður áður en kemur að nýtingu skógarins og við sjálfbæra nýtingu yrði meira en helmingur kolefnisforðans varanlega

---

<sup>12</sup> <https://chinadialogue.net/en/business/eu-can-expect-heavy-pushback-carbon-border-tax/> (Sótt: 26.10.2020).

<sup>13</sup> Carbon leakage (Kolefnisleki). Sectors facing carbon leakage receive higher share of free allocation In phase 3 of the EU ETS, for each ETS installation, the amount of free allocation is calculated based on a formula where its production quantity (in tonnes of product) is multiplied with the benchmark value for that particular product (measured in emissions per tonne of product). Installations in sectors exposed to a significant risk of carbon leakage in principle are eligible to receive free allocation at 100% of this quantity. [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage_en) (Sótt 1.11.2020). Sjá einnig COMMISSION DELEGATED DECISION (EU) 2019/708 of 15 February 2019 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2019:120:FULL> (Sótt 1.11.2020) og Free allocation [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances_en) (Sótt 1.11.2020).

<sup>14</sup> [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (Sótt: 26.10.2020).

<sup>15</sup> [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/e%20n/ip\\_19\\_6691](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/e%20n/ip_19_6691) (Sótt 2.11.2020).

<sup>16</sup> <https://www.bcg.com/publications/2020/how-an-eu-carbon-border-tax-could-jolt-world-trade> (Sótt: 26.10.2020).

<sup>17</sup> <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/opinion/why-europe-should-champion-a-carbon-border-tax/> (Sótt: 26.10.2020).



bundinn í skóginum. Ræktunin gæti því að hluta til eða öllu leiti kolefnisjafnað starfseminna á Bakka. Binding í skógi getur ekki komið í stað breytinga á hráfnisnotkun. Binding með skógrækt er utan ETS-markaðarins og fyrirtæki á ETS-markaði geta ekki sett staðfesta bindingu í skógrækt á móti losun.

Hér er fjallað um möguleika skógræktar á Norðurlandi til að skila hráefni fyrir núverandi þörf fyrirtækisins fyrir viðarkurl og frumkönnun á efnagæðum viðarins.



Viðarkurl fyrir kísilmálmverksmiðjuna á Bakka er grófskorið og af trjám án barkar. Stafafuruviður á Norðurlandi er mjög efnasauður og má sennilega nota með berki og þar með lækka vinnslukostnað. Ljósmynd: Ólafur Ármann Sigurðsson 2020.

## Viðargæði

*Hráfnisgæði lerkis, stafafuru, rauðgrenis og alaskaaspar fyrir kísiliðnað*

## Gæðakröfur í kísilmálmvinnslu

Í kísiliðnaði ráðast gæði kolefnisgjafa mest af bundnu kolefni (Fix C) og snefilefnum sem lenda í málmbráðinni. Bundið kolefni er það kolefni sem situr eftir að aflokinni kolun við háan hita og án súrefnis. Magn og samsetning snefilefnanna ræður mestu um málmgæðin og þar með markaðshorfur og söluverð.



Gæðakröfur eru aðrar fyrir kísilmálm en kísiljárn og mismunandi gæðaflokkar kísilmálms krefjast ólíkra hráefnisgæða. Kísilmálmur sem PCC á Bakka framleiðir hefur auglýst hámarksgildi fyrir kalsíum (Ca), járn (Fe) og ál (Al) (1. tafla). Framleiðslan er viðkvæm fyrir háum gildum þessara snefilefna í kolefnishráefnum sem eru kol, koks, viðarkurl og viðarkol. Fleiri efni skipta máli s.s. fosfór (P), títan (Ti) og bór (B).

Án mælinga er ógerningur að meta heildarmagn eða styrk einstakra snefilefna í viðnum og hvort þau eru innan gæðamarka. Efnastyrkurinn fer eftir tegund, vaxtarstað og vexti trjána. Viðarafli sem gæti nýst í rekstri kísilmálmverksmiðju PCC á Bakka næstu tvo áratugi er að mestu grisjanir úr núverandi skógum. Þrjár tegundir barrtrjáa gætu gefið mestan viðarafa: lerki, rauðgreni og stafafura. Af þeim sökum þurfti að rannsaka sérstaklega snefilefni í grisjunarviði á Norðurlandi. Einnig þurfti að kanna hvort asparviður sem kynni að verða ræktaður og ætlaður væri sem hráefni í verksmiðjuna uppfylli gæðakröfur.

Verksmiðja PCC á Bakka notar birktan við (án barkar) og yfirleitt er það talið nauðsynlegt í kísilmálmvinnslu vegna snefilefna í hráefninu. Kísiljárnverksmiðja Elkem Ísland á Grundartanga getur notað íslenskan við með berki. Hugsanlega gæti kísilmálmverksmiðjan á Bakka notað óbirktan við í hluta framleiðslu sinnar og því þarf að skoða snefilefni í norðlenskum viðum með og án barkar. Þegar á hólminn er komið getur snefilefnamagn og kostnaður ráðið úrslitum um hagkvæmni grisjana og iðnvíðarræktunar á Norðurlandi.

**1. tafla. Lágmarks kísilstyrkur (Si%), hámarks járnstyrkur (Fe%), hámarks álstyrkur (Al%) og hámarks kalsíumstyrkur (Ca%) í prósentu af massa kísilmálms af sex gerðum sem framleiddar eru hjá PCC BakkaSilicon hf.** Heimild: [http://www.pcc.is/wp-content/uploads/2019/08/PCC-Si\\_Metal\\_TDS-v1.6-2019.pdf](http://www.pcc.is/wp-content/uploads/2019/08/PCC-Si_Metal_TDS-v1.6-2019.pdf), sótt 19.6.2020.

Kísilvörur <i>Gerð</i>	Lágmark (%) <i>Si</i>	Hámark (%)		
		<i>Fe</i>	<i>Al</i>	<i>Ca</i>
PCC BakkiSilicon 97	97,00%	1,80%		
PCC BakkiSilicon 553	98,50%	0,50%	0,50%	0,30%
PCC BakkiSilicon 441	99,00%	0,40%	0,40%	0,10%
PCC BakkiSilicon 3303	99,00%	0,30%	0,30%	0,03%
PCC BakkiSilicon 2510	99,00%	0,25%		0,10%
PCC BakkiSilicon 2202	99,00%	0,20%	0,20%	0,02%

## Sýnataka og viðarefnamælingar

Haustið 2020 tók skógarvörður Skógræktarinnar á Vöglum í Fnjóskadal að sér að fella og taka viðarsýni af lerki, stafafuru og rauðgreni úr skógum í Þingeyjarsýslum sem komnir eru að grisjun, eru við ólíkar aðstæður og eru vel skráðir. Felld voru 10 tré af lerki, 10 tré af stafafuru og 10 af rauðgreni, alls 30 tré. Valdir voru tveir reitir af hverri tegund og felld 5 tré á reitnum. Valdir voru reitir í Fnjóskadal þar sem fyrir liggja upplýsingar um stað, aldur og kvæmi. Lerki var tekið úr reitum á Hálsmelum og í reit 33 við Vagli. Rauðgreni var felld úr reit 75 í Þórðarstaðaskógi og 136 í Vaglaskógi. Stafafura var sótt í reit 139 í Vaglaskógi og 57 við Vagli. Af hverju tré voru teknar tvær þversneiðar úr brjósthæð, ca. 1-1,5 cm þykkar með berkinum á. Báðar sneiðar (úr sama tré) voru sett saman í poka og merkt úr hvaða reit sýnið var tekið. Börkur var tekinn af annarri sneiðinni úr hverju tré en hin sneiðin hélt berkinum. Í október 2020 voru sýnin send til efnagreiningar hjá PCC BakkiSilicon hf. og var mælingum lokið í upphafi árs 2021.

Árið 2012 voru mæld og felld tré af alaskaasparklónanum lðunni á 42 stöðum víðsvegar um land. Trjánnum var öllum plantað vorið 1991 utan einu sem plöntun var frestað til 1992. Trén uxu flest á lífrænum jarðvegi (Histosol eða Histic Andosol) en að öðru leiti við mjög ólíkar aðstæður. Á 21. sumri var minnsta tréð 1 m hátt en það hæsta 11,4 m. Þessi tré sýna vel breytileikann í vexti alaskaaspar hér á landi.<sup>18</sup>

Tvær slembivaldar (random) sneiðar voru skornar í mismunandi hæð úr stofni allra aspartrjánna. Börkur var tekin af annarri sneiðinni en hafður á hinn. Sneiðarnar voru klofnar í geira út frá mergnum í miðjum stofni. Þann 23.7.2020 voru sýni af 43 trjám án barkar (sýni A) send til efnagreiningar á Bakka og þann 6.8.2020 fóru sýni með berki af 34 trjám til PCC á Bakka ásamt sýnum af 9 trjám sem ýmist voru með berki eða án barkar. Efnamælingar á 32 asparsýnum var lokið 9.12.2020.

Í viðarsýnum af lerki, rauðgreni, stafafuru og alaskaösp var mældur viðarraki, rokgjörn efni, aska, bundið kolefni, heildar kolefni, brennisteinn (S) og oxíð eftirtalinna frumefna: járn ( $Fe_2O_3$ ), ál ( $Al_2O_3$ ), kalsíum (CaO), títan ( $TiO_2$ ), fosfór ( $P_2O_5$ ), króm ( $Cr_2O_3$ ), mangan (MnO), kopar (CuO), magnesíum (MgO), natríum ( $Na_2O$ ) og kalí ( $K_2O$ ).

## Niðurstöður efnagreininga

Meðalgildi fyrir bundið kolefni var um 20% og heildar kolefni um 50% af þurrvigt ókolaðs viðar. Gildin voru lítið eitt lægri fyrir alaskaösp en barrviði og aðeins hærri fyrir við með berki en án barkar (2. tafla).

Meðalgildi fyrir ösku (heildarmagn snefilefna) var í öllum tilvikum undir 1% (2. tafla). Aska var um 0,2% í sígrænu barrtrjánnum rauðgreni og stafafuru og í þessum tegundum var öskugildi og styrkur mældra efna lítið hærri í viði með berki en án barkar. Öskugildin voru liðlega tvöfalt hærri í alaskaösp og nærri því marki í lerki. Hjá alaskaösp og lerki voru öskugildin töluvert hærri í viði með berki en án barkar. Hjá alaskaösp var töluverður munur á öskugildum og efnastyrk milli vaxtarstaða en öskugildin fylgdu ekki vaxtarhraða trjánna. Gerð verður nánari greining til að kanna hvað einkennir staði með hagstæð efnagildi.

---

<sup>18</sup> Thorbergur Hjalti Jónsson & Ólafur Stefán Arnarson. Growth to the age of 20 years of Black Cottonwood in Iceland (handrit sent til birtingar í Icelandic Agricultural Sciences).

**2. tafla. Meðalgildi (% þurrefni) fyrir rokgjörn efni (RE), ösku (eftir bruna), bundið kolefni (FixC, viðarkol), heildarkolefni (C) og brennisteinn (S), járnnoxíð (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), áloxíð (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kalsíumoxíð (CaO), títanoxíð (TiO<sub>2</sub>), fosfóroxíð (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), krómoxíð (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), manganoxíð (MnO), koparoxíð (CuO), magnesíumoxíð (MgO), natríumoxíð (Na<sub>2</sub>O) og kalíumoxíð (K<sub>2</sub>O) í viðarsýnum af alaskaösp (AÖ), lerki (LE), rauðgreni (RG) og stafafuru (SF) með berki (M) og án barkar (Á). Gögn: PCC BakkiSilicon hf./ Gunnar B. Ólason.**

Tegund	RE	Aska	FixC	C	S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CuO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
AÖ-Á	81,8	0,47	17,5	47,0	1,4	0,0022	0,0007	0,0697	0,0002	0,0108	0,0003	0,0007	0,0001	0,0105	0,0018	0,0873
AÖ-M	80,9	0,74	18,2	47,3	0,8	0,0033	0,0018	0,1529	0,0010	0,0155	0,0003	0,0009	0,0001	0,0171	0,0027	0,1289
LE-Á	79,1	0,35	20,1	50,0	1,1	0,0014	0,0010	0,0577	0,0000	0,0071	0,0001	0,0056	0,0001	0,0077	0,0008	0,0591
LE-M	78,1	0,42	21,3	49,2	1,3	0,0025	0,0036	0,0801	0,0006	0,0148	0,0000	0,0077	0,0002	0,0107	0,0012	0,0686
RG-Á	79,2	0,29	20,4	48,6	1,3	0,0015	0,0006	0,0843	0,0001	0,0032	0,0002	0,0027	0,0001	0,0038	0,0008	0,0420
RG-M	78,8	0,30	20,7	48,6	1,3	0,0024	0,0012	0,1525	0,0005	0,0055	0,0001	0,0035	0,0001	0,0050	0,0011	0,0578
SF-Á	80,2	0,19	19,0	50,9	1,1	0,0017	0,0007	0,0500	0,0001	0,0029	0,0002	0,0030	0,0001	0,0077	0,0016	0,0383
SF-M	79,9	0,28	19,4	49,9	1,3	0,0022	0,0014	0,0623	0,0003	0,0037	0,0002	0,0032	0,0001	0,0088	0,0017	0,0439

Tegund: AÖ-Á: Alaskaösp án barkar, AÖ-M: Alaskaösp með berki, LE-Á: Lerki án barkar, LE-M: Lerki með berki, RG-Á: Rauðgreni án barkar, RG-M: Rauðgreni með berki, SF-Á: Stafafura án barkar, SF-M: Stafafura með berki.

Í núverandi rekstri kísilmálmverksmiðjunnar á Bakka gefur viðarkurl nærri helming kolefnis fyrir framleiðslu kísilmálms (600 kg viðarkurls á tonn kísilmálms). Íslenskur viður með efnastyrk samkvæmt 2. töflu myndi gefa tiltölulega hreinum kísilmálm (3. tafla) hvort sem notaður væri viður með eða án barkar.

**3. tafla. Uppsöfnun snefilefni í kísilmálmi (hlutfall af massa kísils) sem framleiddur er með viðarkurli af alaskaösp (AÖ), lerki (LE), rauðgreni (RG) eða stafafuru (SF) ýmist með (M) eða án barkar (Á). Meðalgildi fyrir járn (Fe), ál (Al), kalsíum (Ca), títan (Ti), fosfór (P), króm (Cr), mangan (Mn), kopar (Cu), magnesíum (Mg), natríum (Na) og kalíum (K). Forsendur: Efnastyrkur í viðri með og án barkar samkvæmt 2. töflu, 0,6 tonn viðarkurls notuð fyrir hvert tonn af kísilmálmi (auk annarra kolefnisgjafa) og 80% endurheimtur á málm. Gögn: PCC BakkiSilicon hf./ Gunnar B. Ólason.**

Tegund	Fe	Al	Ca	Ti	P	Cr	Mn	Cu	Mg	Na	K
AÖ-Á	0,0011	0,0002	0,0352	0,0001	0,0006	0,0002	0,0004	0,0001	0,0045	0,0009	0,0431
AÖ-M	0,0016	0,0007	0,0772	0,0004	0,0009	0,0002	0,0005	0,0001	0,0073	0,0013	0,0637
LE-Á	0,0007	0,0004	0,0291	0,0000	0,0004	0,0000	0,0031	0,0001	0,0033	0,0004	0,0292
LE-M	0,0012	0,0014	0,0404	0,0002	0,0008	0,0000	0,0042	0,0001	0,0046	0,0006	0,0339
RG-Á	0,0007	0,0002	0,0426	0,0000	0,0002	0,0001	0,0015	0,0000	0,0016	0,0004	0,0207
RG-M	0,0012	0,0005	0,0770	0,0002	0,0003	0,0001	0,0019	0,0001	0,0021	0,0006	0,0286
SF-Á	0,0008	0,0002	0,0252	0,0000	0,0002	0,0001	0,0017	0,0000	0,0033	0,0008	0,0189
SF-M	0,0011	0,0005	0,0315	0,0001	0,0002	0,0001	0,0018	0,0000	0,0038	0,0008	0,0217

Tegund: AÖ-Á: Alaskaösp án barkar, AÖ-M: Alaskaösp með berki, LE-Á: Lerki án barkar, LE-M: Lerki með berki, RG-Á: Rauðgreni án barkar, RG-M: Rauðgreni með berki, SF-Á: Stafafura án barkar, SF-M: Stafafura með berki.

## Túlkun niðurstaðna og álitaefni

Bundið kolefni er sá hluti kolefnis í viðnum sem situr eftir við kolun í súrefnislausu umhverfi og nýtist í kísiliðnaði. Í þessari rannsókn var bundið kolefni áþekkt og í öðrum viðri sem hentar til kísilvinnslu. Hærra bundið kolefni mældist í viðri með berki en án barkar og skýrist af hærri heildarkolefni í berki en viðri. Hærri styrkur snefilefna var í viðri með berki en án barkar. Í kísilmálmvinnslu þykir yfirleitt nauðsynlegt að fjarlægja börkinn. Niðurstöður þessarar rannsóknar benda til að það sé ónauðsynlegt og sé óþarft fyrir stafafuru.

## Ný þekking á gæðum íslensks viðar

Styrkur og samsetning snefilefna í viðri og berki er mjög breytilegur eftir vaxtarstöðum og trjátegund og verða ekki metin nema með mælingum. Fyrir rannsókn PCC BakkiSilicon og Skógræktarinnar voru mjög litlar og sumpart óljósar upplýsingar um efnagæði íslensks viðar og gæði hans fyrir kísiliðnað.



Íslenska Járnblendifélagið mældi árið 1982 bundið kolefni og snefilefni í nokkrum sýnum af grönnum víðistofnum frá Fljótsdalshéraði. Mælingarnar voru gerðar vegna kísilmálmverksmiðju sem þá var áformuð á Reyðarfirði (IJ 1982). Elkem Ísland réðst árið 2010 í 1000 tonna tilraunavinnslu á íslenskum grisjunarviði með berki í kísiljárnverksmiðju sinni á Grundartanga. Skógræktin hefur ekki niðurstöður efnamælinga en viðurinn taldist hæfur til vinnslu og Elkem Ísland gerði árið 2012 langtíma samninga við Skógræktina um kaup á viðarkurli úr grisjunum.

Framleiðsla kísiljárns er mjög viðkvæm fyrir titani (Ti) í viðnum og íslenskur jarðvegur er títaníkur. Því mátti búast við háum títangildum í íslenskum trjám. Niðurstöður framleiðslutilraunar Elkem Ísland frá 2010 sýndu að viðinn þurfti ekki að birkja en Skógræktin varð að taka upp útkeyrslu viðar úr skógi á sérstökum vögnum í stað þess að draga viðinn út með spili. Þannig var minni moldarmengun utaná stofnunum. Niðurstöður þessarar rannsóknar PCC BakkiSilicon og Skógræktarinnar staðfesta að íslenskur viður er títansnauður og það þótt íslenskur jarðvegur sé títaníkur. Skýringin á því er væntanlega sú að leysni títans er nánast engin í jarðvegsvatni sem er ísúrt eða nærri hlutlaust (hvorki súrt né basískt). Trén taka því mjög lítið títan úr jarðveginum. Þetta dæmi sýnir að viðargæði fyrir kísiliðnað verða ekki metin af ályktunum einum heldur þarf beinar rannsóknir til að meta kosti viðarins.

### Umhverfi og viðarefnastyrkur

Kalsíum og kalíum eru langalgengustu snefilefnin í norðlenskum viði (2. tafla). Flest efni eru í lágum styrk. Járn og ál virðast langt undir styrk sem hafi áhrif á kísilmálmgæði (sjá hámarksgildi í 1. töflu reiknuð gildi í 3. töflu). Kalsíum og fosfór eru þau efni í norðlenskum viði sem helst geta reynst takmarkandi fyrir kísilmálmvinnslu. Hér er því fjallað nánar um styrk þessara efna í viði og möguleika á ræktun hágæða iðnviðar.

Ystu áhringir viðarins nefnast rysja en innri hluti stofnsins nefnist kjarnviður. Styrkur kalsíums og fosfórs er mjög misjafn milli tegunda og milli rysju og kjarnviðar í trjámum (Meerts 2002). Þótt rysjan sé að mestu dauðar viðarfrumur er einnig í henni lifandi forðavefur (parencyma) sem getur tekið til sín eða skilað frá sér efnun. Styrkur efnanna í rysjunni getur breyst innan ársins og frá ári til árs (Hagemeyer et al. 1992) og fylgir styrk efnanna í umhverfinu (Hagemeyer & Weinand 1996). Falli efnastyrkur í ystu áhringjum rysjunnar færast efni frá eldri hringjum til þeirra yngri (Donnelly et al. 1990). Þess vegna sjást sjaldan merki um styrkbreytingar í umhverfinu í efnastyrk í tilteknum áhringjum í rysjunni (Hagemeyer et al. 1992, Hagemeyer & Shin 1995, Balk & Hagemeyer 1994). Þrátt fyrir að flest snefilefni séu mjög hreyfanleg í rysjunni geta sum efni t.d. klóríð skilið eftir varanlegt merki um styrkbreytingar í veggjum vaxandi viðarfruma (Foster & Sands 1977).

Fjöldi rannsókna hefur sýnt fram á að efnastyrkur í viðnum er hæstur næst mótum rysju og kjarnviðar (Katayama et al. 1986, Queirolo et al. 1991, Guyette et al. 1991, Hagemeyer 1995, Hagemeyer & Schafer 1995, Eklund 1995). Trén virðast færa efnin frá yngsta viðarvextinum að mótum rysju og kjarnviðar (Hagemeyer & Lohrie 1995). Á mörkum rysju og kjarnviðar virðist efnastyrkurinn rísa og hníga í takt við efnastyrkinn í umhverfinu (Yanosky et al. 1995, Vroblesky & Yanosky 1990).

Í kjarnviði eru engar lifandi forðafurur og þar virðist efnastyrkur stöðugur í sama áhring frá einu ári til annars (Hoffmann et al. 1996). Fjöldi rannsókna hefur sýnt að efnastyrkur í kjarnviði sýnir sögu efnabreytinga í umhverfinu (Baes & McLaughlin 1984, Baes & Ragsdale 1981, Baes et al. 1984, Berish & Ragsdale 1985, Bondietti et al. 1989, Hansen & Huttunen 1989, Jiang 1996, Kardell & Larsson 1978,

Matusiewicz & Barnes 1985, Qian et al. 1993, Queirolo & Valenta 1987, Queirolo et al. 1990, Robitaille 1981, Rolfe 1974, Tendel & Wolf 1988).

### Kalsíum, vaxtarstaðir og vaxtarhraði

Kalsíum (Ca) er yfirleitt algengasta snefilefnið í viði og verksmiðjan á Bakka gerir kröfur um lág kalsíumgildi (1. tafla). Íslenskur jarðvegur er kalsíumsnauður og því hefði mátt búast við lágum gildum. Mæling frá 1982 á snefilefnum í víðistofnum frá Fljótsdalshéraði benti til að kalsíum væri í hærra lagi en innan gæðamarka fyrir kísilmálmverksmiðju sem þá var áætluð á Reyðarfirði (IJ 1982). Alaskaasparviður var með hæstu kalsíumgildin af þeim fjórum tegundum sem rannsakaðar voru sem hugsanlegt hráefni fyrir verksmiðju PCC á Bakka. Í alaskaasparviði mældist styrkurinn að meðaltali  $498 \pm 84$  mg Ca á kg þurrefnis (N = 32, meðaltal  $\pm$  staðalfrávik). Til samaburðar gaf Meerts (2002) mun hærri gildi fyrir alaskaösp, 980 mg Ca á kg þurrefnis í rysju og 1.920 mg Ca á kg þurrefnis í kjarnviði.

Kalsíumstyrkur í viðnum er ólíkur milli tegunda og almennt virðist hann heldur hærri í lauftrjám en barrtrjám (Meerts 2002). Innan sömu ættkvíslar getur munað miklu á kalsíumstyrk milli tegunda (Lambert 1981). Tegundir kjósa sér ólíkan jarðveg og það er óljóst að hve miklu leiti munur milli tegunda á efnastyrk í viðnum stafar af jarðvegi eða tegund (Meerts 2002).

Magn snefilefna í viðnum ræðst mikið til af jarðvegi vaxtarstaðarins. Sem dæmi þá skýrði kalsíum í jarðvegi 62% af breytileika í kalsíumstyrk í viði sykurlhlyns (*Acer saccharum* Marsh) í Ontario-fylki í Kanada (Watmough 2002). Sýrustig jarðvegsins hefur einnig mikil áhrif á upptöku kalsíums (Guðleifsson & Schnug 1990, Watmough 2002). Þeir Andrews et al. (1999) báru saman efnastyrk í rysju og kjarnviði hvítsýprustrjáa (*Chamaecyparis thyoides* (L.) Britton) á jarðvegi með nánast sama sýrustig en tíföldum mun á kalsíum í jarðvegi. Kalsíumstyrkur í kjarnviði var meira en tvöfalt hærra í trjám á kalsíumríkum en á kalsíumsnaðum jarðvegi (4. tafla).

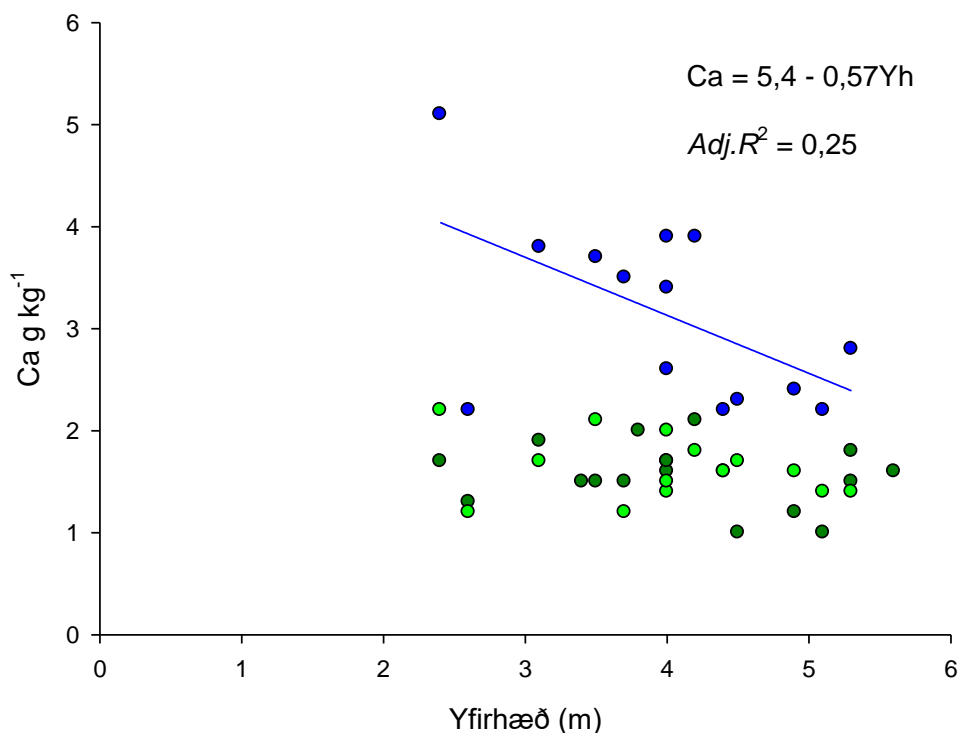
#### 4. tafla. Sýrustig jarðvegs (pH), Ca í jarðvegi, rysju og kjarnviði hvítsýprustrjáa (*Chamaecyparis thyoides* (L.) Britton) tveimur vaxtarstöðum á Austurströnd Bandaríkjanna (Andrews et al. 1999).

Vaxtarstaður	Sýrustig, pH-gildi log[H <sup>+</sup> ]	Jarðvegur mg Ca kg <sup>-1</sup>	Rysja mg Ca kg <sup>-1</sup>	Kjarnviður mg Ca kg <sup>-1</sup>
North Madison, Connecticut, USA	4,4	5.821	638	482
Pomona, New Jersey, USA	4,0	589	613	226

Áfok hefur mikil áhrif á jarðveg og jarðvegseiginleika hér á landi (Arnalds 2008). Þessi áhrif eru afgerandi á lífrænan jarðveg (Histosol og Histic Andosol) og birtast m.a. í því að þar sem áfokið er minna er jarðvegurinn súrari. Bjarni Guðleifsson og Evald Schnug (1990) sýndu að grös áttu erfitt með að ná upp nægu kalsíum í mýramold hér á landi einkum þar sem jarðvegurinn var tiltölulega súr (pH gildið var lágt). Upplýsingar vantar um sýrustig jarðvegs á vaxtarstöðum aspanna sem rannsakaðar voru vegna hráefnisgæða fyrir verksmiðjuna á Bakka en lítið kalsíum í íslenskum jarðvegi og sýrustig jarðvegsins gæti að nokkru leiti skýrt mun milli staða í kalsíumstyrk.

Vaxtarhraði trjána og þynning með vexti gæti einnig skipt máli fyrir kalsíumstyrk í viðnum. Árið 1983 voru mældir stafafurulundir í Suður- Þingeyjarsýslu sem gróðursettir voru á árunum kringum 1960, flestir árið 1959. Mældir voru samtals 18 reitir, sex reitir í Fnjóskadal, sex í Bárðardal og Köldukinn og sex reitir í Rykjadal og Aðaldal. Auk trjámælinga voru tekin barr- og jarðvegssýni til efnagreininga.

Mælingar á styrk kalsíums í barrsýnum sýndi að styrkur í barri á fyrsta sumri var álíka mikill á öllum vaxtarstöðum bæði úr toppi trjána og neðarlega í trjákrónunni. Styrkur kalsíums í þriggja ára gömlu barri af grein neðarlega í trjákrónunni var hærri en í unga barrinu en féll með auknum vexti trjána (Jónsson 1985, Mynd 1). Mismunur fosfórstyrks milli eins árs og þriggja ára barrs neðarlega í trjákrónunni féll einnig marktækt með vexti trjána. Þessar niðurstöður benda til að upptaka kalsíums og fosfórs fylgir ekki auknum vexti og því þynnist efnastyrkurinn í trénu. Því þurfi tiltölulega hraðvaxnar furur í Suður-Þingeyjarsýslu fremur að endurnýta fosfór og kalsíum safnist síður í gamalt barr en hjá hægvoxnum trjám. Kalsíum- og fosfórstyrkur í viðnum gæti því einnig fallið með auknum vaxtarhraða trjána. Sé þessi tilgáta rétt gæti hún haft grundvallaráhrif á möguleika skógræktar á Norðurlandi til að framleiða gæða viðarkurl fyrir verksmiðju PCC á Bakka.



**Mynd 1.** Styrkur kalsíums (Ca% af þurrefni) í fyrsta árs barri úr toppi (dökkgrænir punktar), í fyrsta árs barri á grein neðarlega í trjákrónunni (ljósgrænir punktar) og þriggja ára barri á grein neðarlega í krónu (bláir punktar) eftir yfirhæð 23 ára stafafurutrjáa á 18 stöðum í Suður-Þingeyjarsýslu. Línulegt fall af kalsíum með yfirhæð er sýnt (blá lína) ásamt jöfnu fallsins (Heimild: Jónsson 1985).

### Ræktun og efnagæði

Norðlenskur stafafuruviður með eða án barkar var snefilefnasnauður og gott hráefni fyrir núverandi hráefnablöndu verksmiðjunnar á Bakka og fyrir viðarkol sem gætu að fullu komið í stað jarðefnakolefnis við vinnslu hágæðakísilmálms. Furan hefur lág fosförgildi sem er mikilvægur kostur fyrir hágæðavinnslu. Núverandi skógar á Norðurlandi eru að hluta stafafura en þeir geta ekki skilað nema litlum hluta hráefnisparfar verksmiðjunnar á Bakka. Stafafura vex vel á tiltölulega rýru landi og hana mætti rækta með árangir á meginhluta þurrlendis á Norðurlandi. Ræktunarlota fyrir iðnviðarnýtingu er um 40 – 50 ár og því tæki langan tíma að fá gæða hráefnislind sem munaði um í rekstri kísilmálmverksmiðjunnar á Bakka.



Stafafura vex ágætlega eftir að 15 – 20 ára aldri er náð en hægt í æsku og verður á þeim aldri oft fyrir barrskaða á Norðurlandi (Jónsson 1985). Úr tilraunum hér á landi eru margar vísbendingar um að hægt sé að ná betri árangri við nýræktun stafafuru. Í tilraun í Svíþjóð bar Mattson og samstarfsmenn hans (2007) saman jarðvinnsluaðferðir með og án lúpínusáningar við nýræktun stafafuru á ófrjóu lynglendi. Lúpínunni var sáð um leið og furan var gróðursett. Átján árum eftir gróðursetningu var viðurvöxtur stafafurunnar tvöfalt meiri með lúpínu en án lúpínu. Áhrif lúpínunnar eru fyrst og fremst vegna niturs sem örvar vöxtinn. Meiri vöxtur myndi sennilega leiða til lægri snefilefnastyrks og betri viðargæða en það er ósennilegt að hægt sé að stytta ræktunarlotu stafafurunnar um meira en áratug. Hún getur því tæplega fullnægt hráefnisþörf verksmiðjunnar á Bakka fyrr en eftir 30 – 40 ár.

Alaskavíðir og jörfavíðir geta skilað hráefni á 10 – 15 ára uppskerulotu. Til að ná fullum afköstum verður víðirinn að vaxa þétt og landið þarf að þaulrækta. Víðinn yrði að nota með berki því birking grannra víðistofna er tæplega raunhæf. Mælingar á efnagæðum sem gerðar voru árið 1982 bentu til að víðirinn væri nothæft hráefni fyrir kísilmálmframleiðslu en snefilefnastyrkur helst til hár fyrir gæðaframleiðslu. Víðiakrar geta tæplega orðið hagkvæmir vegna hás stofnkostnaðar og hás uppskerukostnaðar á framleitt tonn. Þeir gætu þó verið tímabundin lausn.

Alaksaösp gæti reynst hagkvæm ræktun og skilað grisjunum á um eða innanvið 20 árum. Raunhæf ræktunarlotu fyrir iðnvíðarræktun alaskaaspar er 25 – 40 ár og hefur verið sannprófuð í 85 ha tilraunaskógi á Sandlækjarmýri í Skeiða- og Gnúpverjahreppi. Ræktun hennar gæti því brúað bilið þar til stafafuran skilar nægu hráefni.

Í þessari rannsókn PCC BakkiSilicon og Skógræktarinnar var fosfór í asparviði að meðaltali  $47 \pm 20$  mg P á kg þurrefnis (meðaltal  $\pm$  staðalfrávik). Samanborið við erlendar mælingar virðist íslenskur asparviður fremur snefilefnasnaður. Sem dæmi má taka gaf Meerts (2002) fosfór í alaskaasparvið 107 mg P á kg þurrefnis í rysju og 39 mg P á kg þurrefnis í kjarnviði.

Efnagæði íslensks alaskaasparviðar voru mjög breytileg og skýrðust ekki af vaxtarhraða trjáanna. Lægstu fosfórgildin í asparviði voru álíka lág og meðalgildin í stafafuruviði. Það er því mikilvægt að greina hvað einkennir vaxtarstaði með lág fosfórgildi og að hve miklu leiti hægt er að ná lágum efnagildum með ræktunartækni eða klónavali. Það kann að vera hægt að ná sambærilegum viðargæðum hjá öspinni og mælast í stafafuru á Norðurlandi. Ræktunartækni sem skilar hámarks vexti og stystri bið eftir afurðum kann einnig að skila bestu viðargæðunum og auk þess mestri kolefnisbindingu.

## Grisjunarafli til 2050

Hve mikinn við má sækja í núverandi skóga?

### Viðaraflsvæði

Viðaraflsvæði fyrir kísilmálmverksmiðju á Bakka við Húsavík takmarkast af flutningskostnaði og samkeppni um viðarafla við járnblendiverksmiðjuna á Grundartanga. Að austan getur aðfangasvæðið náð á Fljótsdalshérað sem er um 230 km flutningsleið. Ef lengra er sótt suður er mjög langt í næstu skóga. Mörkin til vesturs eru í Austur- Húnavatnssýslu en þaðan er um 250 km flutningsleið á Bakka. Vestar er ekki skóg að hafa svo nokkru nemi fyrir en komið er suður fyrir Holtavörðuheiði.

Flutningsvegaleindir innan viðaraflsvæðisins eru um það bil þessar, talið frá austri til vesturs: Fljótsdalshérað 225 km, Þingeyjarsýslur 40 km, Eyjafjörður 100 km, Skagafjörður 190 km og Austur- Húnavatnssýslu 255 km.

Á þessu svæði eru 12.100 hektarar af ræktuðum skógum sem geta gefið grisjunarafli á næstu áratugum. Árið 2016 var skipting skóganna eftir trjátegundum þessi: alaskaösp 986 ha (8%), furutegundir 1.598 ha (13%), grenitegundir 2.329 (19%) og lerkitegundir 7.259 (60%)<sup>19</sup>.

### Aldurskipting skóganna

Nærri tveir þriðju skóganna (65%) voru yngri en 20 ára og veginn meðalaldur allra skóga á svæðinu var 14 ár. Nærri helmingur skóganna (47%) er á Fljótsdalshéraði. Við Eyjafjörð og í Þingeyjarsýslum eru um 4.400 ha eða liðlega þriðjungur skóganna (sjá nánar 5. töflu).

**5. tafla. Flatarmál ræktaðra skóga (hektarar) með alaskaösp, greni, furum og lerkí í Austur- Húnavatnssýslu, Skagafjarðarsýslu, Eyjafjarðarsýslu, Þingeyjarsýslum og á Fljótsdalshéraði skipt á tíu ára aldursflokka frá 1937 til 2016.**

Aldursbil	A-Húna- vatnssýsla	Skaga- fjörður	Eyja- fjörður	Þingeyjar- sýslur	Fljótsdals- hérað	Samtals	
	ha	ha	ha	ha	ha	ha	%
2007-2016	180	526	498	1.067	1.508	3.779	31%
1997-2006	331	741	440	825	1.772	4.109	34%
1987-1996		59	510	135	1.424	2.127	17%
1977-1986		5	82	104	74	265	2%
1967-1976		2	15	32	53	102	1%
1957-1966		4	20	129	83	235	2%
1947-1956			88	60	20	169	1%
1937-1946			0	35	2	38	0%
Óvist um ár	172,0	56,3	115,5	272,0	731,5	1.347	11%
<b>Samtals</b>	<b>683</b>	<b>1.393</b>	<b>1.769</b>	<b>2.659</b>	<b>5.668</b>	<b>12.172</b>	<b>100%</b>
%	6%	11%	15%	22%	47%	100%	

Heimild: Björn Traustason tók saman úr gögnum íslenskrar skógarúttektar.

## Grisjunarafli til 2050

Án þess að skerða framleiðni skóganna er áætlaður grisjunarafli sem hentar til kurlunar fyrir verksmiðju PCC á bakka allt að átta þúsund rúmmetrum næsta áratuginn. Viðaraflinn vex hratt fram á

<sup>19</sup> Björn Traustason tók saman úr gögnum íslenskrar skógarúttektar.

miðja öldina og gæti þá orðið 36.000 rúmmetrar árlega (sjá nánar 6. töflu)<sup>20</sup>. Hvað tekur við á seinni hluta aldarinnar fer eftir því hve miklum skógi verður plantað næstu árin. Verði gróðursetning svipuð og árin 2007-2016 mun viðaraflinn vaxa hægt út öldina.

Í 6. töflu er gefin upp áætluð (möguleg) árleg grisjun í rúmmetrum bolviðar (3 m langir bolir með 6 sm þvermál í mjórri enda) skipt eftir 10 ára tímabilum. Aukningin er mest á Fljótsdalshéraði og stafar það af mikilli gróðursetningu í lönd skógarbænda eftir 1990.

#### 6. tafla. Iðnvíður til kurlunar sem gæti fengist úr grisjunum á viðaraflasvæði PCC árin 2021 – 2050.

Tímabil	A-Húna-Vatnssýsla	Skaga-fjörður	Eyja-fjörður	Pingeyjar-Sýslur	Fljótsdals-hérað	Samtals	Vegalengd (vegin)
Ártal	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	Km
2021 – 2030	100	200	2.000	1.500	4.000	7.800	157
2031 – 2040	1.000	2.000	4.000	4.000	11.000	22.000	167
2041 – 2050	2.000	4.000	5.000	8.000	17.000	36.000	166

Þeir Lárus Heiðarsson, Benjamín Örn Davíðsson og Arnór Snorrason birtu árið 2015 viðarmagnsspá fyrir bændaskógrækt á Fljótsdalshéraði (Rit Mógilsár 34/2015)<sup>21</sup>. Úttekt þeirra tók til 40% af því svæði sem þar hefur verið klætt skógi. Á tímabilinu 2014-2024 áætluðu þeir að árlega mætti grisja um 2.250 m<sup>3</sup>. Árin 2025-2034 mátu þeir að grisja mætti 9.530 m<sup>3</sup> árlega en tímabilið 2035 til 2044 gætu skógarnir skilað um 9.960 m<sup>3</sup> á ári.

Á Suðurlandi er metið að tiltækur grisjunarviður gæti verið um 18.000 rúmmetrar og á næstu árum bætast við 3 til 4.000 rúmmetrar árlega<sup>22</sup>. Í viðarmagnsspá fyrir skóga á Vesturland mat Ellert Einar Marísson að á 30 ára tímabili frá 2019 til 2049 væri hægt að sækja í skóga á því svæði um 190.000 m<sup>3</sup> eða að jafnaði um 6.300 m<sup>3</sup> á ári.<sup>23</sup>

### Verð og afli

Ofangreindar áætlanir byggja á skógfræðilegum forsendum um afkastagetu skóganna óháð hagkvæmni grisjana, þ.e. hve mikill víður fæst úr grisjunum án þess að fellingin komi niður á framleiðni skógarins. Hvort ráðist er í grisjun fer ekki síður eftir hagkvæmni. Skili grisjunin tapi er líklegt að grisjunaráhuginn dvíni.

Hagkvæmni grisjana fyrir PCC var metið með því að gefa sér verð samkvæmt samningi Elkem Ísland og Skógræktarinnar frá 2012. Kostnaðargreining sem lá fyrir við gerð þess samnings<sup>24</sup> er notuð til að meta kostnað við a) fellinguna, b) útkeyrslu víðar úr skógi, c) flutning til verksmiðju og d) kurlun. Í þessari greiningu var felld niður öll grisjun út frá skógvaxtarforsendum sem ekki skilar skógareiganda nettótekjum (sjá 7. töflu).

<sup>20</sup> Greining: ÞHJ byggt á aldursskiptingu skóga (sjá 1. töflu), meðalvexti og iðnvíðarafla eftir víðarforða. Vaxtar og nýtingarforsendur byggja á upplýsingum í: Lárus Heiðarsson, Benjamín Örn Davíðsson og Arnór Snorrason (2015). Viðarmagnsspá fyrir bændaskógrækt á Fljótsdalshéraði. Rit Mógilsár 34/2015.

<sup>21</sup> <https://www.skogur.is/static/files/rit-mogilsar/Rit-Mogilsar-34-2015.pdf> (Sótt 17.11.2020).

<sup>22</sup> <https://www.dfs.is/2017/12/12/urvinnsla-skogarafurda-a-sudurlandi/> (Sótt 5.9.2020).

<sup>23</sup> Ellert Einar Marísson (2020). Viðarmagnsspá fyrir Vesturland. MS-ritgerð. Landbúnaðarháskóli Íslands Hvanneyri, 78 bls. <https://skemman.is/handle/1946/35062> (Sótt 5.9.2020)

<sup>24</sup> Þorbergur Hjalti Jónsson, óbirt minnisblöð.



7. tafla. Iðnviður til kurlunar sem gæti fengist úr grisjunum á viðaraflavæði PCC árin 2021 – 2050 að teknu tilliti til kostnaðar við skógarhögg, útkeyrslu viðar úr skógi, flutning til verksmiðju og afurðaverð í samningi Elkem Ísland og Skógræktarinnar 2012 – 2021.

Tímabil	A-Húna- vatns- sýsla	Skaga- fjörður	Eyja- fjörður	Þingeyjar -sýslur	Fljóts- dals- hérað	Samtals	Flutnings- vega- lengd
Ártal	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	$m^3 \text{ ár}^{-1}$	km
2021 – 2030	0	0	400	1.200	0	1.600	55
2031 – 2040	0	0	400	1.700	0	2.100	51
2041 – 2050	0	0	700	4.400	0	5.200	47

Greining: PHJ

Þessi greining bendir til að viðaraflavæði fyrir verksmiðju PCC takmarkist vegna kostnaðar við Þingeyjarsýslur og Eyjafjörð. Hagkvæm grisjun í Þingeyjarsýslum og Eyjafirði gæti skilað í upphafi um 1.600 rúmmetrum árlega en aflinn ykist upp í rúmlega fimm þúsund rúmmetra um miðja öldina.

Grisjun getur bætt útivistargildi og framtíðarvirði skógarins. Með grisjun verður skógurinn bjartari og gróska færist í undirgróður sem getur skipt máli fyrir útivistargildi og óbeint virði skógarins t.d. í tengslum við ferðapjónustu. Hæfileg grisjun hefur ekki teljandi áhrif á heildarframleiðni skógarins en tré sem eftir standa stækka hraðar. Verðmætisvöxtur eftirstandandi trjáa vex við grisjunina vegna þess að 1) eftirstandandi tré vaxa hraðar eftir grisjunina, 2) við grisjun er vöxturinn færður á bestu trén því lakari trén eru felld, 3) viðaraflinn í framtíðinni getur nýst í verðmætari afurðir og 4) uppskerukostnaður lækkar hratt með vaxandi trjástærð. Skógareigendur geta því haft áhuga á að grisja skóginn þótt grisjunin skili ekki nettó tekjum. Það getur hins vegar skipt verulegu máli að sala grisjunarviðar dugi fyrir umtalsverðum hluta grisjunarkostnaðar. Því má líta á greininguna í 6. töflu sem efri mörk en 7. töflu sem neðri mörk mögulegs viðarafla næstu áratugi.

## Hver á skóginn?

Eignarhald ræktaðra skóga skiptir máli við skipulagningu og samninga um grisjanir. Árið 2012 voru á Íslandi 37.922 hektarar af ræktuðum skógi. Skógræktin og skógarbændur með samning við Skógræktina (áður Skógrækt ríkisins og Landshlutaverkefni í skógrækt) ráða yfir 58% alls ræktaðs skógar í landinu. Landgræðsla ríkisins og Hekluskiógar, sem eru samstarfsverkefni Skógræktarinnar og Landgræðslu ríkisins, ráða nýtingu 2% skógarins. Samtals eru því 60% skógarins undir stjórn eða í samstarfi við ríkisstofnanir. Skógræktarfélag stýra 22% skóga í landinu. Mikið af þessu landi er ræktað í samvinnu við sveitarfélög. Verkefnið landgræðsluskógar er stýrt af skógræktarfélagunum og er hér talið með þeirra skógum. Skógar í eigu sveitarfélaga eru 6% af heildinni. Skógar í eigu og undir stjórn einkaaðila eru 9% af skógum landsins (sjá 8. töflu).

Skógar sem gróðursettir voru eftir 1990 eru að verulegu leiti í eigu skógarbænda en eldri skógar eru að stærstum hluta þjóðskógar Skógræktarinnar (ríkisskógar) og skógar í eigu skógræktarféлага. Skógarbændur eru flestir bundnir 40 ára samningi við Skógræktina. Þessir samningar voru upphaflega gerðir við landshlutabundið skógræktarverkefni (Norðurlandsskiógar, Héraðs- og Austurlandsskiógar, Suðurlandsskiógar, Vesturlandsskiógar og Skjólsskiógar á Vestfjörðum).

8. tafla. Ræktaðir skógar á Íslandi árið 2012 skipt eftir eignarhaldi.

Skógareigandi	Landstærð		Lýsing
	hektarar	%	
Skógræktarfélög	5.757	15%	Frjáls félagasamtök oft í samstarfi við sveitarfélög
Landgræðsluskógar	2.722	7%	Verkefni á vegum skógræktarfélaganna
Landshlutaverkefni	18.378	48%	Skógrækt bænda – háð samningi við Skógræktina
Nytjaskógar á bújörðum	1.063	3%	Skógrækt bænda – eldra verkefni 1983 – 2000
Einkaskógrækt	3.286	9%	Skógrækt á einkalandi óháð ríkinu
Skógræktin	3.804	10%	Þjóðskógar ríkisins í umsjá Skógræktarinnar
Landgræðsla ríkisins	637	2%	Skógrækt á löndum og á vegum Landgræðslunnar
Hekluskógar	65	0%	Samvinnuverkefni Skógræktar og Landgræðslu
Sveitarfélög	2.210	6%	Skógar í eigu og umsjón sveitarfélaga
<b>Samtals</b>	<b>37.922</b>	<b>100%</b>	

Björn Traustason tók saman úr gagnasafni Íslenskrar skógarúttektar.

Skógarbændurnir eiga allar nettó tekjur sem kunna að verða af grisjunum. Samkvæmt samningum skógarbænda og Skógræktarinnar eru bændurnir háðir ákvörðunum Skógræktarinnar um ráðstöfun og meðferð skógarins. Skógræktin er því óhjákvæmilega aðili að öllum samningum um grisjanir á samningslöndum skógarbænda. Skógarbændur hafa með sér félög sem mynda landsamband skógareigenda og eru hluti af Bændasamtökunum. Félögin og landsamtökin fara með sameiginlega hagsmunagæslu fyrir skógarbændur. Félögin yrðu væntanlega aðilar að rammisamningi um grisjanir á starfssvæði sínu þótt samningurinn yrði við Skógræktina.

## Land til asparræktunar

Hagkvæm flutningsleið úr skógi til Bakka virðist vera um 100 – 150 km. Ef lengra er sótt verður flutningskostnaður það mikill að viðarsalan gerir lítið meira en standa undir kostnaði við skógarhögg og flutning. Hagkvæm skógrækt sem byggir á viðarsölu á Bakka takmarkast því við starfssvæði SSNE<sup>25</sup> og einkanlega innan 50 – 100 km flutningsleiðar til Bakka.

Greining á gögnum nytjalands<sup>26</sup> sýnir að við Eyjafjörð og í Þingeyjarsýslum eru um 22.400 ha af hentugu landi til asparræktunar. Um 10.800 ha (48%) við Eyjafjörð, um 10.300 ha (46%) í Fnjóskadal, Bárðardal, Köldukinn, Aðaldal, Reykjadal og Mývatnssveit. Í Norðurþingi austan Tjörnness og í Langanesbyggð eru 1.300 ha (6%). Vegin meðal flutningsvegaleind af hentugu asparlandi á svæðinu og til Bakka er um 90 km. Innan 50 km fjarlægðar eru um 3.500 ha (15%). Helmingur ræktunarlandsins er innan 75 km fjarlægðar (11.700 ha, 52%) og mest allt innan 100 km fjarlægðar (19.600 ha, 86%). Við Eyjafjörð og í Þingeyjarsýslum er nánast ekkert land fjær en 125 km flutningsleiðar til Bakka.

Í Skagafirði eru um 10.700 ha af góðu asparlandi. Flutningsleiðin þaðan á Bakka er um 230 – 250 km. Ef sótt er vestur yfir Vatnsskarð er um 2.900 ha góðu asparlandi í Austur- Húnavatnssýslu og flutningsleiðin um 250 km. Þar fyrir vestan er lítið um gott asparland fyrr en komið er til Borgarfjarðar og flutningsleiðin mun styttri á Grundartanga en á Bakka.

<sup>25</sup> Samtök sveitarfélaga og atvinnuþróunar á Norðurlandi eystra

<sup>26</sup> Þorbergur Hjalti Jónsson og Björn Traustason. Óbirt skýrsla í vinnslu um greiningu á hagkvæmni iðnvíðarskógræktar. Skýrslan er hluti 2. áfanga Norðlenskur iðnvíður fyrir PCC á Bakka og birtist á árinu 2021.

Í suðausturátt er flutningsleið til Vopnafjarðar um 200 km og þar eru um 1.200 ha af góðu asparlandi. Á Fljótsdalshéraði eru um 12.500 ha af góðu asparlandi og þangað er flutningsleið til Bakka um 230 – 240 km.

## Viðarvöxtur og kolefnisbinding

Á 20 – 25 árum getur iðnviðarskógur af alaskaösp framleitt um 200 m<sup>3</sup> af asparviði (10 m<sup>3</sup> á ha árlega)<sup>27</sup> sem gæfi um 114 tonn af kurlí (um 30% raki). Á sama tíma bindur skógurinn um 400 tonn CO<sub>2</sub> á ha<sup>28</sup> (19 tonn CO<sub>2</sub> á ha árlega). Út frá þessu gætu 22.400 ha af góðu asparlandi gefið um 224.000 rúmmetra af bolviði árlega frá 21 árs aldri eða 128.000 tonn af viðarkurlí árlega fyrir kísiliðnað á Bakka. Núverandi notkun í fullum rekstri er um 45.000 tonn og eftir stækkun 90.000 tonn<sup>29</sup>. Um 35% þessa svæðis myndi þurfa fyrir núverandi kurlþörf og um 70% alls góðs asparlands á svæðinu eftir áformaða stækkun kísilmálmverksmiðjunnar á Bakka. Asparræktun á öllu góðu asparlandi í Eyjafirði og Þingeyjarsýslum gæti bundið um 9 milljón tonn á 20 árum (árleg koltvísýringsbinding um 400.000 tonn).

## Heimildir

Andrews, J. A., Siccama, T. G., Vogt, K. A. (1999). The effect of soil nutrient availability on retranslocation of Ca, Mg and K from senescing sapwood in Atlantic white cedar. *Plant and Soil* 208: 117-123.

Arnalds, Ó. (2008). Soils of Iceland. *Jökull* 58, 409-421.

Baes, C. F. III & McLaughlin, S. B. 1984. Trace elements in tree rings: evidence of recent and historical air pollution. *Science, USA* vol. 224 (4648): p.494-497.

Baes, C. F. III. & Ragsdale, H. L. 1981. Age-specific lead distribution in xylem rings of three tree genera in Atlanta, Georgia. *Environmental Pollution*, B, Chemical and Physical vol. 2 (1): p.21-35.

Baettig, R., Guajardo, J., Salas, M., Cornejo, J. Tapia, J. (2017). Physical and chemical traits in false heartwood for two populus hybrids. *Wood Research* 62(4): 539-548.

Baes, C. F. III, McLaughlin, S. B. & Hagan, T. A. 1984? Multielemental analysis of tree rings: temporal accumulation patterns and relationships with air pollution. Conference Title: *Air pollution and the productivity of the forest*. Symposium held Washington, DC, Oct. 4 and 5, 1983 p.273-286 (Editors: Davis, D.D.; Millen, A.A.; Dochinger, L.) Izaak Walton League of America Arlington, Virginia, USA.

Balk, G. & Hagemeyer, J. 1994. Extraction of Cd and Pb from stem wood of oak trees (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) with various solutions. *Angewandte Botanik* vol. 68 (5/6): p.191-194

<sup>27</sup> Greining á vaxtargögnum bendir til að með þeirri aðferð sem gert er ráð fyrir að nota við iðnviðarræktun með alaskaösp geti viðarvöxtur verið um 15 m<sup>3</sup> á hektara árlega til 20 – 25 ára aldurs.

<sup>28</sup> Heimild: Óbirtar vaxtarmælingar í 85 ha tilraunaskógi á Sandlækjarmýri í Skeiða- og Gnúpverjahreppi.

<sup>29</sup> Kísilmálmverksmiðja á Bakka við Húsavík með allt að 66 þúsund tonna framleiðslugetu. Mat á umhverfisáhrifum. Matskýrsla, 21. maí 2013. Efla verkfræðistofa.



- Berish, C. W. & Ragsdale, H. L. 1985. Chronological sequence of element concentrations in wood of *Carya* spp. in the southern Appalachian Mountains. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 15 (3): p.477-483.
- Bondiotti, E. A., Baes, C. F., III & McLaughlin, S. B. 1989. Radial trends in cation ratios in tree rings as indicators of the impact of atmospheric deposition on forests. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 19 (5): p.589-594.
- Boyce, S.G. 1954. The salt spray community. *Ecological Monographs*, 24(1), 29-67.
- Buschbom, U., V., 1968. Salzresistenz oberirdischer Sprosssteile von Holzgewächsen I. Chlorideinwirkungen auf Sprossoberflächen. *Flora*, Abt. B, Bd. 157. bls. 527-561.
- De Boever, L., Vansteenkiste, D., Van Acker, J., Stevens, M. (2007). End-use related physical and chemical properties of selected fast-growing poplar hybrids (*Populus trichocarpa* x *P. deltoides*). *Ann. For. Sci.* 64: 621-630.
- Donnelly, J. R., Shane, J. B. & Schaberg, P. G. 1990. Lead mobility within the xylem of red spruce seedlings: implications for the development of pollution histories. *Journal of Environmental Quality* vol. 19 (2): p.268-271.
- Eklund, M. 1995. Cadmium and lead deposition around a Swedish battery plant as recorded in oak tree rings. *Journal of Environmental Quality* vol. 24 (1): p.126-131.
- Erstad, J. 1994. Tilpassing til vær og klima hos lignoser i maritime strøk. II salt- og vasstress. (Adaptation of woody plants to weather and climate in a maritime environment. II Salt and water stress. *Norsk landbruksforskning* 8: 249-270. (Norwegian with english summary).
- Foster, R.C. & Sands, R., 1977. Response of Radiata Pine to Salt Stress. II Localization of Chloride. *Aust. J. Plant Physiol.* vol 4. bls. 637-646.
- Guðleifsson, B. E. & Schnug (1990). The effect of soil pH on element-availability and element-uptake by grasses grown on Icelandic peat-soils. *Icel. Agr. Sci.* 4: 11-13.
- Guyette, R. P., Cutter, B. E. & Henderson, G. S. 1991. Long-term correlations between mining activity and levels of lead and cadmium in tree-rings of eastern red-cedar. *Journal of Environmental Quality* vol. 20 (1): p.146-150.
- Hagemeyer, J. 1995. Radial distributions of Cd in stems of oak trees (*Quercus robur* L.) reanalyzed after 10 years. *Trees: Structure and Function* vol. 9(4): bls. 200-203.
- Hagemeyer, J.; Lohrie, K. 1995. Distribution of Cd and Zn in annual xylem rings of young spruce trees (*Picea abies* (L.) Karst.) grown in contaminated soil. *Trees: Structure and Function* vol. 9 (4): p.195-199.
- Hagemeyer, J., Lulfsmann, A., Perk, M. & Breckle, S. W. 1992. Are there seasonal variations of trace element concentrations (Cd, Pb, Zn) in wood of *Fagus* trees in Germany? *Vegetatio* vol. 101 (1): p.55-63.

- Hagemeyer, J. & Schafer, H. 1995. Seasonal variations in concentrations and radial distribution patterns of Cd, Pb and Zn in stem wood of beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Science of the Total Environment* vol. 166 (1/3): p.77-87.
- Hagemeyer, J. & Shin, K. W. 1995. Extraction of Cd and Pb from stem wood of pine (*Pinus sylvestris* L.) trees with various solutions. *Angewandte Botanik* vol. 69 (1/2): p.55-59
- Hagemeyer, J. & Weinand, T. 1996. Radial distributions of Pb in stems of young Norway spruce trees grown in Pb-contaminated soil. *Tree Physiology* 16 (6): p.591-594.
- Hasanen, E. & Huttunen, S. 1989. Acid deposition and the element composition of pine tree rings. *Chemosphere* vol. 18 (9-10): p.1913-1920.
- Hoffmann, E., Stephanowitz, H. & Skole, J. 1996. Investigations of the migration of elements in tree rings by Laser-ICP-MS. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 355 (5-6). 690-693.
- Íslenska járnblendifélagið (1982). Kurlið að austan. [Skýrsla með efnagriningum á víðisýnum frá Fljótshálsá, 5 bls. auk töflu].
- Jiang Gaoming. 1996. Tree ring analysis for determination of pollution history of Chengde City, north China. *Journal of Environmental Sciences (China)* 8 (1): p.77-85.
- Jonsson, B., Pernestål, K., Hong-Kou, L. 1990. *Analysis of the content of trace elements in tree cores from spruce by means of PIXE*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biometry and Forest Management, Report 20, Umeå.
- Jónsson, T. H. (1985). Appendix D3, Foliar nutrient status and height growth of *Pinus contorta* Dougl. in Suthur Thingeyjarsýsla. Pages D74-D79 in: Jónsson, T.H. (1985). Distribution of root biomass in a stand of *Pinus contorta* Dougl. growing on stratified palagonite loess soil in N.E. Iceland. Thesis for B. Sc. (Hons.). University of Aberdeen, 82 pages as well as bibliography and appendices.
- Kardell, L. & Larsson, J. 1978. Lead and cadmium in oak tree rings (*Quercus robur* L.). *Ambio* vol. 7 (3): p.117-121
- Katayama Y, Okada N, Ishimaru Y, Nobuchi T, Yamashita H & Aoki A. 1986. Determination of trace elements in annual rings of Yaku sugi by the thermal neutron activation analysis. *Radioisotopes* 35 (11): p.577-582.
- Lambert, M. J. (1981). Inorganic constituents in wood and bark of New South Wales forest tree species. Research Note No. 45. Forestry Commission of New South Wales, Sidney 1981, 43p.
- Lövestam, G., Johansson, E., Johansson, S., Pallon, J. 1990. Elemental Micro Patterns in Tree Rings - A Feasibility Study Using Scanning Proton Microprobe Analysis. *Ambio* 19(2), 87-93.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press (2<sup>nd</sup> ed.). London.
- Mattson, S., et al. (2007). "Pinus contorta growth in boreal Sweden as affected by combined lupin treatment and soil scarification." *Silva Fennica* 41(4): 649-659.

- Matusiewicz, H. & Barnes, R. M. 1985. Tree ring wood analysis after hydrogen peroxide pressure decomposition with inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and electrothermal vaporization. *Analytical Chemistry* vol. 57 (2): p.406-411.
- Meerts, P. (2002). Mineral nutrient concentrations in sapwood and heartwood: a literature review. *Ann. For. Sci.* 59: 713-722.
- Meugel and Kirkby 1987. *Principles of plant nutrition*.
- Pregitzer, K. S., Dickmann, D. I., Hendrick, R. and Nguyen, P. V. (1990). Whole-tree carbon and nitrogen partitioning in young hybrid poplars. *Tree Physiology* 7, 79-93.
- Qian, J. L., Ke, S. Z.; Huang, J. S. & Xiang, C. X. 1993. Correlation between chemical elements contents in tree rings and soils. *Pedosphere* vol. 3 (4): p.309-319.
- Queirolo, F. & Valenta, P. 1987. Trace determination of Cd, Cu, Pb and Zn in annual growth rings by differential pulse anodic stripping voltammetry. *Fresenius' Zeitschrift fur Analytische Chemie* vol. 328 (1-2): p.93-98
- Queirolo, F., Valenta, P., Stegen, S. & Breckle, S. W. 1990. Heavy metal concentrations in oak wood growth rings from the Taunus (Federal Republic of Germany) and the Valdivia (Chile) regions. *Trees: Structure and Function* vol. 4 (2): p.81-87.
- Queirolo, F., Valenta, P., Stegen, S. & Sanchez, A. M. 1991. Study of the radial and axial distribution of heavy metals in oak growth rings by stripping voltammetry. *Electroanalysis* vol. 3 (4-5): p.325-329.
- Robitaille, G. 1981. Heavy-metal accumulation in the annual rings of balsam fir *Abies balsamea* (L.) Mill. *Environmental Pollution, B* vol. 2 (3): p.193-202.
- Rolfe, G. L. 1974. Lead distribution in tree rings. *Forest Science* vol. 20 (3): p.283-286.
- Tendel, J. & Wolf, K. 1988. Distribution of nutrients and trace elements in annual rings of pine trees (*Pinus silvestris*) as an indicator of environmental changes. *Experientia* vol. 44 (11-12): p.975-980.
- Vroblesky, D. A. & Yanosky, T. M. 1990. Use of tree-ring chemistry to document historical ground-water contamination events. *Ground Water* vol. 28 (5): p.677-684.
- Watmough, S. A. (2002). A dendrochemical survey of sugar maple (*Acer saccharum* March) in South-central Ontario, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution* 136: 163-187.
- Yanosky, T. M., Hupp, C. R. & Hackney, C. T. 1995. Chloride concentrations in growth rings of *Taxodium distichum* in a saltwater-intruded estuary. *Ecological Applications* vol. 5 (3): p.785-792.