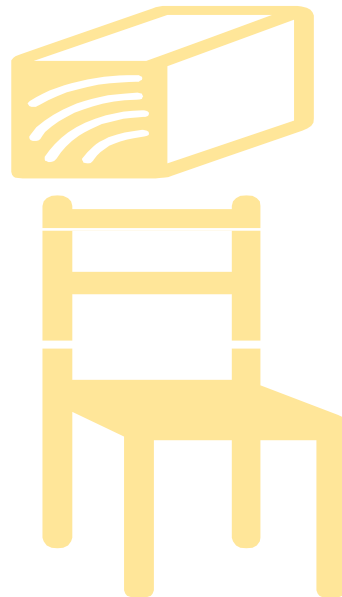


Pitkäaikaisten biohiilivarastojen arviointimenetelmät -Esiselvitys puutuotteista

Tulosruudut



Tarmo Rätty
etunimi.sukunimi@luke.fi



Tarja Häkkinen, Janne Pesu
etunimi.sukunimi@env.fi



Tulosruutusarja on optimoitu luettavaksi tietokoneen ruudulta. Useimmat kuvat ja taulukot näkyvät tarkempina suurennettuna.

Räty T., Häkkinen T., Pesu J. (2021). Pitkäaikaisten biohiilivarastojen arviointimenetelmät : Esiselvitys puutuotteista, Tulosruudut. 58 s. Luonnonvarakeskus, Suomen ympäristökeskus. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021081843543>.

Tiivistelmä

Maa- ja metsätalousministeriö antoi Luonnonvarakeskukselle tehtäväksi laatia esiselvityksen pitkäkestoisten biohiilivarastojen arviointimenetelmistä. Siihen tuli koota katsaus, joka sisältää hiilivarastojen arvioinnissa käytettyjä menetelmiä, kotimaassa ja ulkomailla toteutettuja työvälineitä (laskureita), sekä tehdä ehdotuksia kansallisen arviointimenetelmän jatkokehittämisen toimenpiteistä. Työ rajattiin puutuotteiden hiilivaraston laskentaan, mutta osa tarkastelluista työvälineistä kattaa koko metsä-puutuote-ketjun. Esiselvitys toteutettiin yhdessä Suomen ympäristökeskuksen kanssa.

Raportin osassa II, laskentasääntöjen ja menetelmäkehityksen katsaus, tarkastellaan käytettävissä olevia standardeja ja laskentaohjeita, sekä kuvataan runsaat kolmenkymmentä aiheesta tehtyä tieteelliseen tutkimusta. Osassa III, käytännön ratkaisuja, on 17 tietolähteen, selvityksen sekä työvälineen tarkempi kuvaus. Hiilivarastojen laskentamallien keskeiset erot kytkeytyvät laskettaviin tuotteisiin (primääri-/lopputuotteet), varastojen elinkaaren vaiheisiin (metsät/puutuotteet/kierrätys/käytöstä poisto) ja näiden vertailumahdollisuuksiin sekä laskelmien herkkyysoanalyysiin.

Kotimaassa puutuotteiden hiilivarastoja on arvioitu rakennuskannan rekistereiden ja niihin perustuvien rakennusten arkkityyppien perusteella. Hiilivaraston tulevasta kehityksestä on julkaistu mekaanisia laskelmia ilman herkkyysoanalyysiä, mutta laskentaparametreja tai työvälineitä ei ole jaettu. Koko metsä-puutuoteketjun kattavia laskelmia on julkaistu kaksi kappaletta; niiden vertailu osoittaa tulosten herkkyyden lähtöoletuksille. Ulkomailla on sekä julkaistu että otettu käyttöön useita työvälineitä, joista osassa laskenta perustuu primäärituotantoon (esim. sahatavara, levyt). Kehittyneemmissä työvälineissä pohjana on puutuotesektorin rakenteellinen malli, jossa materiaalivirrat siirtyvät elinkaarensa mukaisesti hiilivarastoihin, ja laskija voi sallia mallin rakenteen sekä tuotteiden muuttua laskentaperiodilla. Tämä mahdollistaa esimerkiksi uusien innovatiivisten tuotteiden hiilensidontapotentiaalin arvioinnin.

Esiselvityksen neljä toimenpide-ehdotusta arviointimenetelmän kehittämiseksi ovat: I Rakennusten hiilivarastolaskennan jatkokehittäminen hyödyntämällä jo olemassa olevia aineistoja ja työvälineitä, mutta laajentamalla nämä kattamaan luvitetun rakennuskannan sekä herkkyysoanalyysin lisäksi myös muuta tietoa. II Puutuotesektorin rakenteellisen laskurin kehittäminen. Tavoitteena on tarkastella hiilivarastojen dynamiikkaa koko puunjalostussektorilla mukaan lukien tuotteiden kierrätys, kaskadikäyttö sekä uudet tuotteet ja teknologiat. Selvityksessä löydettiin kolme työvälineen kehittämiseen soveltuva ohjelmistoalustaa. III Metsä-puutuote-ketjun hiilivarastojen muutosten rinnakkainen tarkastelu. Tavoitteena on luoda kokonaiskuva puun käytön vaikutuksista biogeenisen hiilen varastoitumisen ajoitukseen ja kestoan. Puutuotesektorin rakenteellinen malli on olennainen osa puunkäytön koko ketjun mallinnusta. IV Kehitystyöstä vastaavan konsortion tulee huolehtia siitä, että valittujen metodisten ratkaisujen vaikutukset ovat havainnollistettavissa ja vertailtavissa.

Avainsanat: Hiilitase, elinkaarimallit, puutuotteet

Räty T., Häkkinen T., Pesu J. (2021). [English title] Methods for estimating long-term biogenic carbon stocks: Feasibility study on wood products, Slide set on results. 58 p. Natural Resources Finland, Finnish Environment Institute. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021081843543>.

Abstract

The Ministry of Agriculture and Forestry instructed the Natural Resources Center to prepare a feasibility study on the assessment methods for long-term biocarbon stocks. It aims was to compile an overview of the methods used to assess carbon stocks, tools (counters) implemented at home and abroad, and make proposals for measures to further develop the national assessment method. The work was limited to the calculation of the carbon stock of wood products, but some of the tools examined cover the entire forest-wood product chain. The feasibility study was carried out together with the Finnish Environment Institute.

Part II of the report, an overview of accounting rules and methodological developments, reviews the available standards and calculation guidelines, and describes more than thirty scientific studies on the subject. Part III, practical solutions, provides a more detailed description of the 17 data sources, surveys, and tools. The main differences in the calculation models for carbon stocks are related to the calculated products (primary / final products), the life cycle stages of the stocks (forests / wood products / recycling / end-of-life) and their comparisons, as well as the sensitivity analysis of the calculations.

In Finland, the carbon stocks of wood products have been estimated on the basis of the building stock registers and the archetypes of the buildings. Mechanical calculations for the future development of the carbon stock have been published without sensitivity analysis but calculation parameters or tools have not been shared. Two calculations covering the entire forest-wood product chain have been published; their comparison shows the sensitivity of the results to the initial assumptions. Several tools have been published and introduced abroad, some of which are based on primary production (sawn timber, boards). More sophisticated tools are based on a structural model of the wood products sector, where material flows are transferred to carbon stocks according to their life cycle phases, and the calculator can allow the structure of the model and the products to change during the calculation period. This makes it possible, for example, to assess the carbon sequestration potential of new innovative products

The four proposals of the feasibility study for measures to further develop the national assessment method are: I Further development of a carbon stock calculations for buildings, making use of existing data and tools, but extending these to cover not only the licensed building stock and making use of sensitivity analysis. II Development of a structural model for the wood products sector. The aim is to look at the dynamics of carbon stocks in the whole wood processing sector, including products' recycling, cascade uses, as well as new products and technologies. The study found three software platforms suitable for the tool development. III Parallel review of changes in carbon stocks in the forest-wood product chain. The aim is to create an overall picture of the effects of wood use, given the timing and duration of biogenic carbon storages. The structural model of the wood products sector is an integral part of modeling the entire wood value chain. IV The development consortium must ensure that the effects of the chosen methodological solutions are demonstrable and comparable.

Keywords: Carbon balance, Life cycle modelling, Harvested wood products

Sisältö

I Tavoitteet

- Systemirajaus
- Potentiaalinen hiilivarasto

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

- Standardit ja ohjeistot
- Tieteellinen tutkimus

III Käytännön ratkaisuja

- Käytettävissä olevia tietolähteitä
- Selvitykset hiilivarastojen määrästä
- Työkaluja arviointiin
- Hiilivarastolaskurin jatkokehitys

IV Johtopäätökset

- Aineistot ja työkalut, nykytila
- Arviointimenetelmän tavoitteet
- Ehdotukset jatkokehitykselle

Lähdeviitteet

Maa- ja metsätalousministeriön rahoittaman projektin ”Esiselvitys rakennusten ja puutuotteiden hiilivaraston laskennan nykytilasta ja kehittämistarpeista” raportti, VN/19365/2020, VN/19365/2020-MMM-4

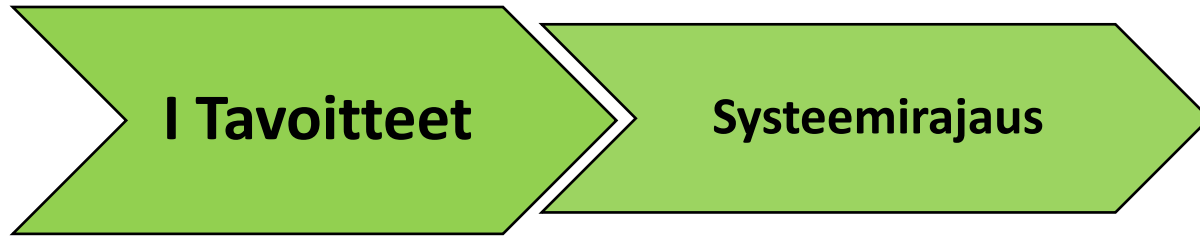
Viittausohje: Rätty T., Häkkinen T., Pesu J. (2021). Pitkäaikaisten biohiilivarastojen arviointimenetelmät : Esiselvitys puutuotteista, Tulosruudut. 57 s. Luonnonvarakeskus, Suomen ympäristökeskus. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021081843543>



I Tavoitteet

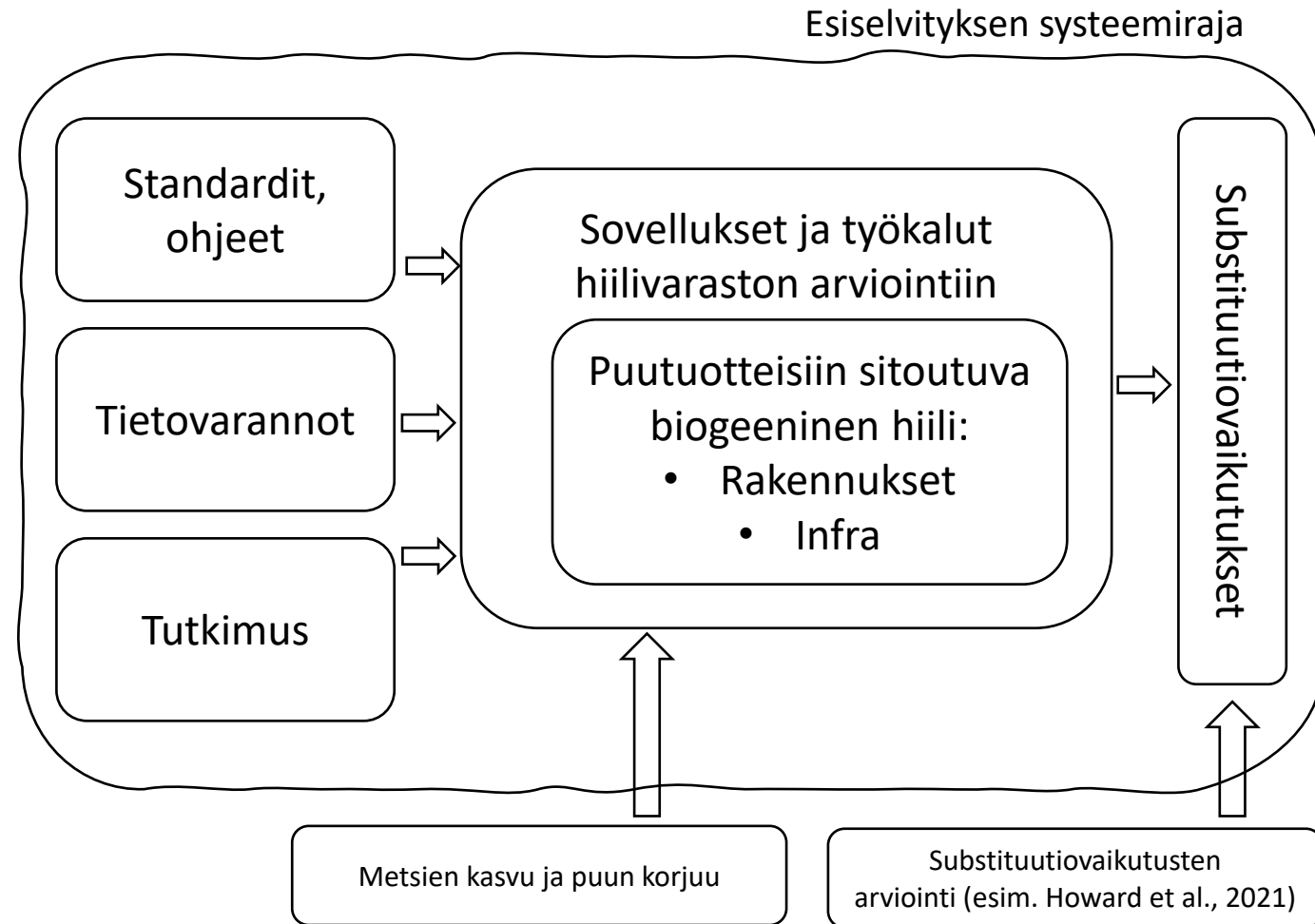
Projektisuunnitelmassa annettiin projektille seuraavat tehtävät:

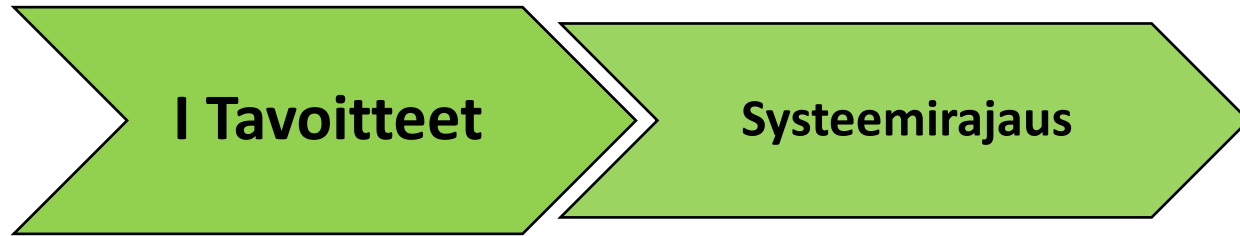
- Laatia katsaus pitkäkestoisten puutuotteiden hiilivarastojen arvioinnissa käytettäviin menetelmiin:
 - tieteellinen tutkimus sekä sovellukset, kotimaassa ja ulkomailla
 - lähestymistapojen vertailu: laskentasäännöt, lähtöaineistot, käyttötarkoitus
 - rakennuksiin että infrastruktuuriin sitoutuva hiili
- Selvittää olemassa oleva hiilivarasto sekä työkalut sen muutosten laskentaan päätöksenteon eri tasoilla.
- Tehdä ehdotukset tarvittavista toimenpiteistä kansallisen arviointimenetelmän jatkokehittämistä varten.



Systeemirajojen sisältö:

- Puutuotteiden käytön ja käytöstä poiston vaikutukset.
- Alueellinen tai kansallinen sovellus.
- Ei selvitetä hiilivaraston muutosten arviointia metsissä, mutta selvitetään miten puun korjuu ja/tai metsien hiilivarastojen muutos voidaan kytkeä puutuotteiden hiilivarastojen kehitykseen.
- Ei tarkastella rakennusten käytön aikaisia päästöjä.
- Puutuotteiden käytöstä poiston jälkeisistä substituutiovaikutuksista selvitetään vain niiden kytkentää puutuotemalleihin.
- Ei selvitetä IPCC metodin kehitystä tai KHK raportointia.



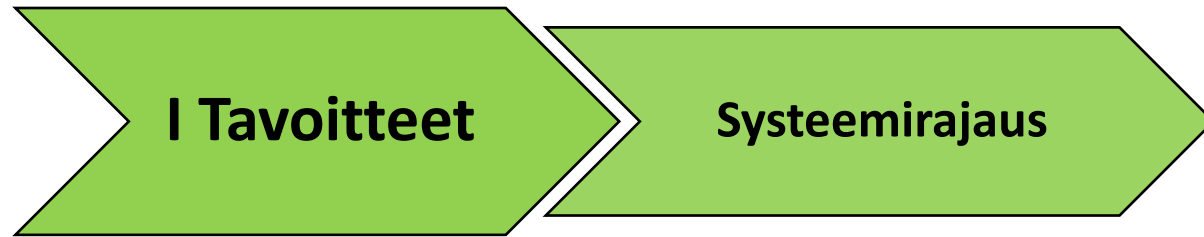


Selvityksessä tarkasteltiin puutuotteiden hiilivarastolaskennan työkaluja niiden käyttötarkoituksen mukaisesti, ne ovat:

- 1. Suunnittelumallit jotka havainnollistavat rakenteisiin sitoutuvan hiilen määrää.** Tavoite voi olla joko taloudellinen (esim. puro.earth kompensatio, alueen ympäristöprofiili) tai tavoitteellinen (esim. hiilineutraali kunta). Puu oletetaan kestävästi tuotetuksi joten sen käytön vaikutusta metsissä sijaitseviin hiilivarastoihin ei lasketa. Tietopohja on yleensä tyyppirakennus ja/tai niiden jakauma, skenaario on ajallisesti ja paikallisesti rajattu.
- 2. Puutuotteiden hiilivaraston muutoksen seuranta.** Edellyttää tietoa puutuotteiden määrästä joko primäärituotteina (esim. IPCC laskenta) tai niistä tehtyinä rakenteina (rakennuskanta, sen ikäjakauma ja muut). Esimerkiksi Vares et al.2017 ja Norjalainen karbonlagringen laskenta perustuvat tyyppirakennuksiin (arkkityyppeihin). Rakennuskantaa kuvaavissa malleissa on mahdollista simuloida erilaisia korjaus ja uudisrakentamisen skenaarioita. Puun käyttöä ei välttämättä liitetä metsien hiilivaraston kehitykseen. Varaston taso määritellään tilastoidun historiallisen tuotannon (primäärituotteet tai rakennuskanta) sekä niiden kertymää ja poistumaa kuvaavan mallin avulla.
- 3. Metsien käytön hiilivarastot.** Tavoitteena on luoda kokonaiskuva hiilivarastoista ja niiden dynamiikasta. Aikaperspektiivi on yleensä kymmeniä tai satoja vuosia, esimerkiksi: hiilineutraalisuus vuoteen 2050, metsien hoidon, puun tarjonnan ja kysynnän, ilmastonmuutoksen tai kaikkien edellisten yhteisvaikutus. Arvioitavia asioita ovat: miten metsä sitoo hiiltä, mitä puuta korjataan, puun käyttötarkoitus ja sen muutokset, tuotteiden käyttöikä ja käytöstä poisto. Tulokset voidaan esittää joko ajallisina hiilitaseina tai aggregoida eri pituisten hiilivarastojen vaikutus esim hiilitonnivuosi -luvuksi tai diskontata tarkasteluhetkeen. Toteutuksessa metsäsuunnittelun malli linkitetään joko primäärituotteiden tai rakennuskantaa kuvaavaan elinkaarimalliin.

Kaikissa työkaluissa voi olla mukana:

- Valmistuksen, käytön ja käytöstä poiston emissiot ilmakehään.
- Prosesien ja/tai parametrien muutokset ajassa.
- Simulaation epävarmuuden arviointia.



Tehtävänanto oli alun perin rajattu puutuotteiden mallintamiseen. Esiselvityksen aikana kävi kuitenkin selväksi, että puun käyttöä ja metsien hiilivarastoja ei ole aina mielekästä käsitellä erikseen.

Werner et al. (2010) : This study shows that the contributions of the forestry and timber sector to mitigate climate change can be optimized with the following key recommendations:

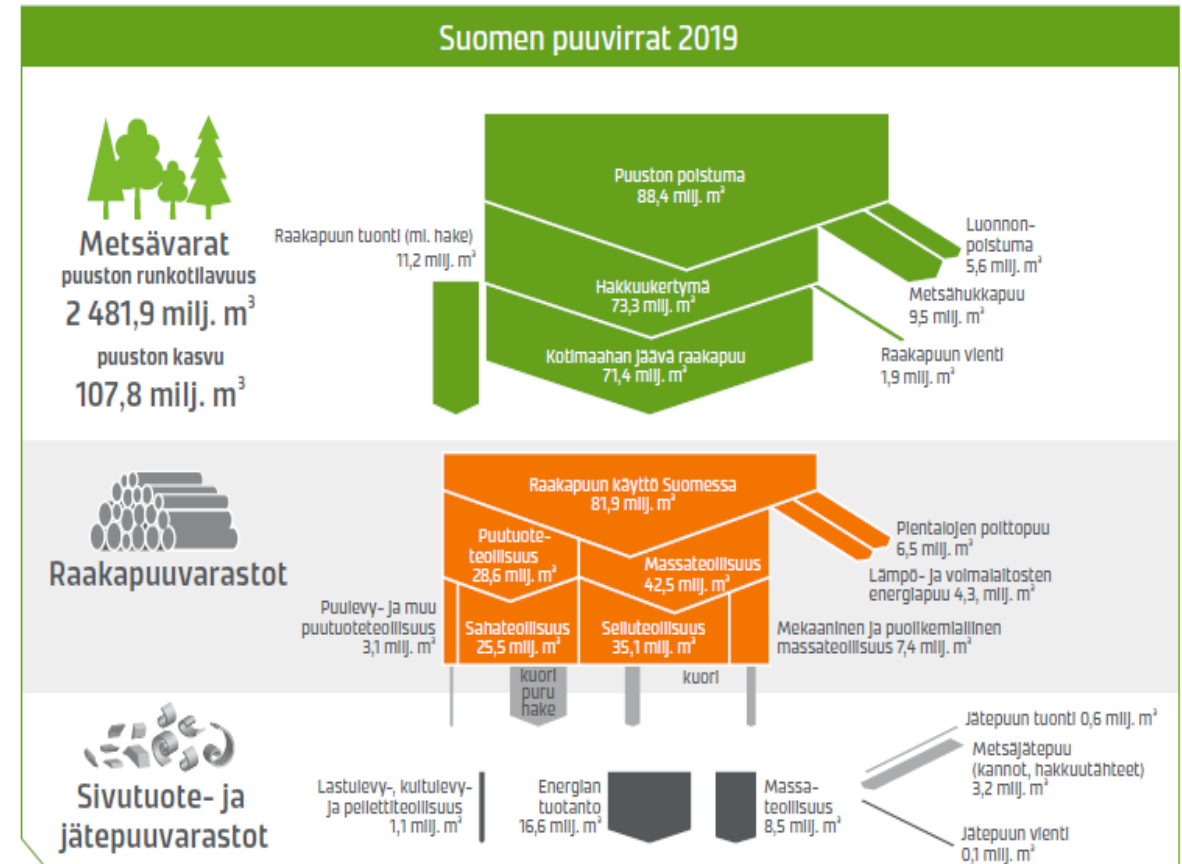
- (1) the maximum possible, sustainable increment should be generated in the forest, taking into account biodiversity conservation as well as the long-term preservation of soil quality and growth performance;
- (2) this increment should be harvested continuously;
- (3) the harvested wood should be processed in accordance with the principle of cascade use, i.e. first be used as a material as long as possible, preferably in structural components;
- (4) waste wood that is not suitable for further use should be used to generate energy. Political strategies to solely increase the use of wood as a biofuel cannot be considered efficient from a climate perspective;
- (5) forest management strategies to enhance carbon sinks in forests via reduced harvesting are not only ineffective because of a compensatory increase in fossil fuel consumption for the production of non-wooden products and thermal energy but also because of the Kyoto-“cap” that limits the accountability of GHG removals by sinks under Article 3.3 and 3.4, at least for the first commitment period;
- (6) the effect of substitution through the material and energy use of wood is more significant and sustained as compared with the stock effects in wood products, which tend towards new steady-state flow equilibria with no further increase of C stocks;
- (7) from a global perspective, the effect of material substitution exceeds that of energy recovery from wood.

Esiselvityksessä ei käsitelty substituutiovaikutuksia tai energiakäyttöä. Malleista joissa on mukana myös metsien hiilivarastoja käytettiin termiä metsä-puutuote-malli.

I Tavoitteet

Potentiaalinen hiilivarasto

- Puuston kasvu 107,8 milj. m³
 - Raakapuun käyttö kotimaassa 71,4 milj. m³
 - Puutuoteteollisuuteen (tukkipuuta) 28,6 milj. m³
- Puutuoteteollisuuden käyttösuhte (tukkia per valmis tuote) on 2,05-2,2. Siitä saadaan,
 - sahatavaraa ja levyjä noin 12,5 milj. m³
 - josta arviolta 80 % menee vientiin (Puutuoteteollisuus ry, 2020).
- Uudis- ja korjausrakentamiseen (pl. työmaatoiminnot) kotimaassa raakapuun käytöstä jää noin 2,3 milj. m³ (Puutuoteteollisuus ry, 2020).
 - **Vain noin 3% raakapuun käytöstä muodostaa potentiaalista pitkäaikaista hiilivarastoa kotimaan rakentamisessa.**
 - **Tämän varaston synty on kuitenkin vahvasti sidoksissa puun koko tarjontaketjuun, mukaan lukien sivuotteet.**
- Yksi m³ sahatavaraa sitoo hiiltä noin 730 kg.
 - Sahatavarakuution teollisen valmistuksen fossiilinen hiilijalanjälki on laskentatavasta riippuen 20-35 kg/m³.



Kuva: Luke

I Tavoitteet

Potentiaalinen hiilivarasto

Selvitys puutuotteisiin sitoutuneesta hiilestä Vares et al. (2017).

- Erilaisiin rakenteisiin on sitoutunut 22,8 milj. t hiiltä, sen lisäksi kiintokalusteisiin 1,2 milj. t.
 - **Varsinaiisiin rakennuksiin sitoutunut hiili on vain 62 % puutuotteisiin sitoutuneesta hiilestä**, infra rakenteisiin 14,8 %, loput 23,2 % pienrakenteisiin.
- Selvityksessä on mallinnettu rakennuskantaan sitoutunut hiili vuosikymmenittäin huoneistorekisterin perusteella.
 - Selvityksessä mallinnettiin poistumat vuoteen 2016 toteutuneiden poistumien ja **rakennustyyppien hiili-intensiteetin mukaisesti**.
- **Tulevaisuuden simulointia varten on olemassa pohjatietoa näiden rakennusvuosikertojen poistumien arvioimiseksi.**
 - Muun puunkäytön osalta (38 %) oli käytössä vain puun toimitusmäärien perusteella tehdyt arviot.

Taulukko 26. Rakennetun ympäristön hiilivaranto (arvio) vuoden 2016 joulukuussa.

		Puumateriaalit 1000 t (toimitus- kosteudessa)	Puumateriaalit, hiilisisältö, CO ₂ 1000 t	Puumateriaalit, hiilisisältö C 1000 t	Osuudet, %
A01	Erilliset pientalot	13 946	25 568	6 972	31 %
B	Kesämököt	4 440	8 134	2 219	10 %
M, N	Maatalous- ja muut (talous)rakennukset	4 614	8 455	2 307	10 %
A02, A03	Rivi- ja kerrostalot	3 149	5 778	1 575	7 %
J, K	Teollisuus- ja varastorakennukset	2 952	4 083	1 112	5 %
C,D,E,F,G,H,L	Liike-, toimisto ja julkiset rakennukset	1 524	2 784	761	3 %
Vähäiset rakennukset		5 180	9 495	2 590	11 %
Piharakenteet		3 500	6 415	1 750	8 %
Infrarakenteet		7 105	13 029	3 553	16 %
Yhteensä		46 409	83 742	22 838	100 %

Lähde: Vares et al., (2017)

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Standardit ja ohjeistot

- [IPCC ohjeistus](#)
- [ISO ja EN elinkaarilaskennan ja rakentamisen standardit, PAS sekä PEF ohjeistus](#)

Tieteellinen tutkimus

- [Puutuotteiden hiilivaraston mallin perusteita](#)
- [Katsaus tutkimuksiin](#)

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

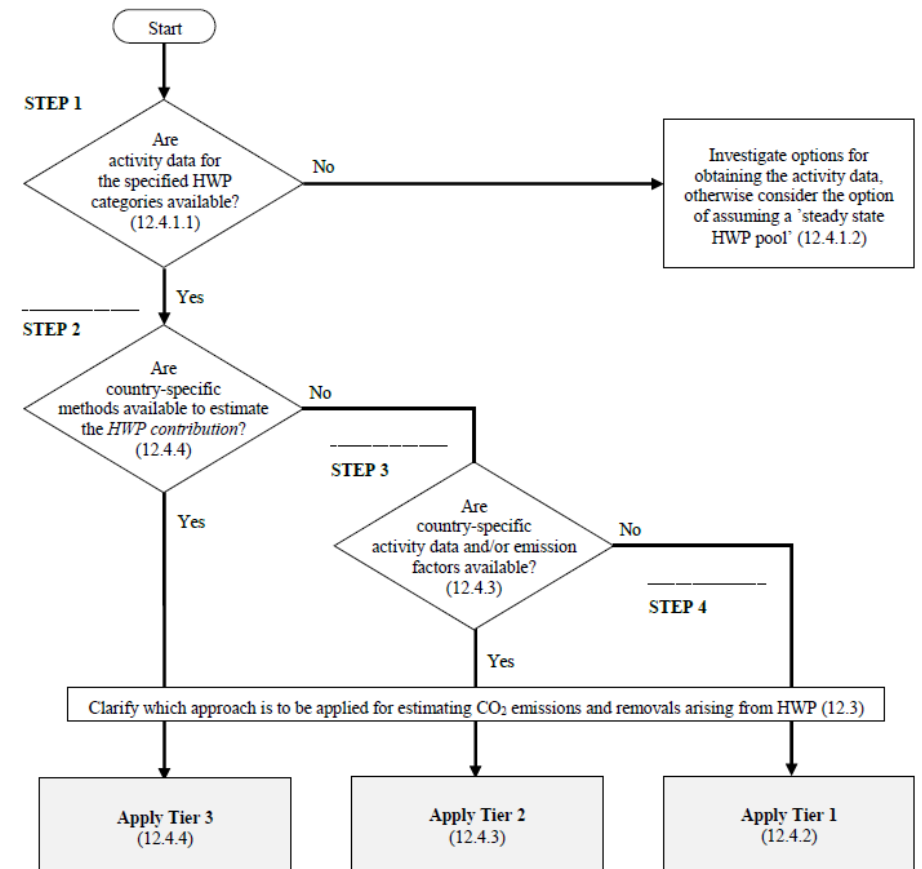
Standardit ja ohjeistot

IPCC ohjeistus

Puutuotteisiin sitoutuneen hiilen laskentametodi valitaan käytettävissä olevan tiedon perusteella.

- Tier 1: Oletusmetodi (ei muutoksia)
- Tier 2: Maakohtainen vaikutusdata jota voidaan käyttää oletusmetodin kanssa. (FAOSTAT ja puutuotteiden oletuspuoliintumisajat)
- Tier 3: Maakohtaiset metodit emissioiden ja sitomisen laskentaan

IPCC metodit eivät ota laskelmissa huomioon rakennettuun ympäristöön sitoutunutta hiiltä potentiaalisena ilmastonmuutoksen hillitsijänä. Rakennukset ja rakennusosat ovat mahdollisesti mukana tulevassa 6. arviointiraportissa (Hill, 2019).



Lähde: IPCC, 2019

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Standardit ja ohjeistot

IPCC ohjeistus

Puutuotteiden laskenta ja raportointi YK:n ilmastopöytäkirjalle ja EU:lle

- IPCC esittää puutuotteiden laskennalle kolme erilaista vaihtoehtoa (2006 IPCC Guidelines, Vol. 4, Annex 12.A.1):
 - *Stock-change approach (varastonmuutos)*
 - *Atmospheric flow (ilmakehän virta)*
 - *Production approach (tuotanto)*
- Kioton sopimuksessa ja EU:n LULUCF-asetuksessa käytetään *Production approach* –menetelmää (Statistics Finland 2020, EU 2018/841)
- Suomi käyttää *Production approach* -menetelmää myös raportoidessaan YK:n ilmastopöytäkirjalle (Statistics Finland, 2021).
- Production approach –menetelmässä puutuotteiden hiilivaraston muutokset perustuvat kotimaisesta puusta valmistettavien tuotteiden aikaansaamaan hiilivarastoon riippumatta siitä, missä maassa lopputuote käytetään. Kotimaisella puutuotteiden todellisella hiilivarastolla ei ole merkitystä tässä lähestymistavassa (2006 IPCC Guidelines, Vol. 4, Annex 12.A.1).
- Hiilen vapautuminen kotimaisesta puusta tuotetuista puutuotteista oletetaan tapahtuvan käyttämällä hiilen puoliintumisaikoja. IPCC:n kertoimia: 35 a sahatavara, 25 a puulevyt ja 2 a sellutuotteet tulee käyttää kotimaasta viedyille puutuotteille. Kansallisia puoliintumisaikakertoimia saisi käyttää kotimaahan jääville puutuotteille, mutta Suomi käyttää raportoinnissa IPCC:n puoliintumisaikakertoimia kaikille puutuotteille (Statistics Finland, 2021).

PRODUCTION APPROACH

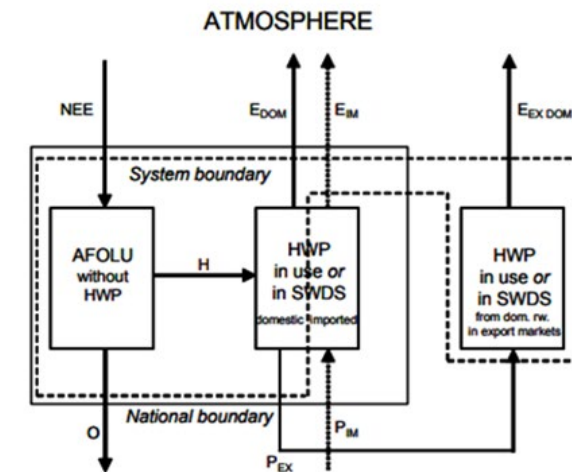


Figure 12.A.3 System boundary of the Production Approach.

Note: NEE = net ecosystem exchange of carbon, E_{DOM} = carbon release to the atmosphere from the pools of domestically grown HWP in use and in SWDS, E_{IM} = carbon release to the atmosphere from the pools of imported HWP in use and in SWDS, $E_{EX,DOM}$ = carbon release to the atmosphere from the pools of domestically grown but exported HWP in use and in SWDS, H = carbon transfer in the form of harvested wood biomass transported from harvest sites, P_{EX} = carbon transfer in the form of HWP exports, P_{IM} = carbon transfer in the form of HWP imports, O = possible other cross-border carbon transfers from rest of AFOLU (assumed zero here). Note: Only those HWP in the export markets that are produced from domestic roundwood are within the system boundary, not those only processed in the reporting country but made from imported roundwood. The transfer P_{EX} can in principle include both.

The Production Approach (PA) estimates changes in carbon stocks in the forest pool (and other wood producing lands) of the reporting country and the wood products pool containing products made from wood harvested in the reporting country. The wood products pool includes products made from domestic harvest that are exported and stored in uses in other countries. This approach inventories carbon in wood products from domestically harvested wood only and does not provide a complete inventory of wood carbon in national stocks. Because some of the stock changes reported by a country may occur in other countries (where exports are held), the stock change report indicates when changes occur but not where they occur.

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Standardit ja ohjeistot

ISO, EN, PAS ja PEF

	Käyttötarkoitus	Hiilivarasto	Emission ajankohta	Muuta
PAS 2050	Tuotteiden ja palvelujen KHK päästöjen arviointi.	Vain yli 100 vuotta pysyväosa. Joko biogeeninen tai fossiilinen.	Viiveitä ei saa painottaa, mutta painotettuja tuloksia (jäljellä oleva aika 100 vuoteen) saa julkaista lisätietona.	
EN ISO 14067	Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki.	Tuotteen biogeeninen hiili on tuotteeseen sisältyvää ja biomassasta peräisin olevaa hiiltä. Mikäli varastoitunut hiili lasketaan, niin standardin mukaisesti varastoitunut hiili raportoidaan erikseen sisällyttämättä sitä tuotteen hiilijalanjälkeen. Biogeeninen hiili on pakollinen tieto, kun raportoidaan kehdoista-portille -tuloksia.	Välitön emissio, ei painotuksia. Viiveen vaikutuksesta voidaan esittää erillinen arvio.	Puuperäisen tuotteen elinkaaren näkökulmasta hiilivarasto on nolla myös siinä tapauksessa, että tuote uudelleen käytetään tai kierrätetään, sillä hiili siirtyy uuteen tuotejärjestelmään.
ISO 21930	Rakennustuotteiden ympäristöseloste, PCR	Biogeeninen hiili varastoituu tuotteeseen raaka-aineissa ja vapautuu viimeistään End-of-waste tilassa tai jätteenkäsittelyssä. Tuotteessa elinkaaren lopussa oleva hiili ilmoitetaan positiivisena lukuna moduulissa C3/C4.	Ei aikapainotuksia, emissiot varastosta ilmoitetaan siinä moduulissa missä emissio tapahtuu.	Hiilidioksidina ilmaistavan hiilen virtojen summa koko elinkaaren ajalta (moduulista A1 moduulin C4) on nolla paitsi siinä tapauksessa, että osa hiilestä vapautuu metaanina tai jonain muuna kasvihuonekaasuna.
EN 15804	Rakennustuotteiden ympäristöseloste, PCR	Sama kuin ISO 21930. Biogeenisen hiilen määrä tuotteessa tehtaan portilla on pakollinen ilmoitettava tieto.	Sama kuin ISO 21930.	Sama kuin ISO 21930.
PEF	Tuotteen ympäristöjalanjälki	Tuotteeseen varastoitunut hiili lasketaan väliaikaisena varastona.	Kaikki emissiot välittömiä, ei painotuksia.	

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Standardit ja ohjeistot

ISO, EN, PAS ja PEF

- Standardit pääsääntöisesti ohjeistavat hiilivaraston laskennan hiilenä tuotteessa. Elinkaaren yli tapahtuvassa CO₂-laskennassa varastoinut hiili nollautuu elinkaaren lopussa siirtymällä seuraavaan tuotejärjestelmään tai vapautumalla ilmakehään. Vapautuminen muuna kuin CO₂-päästönä otetaan huomioon.
- (Head, et al., 2021) “Kahdeksasta tutkitusta kasvihuonekaasuja ja puutuotteita käsittelevästä LCA ohjeistuksesta ja standardista [ISO 14067, 21930, EN 15804, 16449, 16485, 16760, UNCPC 31 NAICS 321, EPD Norway PCR], kaikki paitsi ISO 14067 katsovat että hiilen sitominen ja päästöt pitäisi ottaa huomioon LCAssa. Hiilen sitomisen metsässä ne olettavat yksinkertaisesti negatiiviseksi ja vapautumisen positiiviseksi päästökseksi.”
- PAS 2050 sallii yli 100 vuotta tuotteessa pysyvän hiilien laskemisen hiilivarastoksi.

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Puutuotteiden hiilivaraston mallin perusteita

Metsä-puutuote-mallin osia

Sovellettu lähteestä (Brunet-Navarro et al., 2016)

Mallin dynamiikka

- Metsien ja puutuotteiden hiilivarastojen keskinäinen riippuvuus (esim. Levasseur et al. 2013, Leturq, 2020).
- Mallin käyttäytymisparametrien muutokset ajassa: allokaatiot tuotteille, poistumat ja muut teknologiaoletukset, asenteet (esim. Müller 2006, Kalt 2018).

Puun tuotanto ja korjuu

- Jos mallissa on mukana puun tuotanto, katkonta ohjaa jakeet oikein eri käyttötarkoituksiin.
- Katkonnin ohittaminen käyttötarkoitusta määriteltäessä johtaa puutuotteiden kiertoajan aliarviointiin.

Primäärituotanto

- Korjattu puu ohjataan eri käyttötarkoituksiin (saha, kuitu, energia), kierrätykseen tai käytöstä poistoon.
- IPCC Tier 2 käyttää FAOSTAT tuoteluokituksia (sahatavara, levytuotteet, kuitu ja kartonki).
- Tier 3: Esim: Korjattu puu allokoidaan edelleen lopputuotteisiin.

Olemassa olevat hiilivarastot

- Pitkäaikaisvarastot sekä varsinaisissa käyttökohteissa (rakennukset, rakennusosat tai rakennelmat) että käytöstä poiston jälkeen.
- Jo olemassa olevat kaatopaikat ja niiden kertymät voivat olla merkittävä hiilivarasto.

Käyttö ja käytöstä poistuminen

- Säilyminen (retention curves) erilaisilla jakaumaoletuksilla.
- Tuoteryhmällä (rakennukset) voi olla joko yksi keskimääräinen varasto josta tietty osuus poistuu, tai vuosikertavarastoja joiden poistuma vaihtelee ajassa.
- Poistumista pitäisi erotella kierrätettävä osuus.

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Puutuotteiden hiilivaraston mallin perusteita

- Puun **primäärituote- vai lopputuotemallinnus?**
 - Primäärituotemalli voidaan rakentaa joko käytettävissä olevaan raaka-puuhun joka ohjataan käyttötarkoituksiin tai aloittaa tuotetuista puutuotemääristä kuten IPCC metodi. Vertailu laskentatavoista esim. Brunet-Navarro et al. 2018.
 - Primäärituotteita ovat esimerkiksi sahatavara ja levytuotteet. Esim. IPCC (2019),
 - rakennukset, ns arkkityypit, esim Werner et al. 2006, Vares et al 2017, Kalt 2018, Heräjärvi, 2019,
 - rakennusosat, esim. Hafner & Rüter 2018.
- **Metsien hiilivarastojen muutoksen kytkentä.**
 - Metsien käytön, puutuotteiden käyttöajan ja loppusijoituksen ilmastoa lämmittävän vaikutuksen dynamiikkaa on tutkittu jo pitkään (esim. Liski et al. 2001, Levasseur et al. 2013, Smyth et al. 2014, De Rosa et al. 2018, Pichancourt et al. 2018, Brunet-Navarro et al. 2018). Lopputulos on hyvin herkkä mallivalinnoille ja lisäoletuksille.
 - Suomeen sovelletuista metsien kasvumalleissa MONSU ja EFISCEN/CO2Fix liittyvät puutuotteiden varaston dynamiikan metsien käyttöön (Kalliokoski, et al., 2019, s.29).
- **Epävarmuuden mallintaminen:** Ennuste tai suunnittelumalleissa ei voi nojata vain nykyiseen puutuotteiden käyttötapaan. Pidemmällä ajalla sekä tuotteiden kysynnän että puun tarjonnan muutokset ja niiden epävarmuus vaikuttavat hiilivaraston kehitysarvioon.
 - Esim. Müller (2006) MFA malli, sen sovellus Kalt 2018 missä mallinnettu stokastinen käyttöajan muutos. Useat metsä-puutuote-mallit simuloivat epävarmuuksia Monte Carlo – menetelmillä (esim. , Pichancourt et al. 2018, . Brunet-Navarro et al. 2018, Soimakallio et al. 2021).
- **Kaatopaikoille joutunut, tai sinne joutuva, puuperäinen aines** on yksi merkittävä pitkäaikainen hiilivarasto (Pingoud et al. 2003, Dymond, 2012, Smyth et al. 2014, Pichancourt et al. 2018).
- **Puutuotteen elinkaaren pituus.** Yleensä IPCC:n oletusarvo, esim. sahatavaralle puoliintumisaika 35 v. Mahdollinen kiinteä elinkaari voi olla muukin, esim De Rosa et al. 2018 sahatavaralle 60 v., Hafner&Rüter 2018 50 v rakennuksille. Pitkäaikaisvarastojen mallinnuksessa puutuotesektorin rakenteellinen malli lopputuotekäyttöineen (rakennus, huonekalu,...) on uskottavampi tapa mallittaa poistumien vaikutusta.

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Puutuotteiden hiilivaraston mallin perusteita

Puutuotteiden hiilivaraston poistumien stokastinen mallittaminen

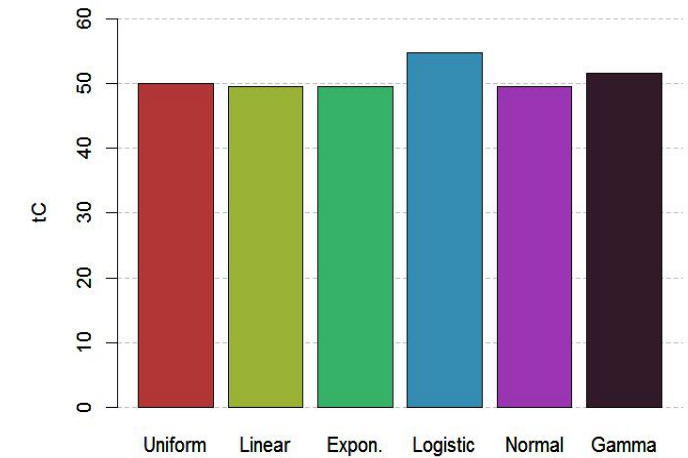
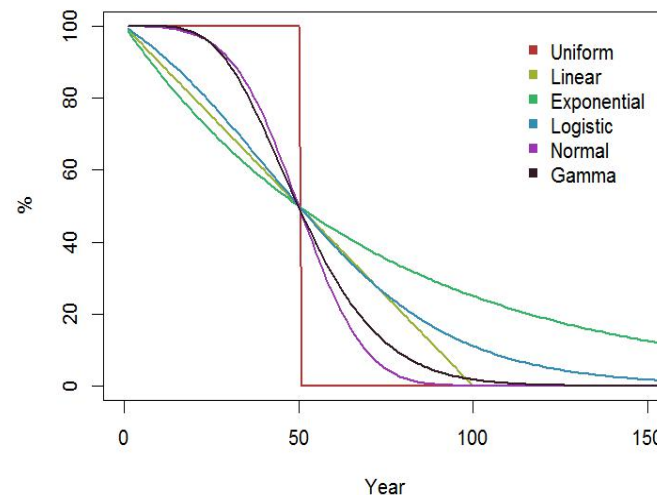
Poistumia hiilivarastosta lasketaan lähes aina ”**first order decay**” mallilla. Siinä vakio-osuus jäljellä olevasta hiilestä poistuu vuosittain, eli määrällisesti suurimmat poistumat tapahtuvat heti käyttöönoton jälkeen.

- Se on realistinen oletus vain keskimääräiselle varastolle.
- Jos käytössä on varastojen vuosikertatietoja, suurin poistuma tulisi tapahtua käyttöä odotusarvon lähellä.

Voidaan olettaa että poistuma on satunnaismuuttuja, eli se noudattaa jotain jakaumaa. Viereisissä kuvioissa on simuloitu oletusjakaumien vaikutusta, siten että:

- jokaisella jakaumalla 50 % hiilestä on jäljellä 50 vuoden kuluttua, mutta poistuman nopeus vaihtelee (käyrien kaltevuus)
 - varastoon tulee 1 tonni hiiltä vuodessa.
- Hiilivaraston saturaatiotaso vaihtelee hyvin vähän (pylväskuvio), mutta siihen tarvittava aika merkittävästi (käyrät).
- ”**Elinkaaren**” alussa ja lopussa erot voivat olla merkittäviä. Jos vaikutuksia simuloidaan muutaman kymmenen vuoden aikajänteellä, poistumaoletuksella voi olla iso merkitys.
 - Kuvioissa First order decay malli vastaa eksponentiaalista jakaumaa, joka on puolestaan erikoistapaus Weibull – jakaumasta.

Distribution function	Median [50% of C left] (year)	5% of C left (year)	Mean [average life] (year)	Mode [maximum rate of carbon loss] (year)
Uniform	50	50	50	51
Linear	50	95	50	0-100
Weibull	50	216	72	1
Logistic	50	121	55	42
Normal	50	74	50	50
Gamma	50	87	52	46



(Kuviot ja taulukko Brunet-Navarro et al. 2016)

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Kirjallisuuskatsaus

- Seuraavaan taulukkoon (ruudut 18-21) koottiin esiselvityksessä löydettyjä tutkimuksia joissa käsiteltiin puutuotteiden tai metsä-puutuote-ketjun hiilivarastojen nykytilaa ja kehitysmahdollisuuksia tai hiilenkierron mallinnuksen menetelmiä.
- Julkaisut järjestettiin ensisijaisesti niissä käytetyn hiilivaraston tyyppin mukaisesti:
 - **P = Primääri puutuote**, yleensä sahatavaran ja levyjen tuotanto. Malleissa on usein mukana myös lyhytaikaisia paperi- ja kartonkivarastoja
 - **A = Arkkityypit**, yleensä käyttötarkoituksen mukaisesti määritellyt rakennusajankohdan mukaiset mallirakennukset
 - **M = Metsä-puutuote-ketjun** mallit, joissa lasketaan sekä metsiin että puutuotteisiin kertyviä hiilivarastoja ja niiden poistumia yhdessä
 - **Mu = Muu tutkimus**. Joko yksittäinen tuote kuten huonekalu tai rakennus, katsausartikkeli tai mielenkiintoinen metodin kehitys
 - **()** = varastotyyppi on mukana osittain. Esimerkiksi (A) voi tarkoittaa vain yhtä mallirakennusta jota on käsitelty arkkityyppinä tai rakennusosa –pohjaista hiilivarastoa tai (M) puun tarjonnan mallinnusta, mutta ei metsien hiilivarastoja
 - ***** = Artikkelin tuloksia raportoidaan tarkemmin jäljempänä kohdassa “Aineistot selvitykset ja työkalut”

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Kirjallisuuskatsaus

Hiilivarastot	Tekijät	Tuoteryhmät	Metodista	Tuloksia
P	Pingoud, et al. (2003)	Sahatavara, levytuotteet		EXPHWP malli joka on pohjana IPCC HWP oletusmetodille. Keskustelua puoliintumisajoista (sahatavaran keskimääräinen käyttöikä 30-40 v.). Puuvirtojen fyysinen IO -taulu Saksassa
P	Bösch, et al. (2015)*			
P	Brunet-Navarro, et al., (2017)	IPCC ryhmät	Laskennallinen simulointi eri lähtöoletuksilla	Puutuotteiden elinajan ja kierrätyksen vaikutus hiilivaraston kertymään. Teoreettinen simulointi. Hiilivarasto kasvaa elinajan kasvaessa lineaarisesti, mutta kierrätyksen vaikutus on eksponentiaalinen.
P	(M) Brunet-Navarro, et al., (2018) *	IPCC ryhmät, ml paperi	Dynaaminen, allokaatioparametreillä stokastiikka. Simulointi 500-1000 (steady state).	Eriasteisten hiilivarastomallien vertailulaskelmia Saksassa ja EU-28 maissa. Vakiokertoiminen kierrätysosuus yliarvioi hiilivaraston kertymää. Simulointi rajoitetummalla kaskadiketjulla realistisempi, mutta edellyttää oletuksia tuotetasolla. Kaksi eri mallia: puun kasvuun perustuva joka jakaa korjattavan puun tuotteiksi (vain Saksassa) ja FAOSTAT tuoteryhmiin perustuva malli EU-28. Tuloksissa ei suurta eroa. Tulokset tC per metsähehtaari. R -koodi ja inventaarit dokumentoitu artikkelin liitteenä.
P	Head, et al. (2021)	Rakennuksissa käytettäviä puutuotteita	Dynaaminen, CBMF-HWP mallin sovellus.	dynamic cradle-to-grave LCAs of Canadian wood products. Rakennuksissa käytettävien puutuotteiden ajan suhteen erilaiset biogeenisen hiilen profiilit.
P	(A) Kalt (2018), Kalcher, et al. (2015) & Müller (2006)	Puunkäyttö Itävallan asuinrakennus-kannan runkorakenteissa.	Dynaaminen simulointi, stokastinen käyttöikä. Skenaario 2015-2100	(Müller, 2006) Dynaaminen malli, Materia Flow Analysis. Esimerkki betonille, mutta sovellus puulle (Kalt, 2016). missä väestönmuutoksen ja huoneistoalan per capita vaikutus. Itävallan asuinrakennuskannan arvio (Kalcher et al. 2015)).
P	(A) M Dymond (2012, 2016)*		Hiilivarastojen kirjanpitomalli, 17 varastoa yli 1 v. IPCC puoliintumisajat. Simulointi 1965-2065	CBMF-HWP sovellus. Puutuotteiden elinkaaren mallinnus British Columbiassa, ml. valmistus ja jätteiden käsittely.
P	(A) M Smyth, et al. (2014)	Hiili joka poistuu metsästä, IPCC decay -malli jakeille. Substituutiassa rakennustyyppeihin sitoutuva hiili.	CBMF-HWP sovellus. Eksplisiittinen linkitys metsästä tulevan puun määrään. Mekaaninen IPCC puoliintumisajat, simulointi 2015-2050,	Kokonaisvaltainen metsä-puunkäyttö ja käytöstä poiston malli. Soveltuu skenaarioiden simulointiin. Monipuolinen mallikokonaisuus, mutta puutuotepuolella lähtökohtana on käytettävissä olevan materiaalin määrä sen sijaan että mallinnettaisiin käyttövaihtoehtoja. Mallien CBM -CFS3 ja CBM-HWP ketjutus.

Hiilivarastot: P = Primääriset puutuotteet, A = Arkkityyppi -mallinnus, M = Koko metsä-puutuote malli, Mu=Muu, () = osittain. * ks Aineistot, selvitykset ja työkalut

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Kirjallisuuskatsaus

Hiilivarastot		Tekijät	Tuoteryhmät	Metodista	Tuloksia
P	(A) M	Pichancourt et al., (2018)*		Sovellus jolla voi rakentaa mallin. Dynaaminen simulointi, stokastiset parametrit.	Varastot: Maanpäällinen ja maanlainen, DOM, puutuotteet käytössä ja kaatoaikalla. IPCC laskentaa, johon voidaan liittää materiaali ja energiasubstituutio, ketjun GWP ja EoL. Metsämallin parametrit ja rakenne on sovitettavissa, samoin HWP malli. https://sourceforge.net/p/lerfobforesttools/wiki/CAT/ .
P	A M	Xie 2020*	Primäärituotteet ja lopputuotteet	Puutuotteiden elinkaarin simulointimalli	Puutuotteiden valmistuksen ja käytön skenaariopohjainen simulointi, potentiaali ilmastonmuutoksen torjunnassa. MitigAna –malli rakennettu CBM-FHWP alustalla.
P	(A) Mu	Bates, et al. (2017)	Havu- ja lehtipuu sahatavara, OSB, paneelit, muut.		Kuvaus hiilikompensointiin käytetystä mallista Kaliforniassa (CA ARB). Metsistä korjattava puu jaetaan tuoteryhmille ja niille annetaan laskennalliset käyttäjät, selvästi alueellisesti sovitettu malli.
P	M	Taverna et al. (2007)& Werner et al. (2010)	Rakennukset, Kalusteet, muut puutuotteet	MFA malli kuten Müller (2006). Puun käyttötarve ohjaa metsien hyödyntämistä.	Metsä ja puutuotemallien yhdistelmä. Metsien kestävä käyttö on myös hyvää ilmastopolitiikkaa. Vahva painotus materiaali ja energiasubstituutiolla. Orientaatio Kioton pöytäkirjan mukaisessa KHK arvioinnissa, tulokset voivat olla vanhentuneita laskentasääntöjen ja/tai uusien politiikkatavoitteiden näkökulmasta.
P	M	Zubizarreta-Gerendiain et al. (2016)*	Sahatavara ja levyt, mekaaninen massa, kemi. massa, energiapuu	Suomalainen metsien käytön monisuunnittelun (MONSU) –malli.	Koko Suomen metsäsektorin kattava tarkastelu jossa mukana elinkaariset päästöt ja substituutiovaikutukset. Ilmastomuutoskenaarioiden vertailu.
P	M	Chen, et al. (2018)	Sahatavara, rakenne levyt, sisustus/huonekalu levyt, kuidutus.	IPCC decay malli, simulointi 100 vuotta eteenpäin.	CASE-HWP (Comprehensive assessment of the Carbon Stocks and Emissions). Mallinnetaan eri puutuotteille ajasta riippuva elinkaari (kuinka paljon jäljellä käyttöönoton jälkeen → LCA hiilikäyrä. Tämä yhdistetään substituutiovaikutukseen ja metsistä tulevaan hiilivirtaan ja metsissä tapahtuvaan hiilen muutokseen. Puutavara ja levyt käytetään kiintein osuuksin rakennuksiin joille puoliintumisaika.
P	M	De Rosa, et al. (2018)	Sahatavarassa oleva hiilivarasto.	Dynaaminen päästöaikaa karakterisoiva ilmastovaikutus.	Etelä-Ruotsalainen metsämalli, mutta consequential LCA mallissa marginaalivaikutukset tulevat Brasilian selluotannosta. Hiilen sitomisajalla puutuotteissa on merkitystä ilmastovaikutukselle. 60 v. käyttöaika. Kaksi eri mittaria GWP ja GTP.
P	M	Seppälä, et al. (2019)			Metsään kertyvän hiilivaraston ja tuotteisiin sitoutuvan hiilivaraston nettomuutokset, ehdollisen puun korjuun lisäämiselle nykytasolta. Puutuotteisiin sitoutuvan hiilen muutokset ovat suhteellisen pieniä johtuen nopeakiertoisista puutuotteista (sellu, energia) verrattuna metsässä tapahtuviin maanpäällisiin ja maaperän hiilivaraston alenemiin. Painotus substituutiossa.

Hiilivarastot: P = Primääriset puutuotteet, A = Arkkityyppi -mallinnus, M = Koko metsä-puutuote malli, Mu=Muu, () = osittain. * ks Aineistot, selvitykset ja työkalut

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Kirjallisuuskatsaus

Hiilivarastot	Tekijät	Tuoteryhmät	Metodista	Tuloksia
P M	Soimakallio et al, (2021)	Sahatavara, Levyt, paperi	Stokastinen simulointi (Monte Carlo), kolme eri hakkuuskenaariota. Suorat emissiot, varastojen muutos, fossiilinen CO2 substituuio.	Hakkuutasojen nosto vuosien 2013-2014 tasolta ja niiden vaikutus KHK kaasujen päästöihin ja hiilivarastoihin. KHK kaasujen nettopäästöt ilmakehään kasvavat jos hakkuuta lisätään vähintään melko varmasti tarkasteluperiodilla.
P	Mu Werner, et al. (2006)	12 kpl: Rakennusosia (6), sisustustuotteet (5) ja huonekalut (1)	Dynaaminen, mutta vain mekaanisia parametrimuutoksia. Skenaario 2000-2130	Ottaa huomioon valmistuksen ja ulkomaankaupan. Eri tuoteryhmillä ero siinä kuinka suuri substituuiovaikutuksia on maan rajojen sisällä. Puutuotteiden vaikutus pieni, mutta hyvä keino mutta vähän pidemmällä ajalla. Diskreetti taulukkolaskentamalli; konvergoituu nollassolle ajan kanssa.
A	Hafner & Rüter, (2018)	Tyyppirakennuksia joista LCA laskenta	Mekaaninen simulaatio 2016-2030	Mallirakennuksia, joiden osuus uusrakennuskannasta selvitetään, oletus että puurakentaminen kasvaa vuoteen 2030, vaikutus hiilivarastoon myös substituuion kautta kansallisesti. Vertailulaskelmia eri materiaaliratkaisujen välillä.
A	Amiri, et al. (2020)	50 eri rakennustyyppiä	Staattinen nettohiili -laskelma	Skenaariolaskelma jossa korkean ja matalan hiili-intensiteetin vaikutusta simuloidaan erilaisilla puurakentamisen osuuden muutoksilla.
A	Vares, et al. (2017)		Staattinen, Nykytilanteen (2016) hiilivarasto	Rakennuskannan hiilivaraston arviot rakennusvuosikymmenittäin vuoteen 2016 asti.
(A) M	Gustavsson, et al. (2017)	Metsänhoito, rakennukset ja energiasubstituuti o.	Cumulative Radiative Forcing mittari. Simulointi 100 v.	Metsänhoidon skenaarioiden kasvuvaikutukset ja hiili-intensiivisen materiaalin korvaaminen valitulla mallirakennuksella. Aktiivinen metsänhoito ja korkea korjuuaste ja tehokas puutuotteiden käyttö tuo enemmän ilmastohyötyjä kuin alempi korjuuaste ja hiilen sitominen metsään.
M	Liptow et al. (2018)	Muovit	Katsaus hiilenkierron mallinnuksen menetelmiin.	Several assessment methods have been proposed in recent years, with their development still being in progress. We recommend efforts to harmonize and reconcile different approaches for the assessment of climate impact of biomass-based products with regard to (1) how they consider time, (2) their applicability to both short and long rotation crops and (3) harmonization of concepts and terms used by the methods.
(M) Mu	Heräjärvi, (2019)	Rakennukset. Kanta-arvio (Vares et al., 2017)	Staattinen	Ei metsä-puutuote-ketjun mallinnusta, mutta puun tarjonnan rajoitteisuus huomioidaan. Uusiin rakennuksiin sitoutuvan hiilen määrä. Building Sink Effect (BSE), prosenttiosuus kansallisista KHK päästöistä. BSE:n nosto hyvin vaikeaa, tai ainakin edellyttää, että lähes kaikki puu käytettäisiin rakentamiseen.
Mu	Sathre & O'Connor, (2010)	Rakentaminen	Substituutiokertoimien arviointi	Katsausartikkeli betonin ja teräksen korvaamisella puulla. Keskimääräinen substituutiokerroin 2,1.
Mu	Levasseur, et al. (2013)	Tuolin elinkaari	Dynaaminen LCA	Metodia kuvaileva case-tutkimus.
Mu	Jasinevičius et al. (2015)		Models and their properties	Review. Hiililaskentamallit puutuotteissa. Mallien ominaisuuksien kattava systematisointi. Lähemmin tarkastellut mallit suhteellisen vanhoja, vuosilta 1981-2012. Mukana MONSU, Werner (2010).

Hiilivarastot: P = Primääriset puutuotteet, A = Arkkityyppi -mallinnus, M = Koko metsä-puutuote malli, Mu=Muu, () = osittain. * ks Aineistot, selvitykset ja työkalut

II Laskentasäännöt ja menetelmäkehitys

Tieteellinen tutkimus

Kirjallisuuskatsaus

Hiilivarastot	Tekijät	Tuoteryhmät	Metodista	Tuloksia
	Mu Brunet-Navarro, et al. (2016)		Model and model use characteristics.	A comparative review of 41 Wood product models (WPMs). For purposes of simulating carbon stock in wood products, models with a simple structure may be sufficient, but to compare climate change mitigation options, complex models are needed.
	Mu Hill, (2019)			Katsaus rakennetun ympäristön elinkaaritutkimukseen.
	Mu Carle, et al. (2020)		CMB-CFS3 mallin laajennus HWP:illä . Hiilitonni vuosi (CTY) mittari	Hiilivaraston mittayksikkö, jolla voidaan vertailla eri varastomuotoja, vaikka varastojen kesto aika eroaa. Hiilitonni vuosi (CTY) mittari: kuinka monta vuotta hiili on varastoituna. Yhdenmukainen mittari eri hiilivarastoille. Metsien hiilivaraston maksimoiva varastonmuutos on riittämätön korvaamaan vähentyneiden hakkuiden vaikutusta puutuotteissa.
	Mu Zhang et al. (2020)			globaalilla panos-tuotos mallilla yhdistetään puutuotteet lopputuotteiden käyttöön eri maissa.

Hiilivarastot: P = Primääriset puutuotteet, A = Arkkityyppi -mallinnus, M = Koko metsä-puutuote malli, Mu=Muu, () = osittain. * ks Aineistot, selvitykset ja työkalut

III Käytännön ratkaisuja

Käytettävissä
olevia tietolähteitä

Selvitykset
hiilivarastojen
määrästä

Työkaluja
arviointiin

Hiilivarastolaskurin
jatkokehittäminen
Suomessa

III Käytännön ratkaisuja

Esiselvityksessä tarkasteltiin lähemmin:

- 4 tietolähdettä
- 3 selvitystä ja
- 10 työkalua,

joita voitaisiin käyttää tai niitä on jo käytetty pitkäaikaisten hiilivarastojen laskentaan. Vain osa näistä oli mukana edellä esitetyssä tieteellisten julkaisujen [katsauksessa](#).

- [Seuraavassa ruudussa](#) nämä työkalut luokitellaan niiden [mahdollisen käyttötarkoituksen mukaisesti](#).
- Tämän jälkeen on tarkempi kuvaus jokaisesta aineistosta, selvityksestä ja työkalusta (ruudut 26-48).

Osan III lopussa on yhteenveto sitä miten näitä tietolähteitä, selvityksiä ja työkaluja voitaisiin käyttää pitkäaikaisten hiilivarastojen arviointityökalun kehityksessä, seuraavasti:

- [Hiilivarastolaskurin jatkokehitys; Puutuotelaskuri](#)
- [Hiilivarastolaskurin jatkokehitys; Puutuotesektorin rakenteelliset laskurit](#)
- [Hiilivarastolaskurin jatkokehitys; Metsäsektorin hiilivarastolaskurit](#).

Selvityksen johtopäätökset esitetään [osassa IV](#).

III Käytännön ratkaisuja

	Alue	Suunnitelumallit; rakenteisiin sitoutuvan hiilen määrä	Puutuotteiden hiilivaraston muutoksen seuranta	Metsä- puutuote-ketjun hiilivarastot	Kuvaus
Tietolähteitä					
MRL uudistus	Suomi	(X)			Suunnitelma
CO2data.fi	Suomi	(X)			Rakennustuotteiden GWP ja hiilivarasto tietokanta
VTT Rakennuskannan hiilivarasto, 2017	Suomi	X	X		Selvitys rakennuskantaan sitoutuneesta hiilestä
Uudisrakentamisen määrä	Suomi	(X)	(X)		Rakentamisen määrän kehitys rakennustyypeittäin ja hiilen sidonnan potentiaali
Selvitykset					
Vähähiilisen puurakentamisen tiekartta (2020)	Suomi	(X)	X		Puutuoteteollisuus ry laskelma puurakentamisen vaikutuksesta hiilen sitomiseen
Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki (2021)	Suomi			X	Rakennusteollisuuden selvitys rakennusten kokonaishiilitaseesta
Puuvirtojen fyysinen panos-tuotos taulu (2015)	Saksa		X		Puutuoteteollisuuden materiaalivirrat
Työkalut					
MECOREN työkalu (2012)	Nordic	X	X		Rakennuskannan arkkityypit sisältävä työkalu
Tampere puurakentamisen tietokanta (2017)	Tampere	X			Alueellinen rakennuskantaan sitoutunut hiilen työkalu
Trebaserat karbonlagring i bygningsmasse (2020)	Norja	X	X		Alueellinen/kansallinen rakennuskannan hiilivaraston laskentatyökalu
Wood C calculator (2016)	Kanada		X	X	Puutuote-ketjun hiilitaseen laskentatyökalu, laskee tulevat poistumat
MONSU, Monitavoitteinen metsäsuunnittelu (2016)	Suomi		X	X	Metsä-puutuote-ketjun hiilitaseen laskentatyökalu
CO2Fix, European Forest Institute (2004)	Geneerinen		X	X	Metsä-puutuote-ketjun hiilitaseen laskentatyökalu
Wood flow model for Swiss timber industry (2007)	Sveitsi		X	(X)	Puutuote-ketjun hiilitaseen laskentatyökalu, yhdistettävissä metsämalliin
A Carbon Accounting tool, CAT (2018)	Ranska		X	X	Metsä-puutuote-ketjun hiilitaseen sovellus
Brunett-Navarro WPM model (2018)	Saksa & EU		X	(X)	Puutuote-ketjun hiilitaseen sovellus, yhdistettävissä metsämalliin
Framework for Harvested Wood Products (CBM-FMWP)	Kanada	X	X	X	Työkalu hiilivirtojen ja –varastojen mallin rakentamiseen ja simulointiin

Maankäyttö- ja rakennuslain uudistustyö ja rakennusten hiilivarasto, Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä (toim. Matti Kuittinen, 2019):

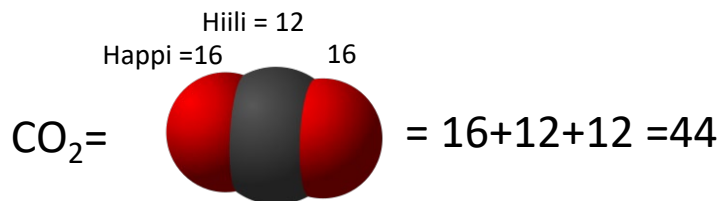
- Julkaisu ei ole tällä hetkellä saatavissa. Menettelytapaa korjataan vähähiilistä rakentamista koskevan asetuksen valmistelun yhteydessä.
- Ympäristöministeriön nykyisen menettelytapaohjeen mukaisesti puutuotteisiin sitoutunut hiili otetaan rakennuksen arviossa huomioon hiilikädenjälkenä.
- Edellytyksenä on, että materiaali on peräisin kestävästi hoidetusta alkuperästä ja ettei sen korjuulla ole pysyvästi heikennetty ekosysteemin luonnollista hiilinielua.
- Hiilivarasto kuuluu rakennuksen elinkaaren ulkopuolisiin nettomääräisiin ilmastohyötyihin vaikuttaviin tekijöihin (D4 Hiilivarastovaikutus / Carbon storage effect). Hiilivarasto lasketaan rakennuksessa käytettävälle materiaalille rakennuksen elinkaaren ajalta, tuotteiden vaihtoja ei voi ottaa laskennassa huomioon.
- Tuotekohtaisia hiilivarastoarvoja julkaistaan [CO2data](#) tietokannassa.
- Tulos ilmoitetaan yksiköissä kg CO₂e/m²/a ja kg CO₂e. Pinta-ala lasketaan lämmitettyjen kerrostasojen summana kerrostasoja ympäröivien ulkoseinien sisäpintojen mukaan laskettuna. Aikajakso tarkoittaa arviointijakson pituutta vuosina.
- Uutena vaatimuksena on tulossa vaatimus, jonka mukaan hiilivarasto otetaan huomioon vain tuotteilla, joiden käyttöikä on vähintään 100 vuotta.

III Käytännön ratkaisuja

Käytettävissä olevia tietolähteitä • CO2data.fi

Hiilivaraston käsittely CO2data-tietokannassa, www.co2data.fi

- Hiilivarasto (-kädenjälki) ilmoitetaan negatiivisena arvona.
- Kädenjälkeä ei lasketa yhteen ilmastovaikutuksen (GWP) kanssa.
- Hiilivarasto ilmoitetaan kaikille puutuotteille, vaikka valittava menetelmä voi rajoittaakin arvon hyödyntämisen vain tuotteille, joiden arvioitu käyttöikä on vähintään 100 vuotta.
- Arvo on laskettu tuotteen kuiva-ainepitoisuuden perusteella.
- Varasto on laskettu standardin EN 16449 mukaisesti olettaen massa hiilipitoisuudeksi 50% ja ilmaisten lopputulos hiilidioksidina atomipainojen perusteella muuntaen:



Hiilidioksidin ja siinä olevan hiilen muuntokerroin 44/12=3,67.

Version 1.00.002, 2021-04-25

CLT, Cross laminated timber	0.2 kg CO ₂ e /kg
CLT, ristiinliimattu monikerroslevy	KONSERVATIIVINEN ARVO RAKENTAMISLUVAN HAKEMISEEN, GWP (A1-A3)
Korslimmat trä	

LISÄÄ LUETTELOON

Ympäristöindikaattorit

TYYPILLINEN ARVO, GWP (A1-A3)
Ei käytetä rakentamislupaa haettaessa

0.17 kg CO₂e /kg

KONSERVATIIVISEN ARVON KERROIN

1.2

HIILIKÄDENJÄLKI

D1 Re-use and material recycling
D2 Energy recovery
D4 Carbon storage effect
D5 Carbonation

-1.6 kg CO₂e /kg

1 m³ havupuuta:

Kuivapaino: 370-420 kg (uunikuivaa)

Hiiltä 50 % painosta, esim. 400 / 2 = 200 kg

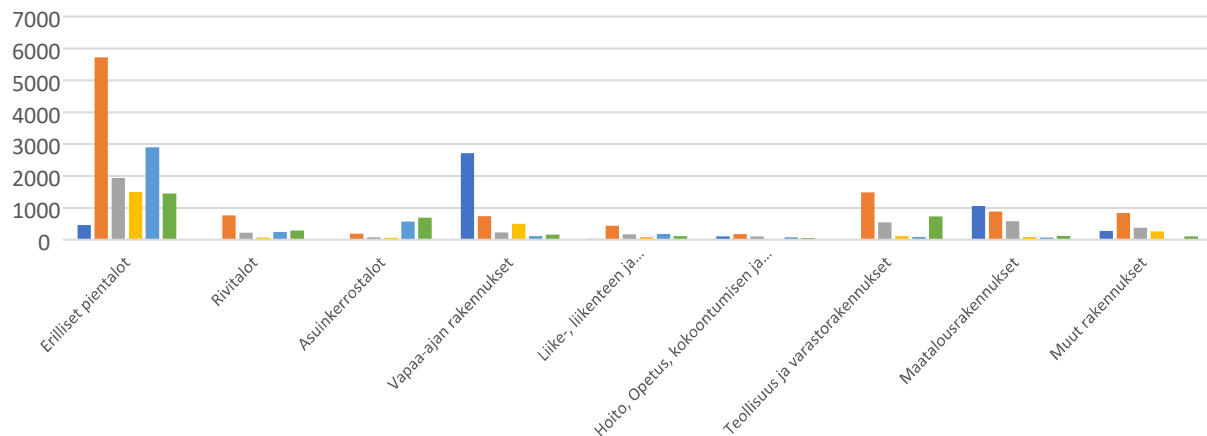
➔ 1 m³ puuta on sitonut ilmakehästä CO₂: 3,67*200 = 734 kg.

III Käytännön ratkaisuja

Käytettävissä olevia tietolähteitä

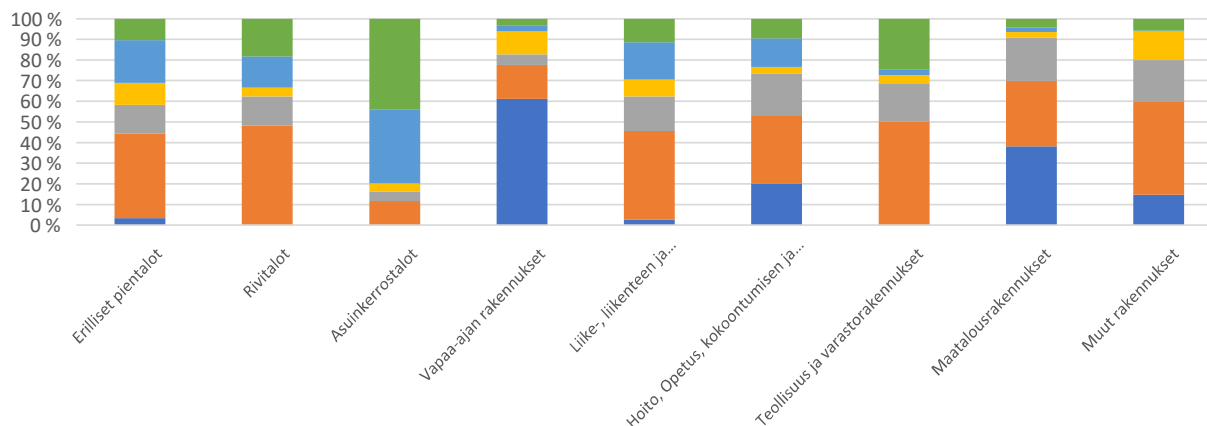
- VTT Rakennuskannan hiilivarasto

Hiilivarastot rakennusosissa arkkityypeittäin, Milj. tonnia



- Hirsirakenteiset ulko- ja väliseinät
- Rakennuksien runko (ulko- ja väliseinät, ala-, väli- ja yläpohjat)
- Ulkovaipan laudoitukset (julkisivut ja katealusta)
- Sisätilojen paneloinnit (seinä-, katto-, ja lattia pinnat)
- Rakennuslevyt
- Ikkunat ja ovet

Hiilivarastot rakennusosissa arkkityypeittäin, Suhteellinen osuus



Rakennusvuosikertojen mallinnus, vuoteen 2016.

- Vuosikertojen mallinnetuilla tyypeillä on jokaisella sidotun hiilen ominaiskertoimet.

Arvioidusta hiilivarastosta 65% on mallinnetuissa rakennuksissa, loput ilman rakennuslupaa olevissa vähäisissä rakennuksissa 11%, piharakenteissa 8 % ja infrarakenteissa 16%.

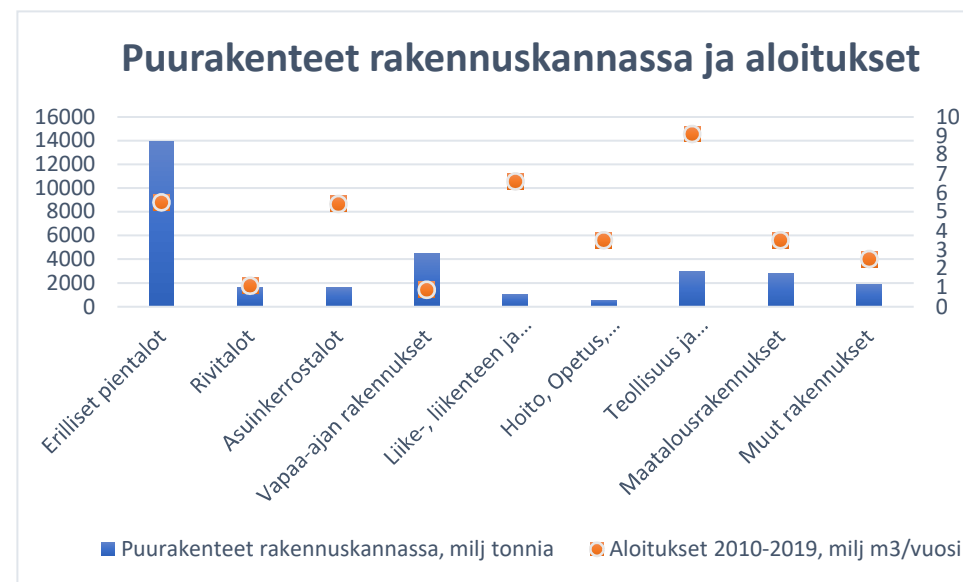
Lähde: Vares et al., 2017.

III Käytännön ratkaisuja

Käytettävissä olevia tietolähteitä

- Uudisrakentamisen määrät ja vaikutus hiilivarastoihin

- Rakentamisen määrät:
 - käynnistykset: Pien- ja kerrostalot sekä teollisuus- ja varastorakennukset muodostivat yhteensä puolet uudisrakentamisen tilavuudesta
 - korjausrakentamisen arvo nousi nelikertaiseksi vuosituhaten aikana
 - vuonna 2019 uudisrakentamiseen puuta 1.3 milj. m³ ja korjausrakentamiseen 1,0 milj. m³ (Puutuoteteollisuus ry, 2020).
- Erillis- ja pientalot muodostivat suurimman osan nykyisen rakennuskannan puurakenteista.
- Aloitusten suhteellinen määrä vuosina 2010-2019 oli suurin matalan hiilivaraston sisältävissä teollisuuden ja kaupan rakennuksissa ja asuinkerrostaloissa.
- Potentiaali kasvattaa hiilivarastoa rakennuskannassa puurakenteilla on näissä pientalojen ohella suurin.



Lähteet: Rakennusteollisuuden suhdannekatsaus 2019, Vares et al., 2017.

III Käytännön ratkaisuja

Selvitykset hiilivarastojen määrästä

- Vähähiilisten puurakentamisen tiekartta

Puutuoteteollisuus ry (2020):

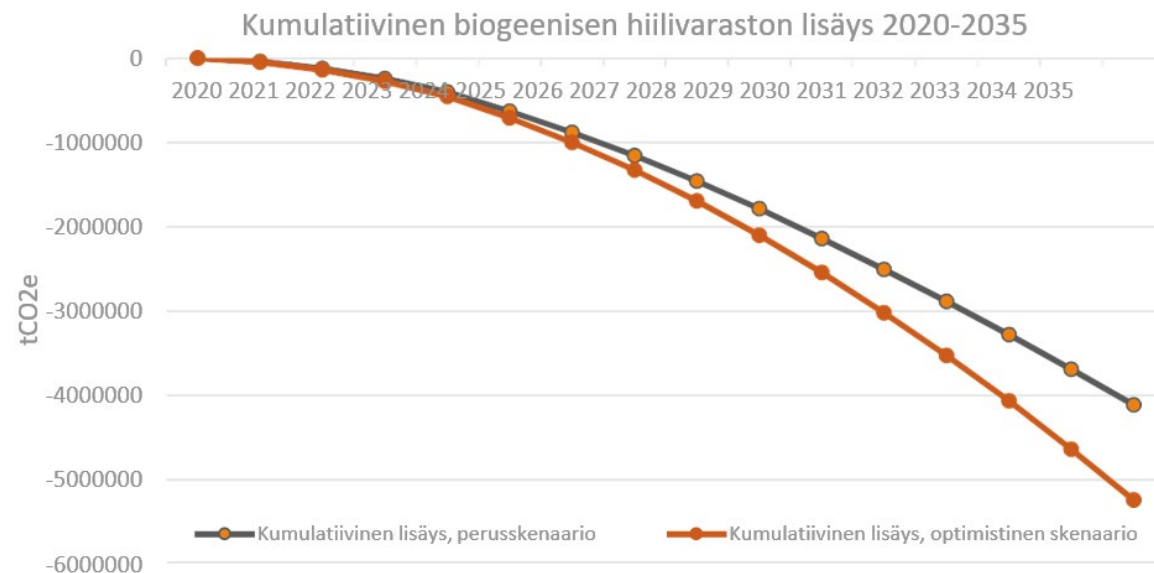
Selvityksessä esitettiin arvio puurakentamisen synnyttämän biogeenisen hiilivaraston kasvupotentiaalista vuoteen 2035 mennessä.

Perusskenaariossa puurakennusten osuudet 2035 (suluissa vuoden 2017 osuus):

- pientalot, rivi- ja ketjutilat 90 % (80 %)
- kerrostalot 35 % (5 %)
- muut asuinrakennukset ja vapaa-ajanrakennukset 98 % (98 %)
- liike- ja toimistorakennukset 32 % (12 %)
- julkiset palvelurakennukset 65 % (27 %)
- teollisuus- ja varastorakennukset 35 % (22 %)
- muut rakennukset 75 % (69 %).

Biogeenisen hiilivaraston vaikutusarvioinnin pohjatiedot perustuivat todellisten puurakennuskohteiden hiilijalanjälkilaskennoista koostuvaan aineistoon sekä kirjallisuuslähteisiin.

Vuoteen 2035 mennessä Suomen koko rakennuskannan pitkäikäistä biogeenistä hiilivarastoa voitiin kasvattaa 4 - 5 miljoonaa tCO₂. Se on noin 5 % koko Suomen [rakennusluvittuun] rakennuskantaan vuonna 2016 sitoutuneesta biogeenisestä hiilivarastosta.



Lähde: Puutuoteteollisuus ry (2020):

III Käytännön ratkaisuja

Selvitykset hiilivarastojen määrästä

- Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki

Laine et al., (2021), Gaia Consulting Oy, Rakennusteollisuus RT ry.

Laskelma koko metsä-puutuote-ketjun kattavan hiilitaseen kehityksestä metsän oletetun kasvusyklin aikana.

Kokonaishiilijalanjälki = biogeeninen hiilivelka + hiilijalanjälki.

Biogeeninen hiilivelka = rakennukseen hankittujen puumateriaalien hakkuiden aiheuttama metsän hiilensidontakyvyn ja hiilitaseen muutos.

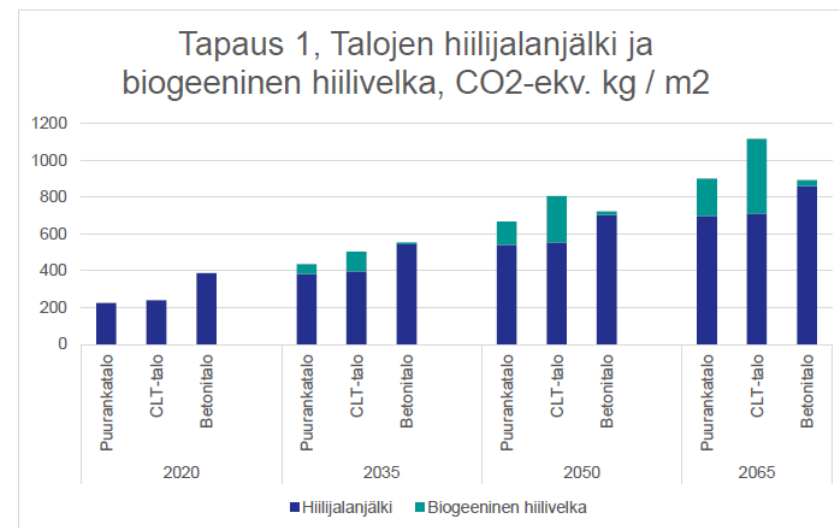
Selvityksessä hiilivelan muutos laskettiin vertailuskenaarioon nähden.

Vertailuskenaario = metsää ei hakata, hiilivarasto jatkaa kasvuaan puun järeytyessä ja lahoppuun lisääntyessä.

Oletus: Puun käytön hiilineutraalisuus. Talousmetsien skenaariossa normaalimetsä tuottaa rakennuksessa tarvittavan puun 75 vuodessa, metsän hiilitase ei muutu.

Selvityksessä saatu tulos on ehdollinen valitulle aikajaksolle ja

oletuksille talousmetsän käytöstä. Vertailuskenaariossa hiilivarastot jatkavat kasvuaan ikimetsässä, mutta talousmetsän hiilivaraston oletetaan olevan vakion, joten hiilivelka kasvaa ensimmäisen tarkasteluajanjakson (75 v.) aikana. Toisaalta, tehdyin oletuksin vuonna 76 puurakennuksessa mahdollisesti jäljellä oleva puumäärä korjaisi kokonaisuudessaan hiilivelkaa. Tämän lisäksi, jos talousmetsää ei vuonna 76 hakata, sen hiilivarastot jatkaisivat kasvuaan ja hiilivelka häviäisi vähitellen.



Kuva 3 Talojen hiilijalanjälki (sininen palkki) ja biogeeninen hiilivelka (turkoosi palkki), kun puu on tuotettu etelä-suomalaisessa kuusikossa. Hiilijalanjäljen lähde: Viljakainen & Lahtela 2019.

Lähde: (Laine et al. 2021)

Selvityksessä laskettu hiilivelka nollautuisi kansallisella tasolla vain jättämällä metsät kokonaan talouskäytön ulkopuolelle. Lisäksi käytetyn puun tulisi kadota täydellisesti hiilikierrosta tasan 75 vuoden käytön jälkeen.

III Käytännön ratkaisuja

Selvitykset hiilivarastojen määrästä

- Puutuoteteollisuuden materiaalivirrat

Puuvirtojen fyysinen panos-tuotos taulu (Bösch et al, 2015).

Panos-tuotos malli on kuvaus toimialojen kytkennöistä. Vastaava kuvausta tällä tarkkuudella Suomen metsä- ja puutuotesektorien rakenteesta ei ole saatavilla.

Table 6

Leontief inverse $(I - A)^{-1}$ of the 15 sector PIOT in Table 4 (million cubic meters wood fiber equivalent).

	million m ³ (f)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Forestry	1.000	0.000	0.742	0.000	0.000	0.866	0.578	0.592	0.633	0.481	0.352	0.755	0.492	0.116	0.102	0.511
2	Producers of landscape care wood	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	Retailers of wood proc. residues	0.000	0.000	1.070	0.000	0.000	0.000	0.330	0.223	0.031	0.545	0.051	0.086	0.208	0.049	0.043	0.332
4	Recovered wood industry	0.000	0.000	0.023	1.000	0.000	0.000	0.111	0.075	0.010	0.012	0.017	0.029	0.005	0.001	0.001	0.007
5	Recovered paper industry	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.452	0.397	0.040
6	Saw mill industry	0.000	0.000	0.765	0.000	0.000	1.000	0.236	0.392	0.690	0.390	0.340	0.759	0.149	0.035	0.031	0.237
7	Wood-based panel industry	0.000	0.000	0.227	0.000	0.000	0.000	1.070	0.723	0.100	0.115	0.165	0.279	0.044	0.010	0.009	0.070
8	Furniture industry	0.000	0.000	0.115	0.000	0.000	0.000	0.035	1.024	0.003	0.059	0.005	0.009	0.022	0.005	0.005	0.036
9	Wood packing industry	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	1.000	0.007	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.004
10	Pellet and briquette industry	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	Other wood processing industries	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	Construction industry	0.000	0.000	0.126	0.000	0.000	0.000	0.039	0.026	0.004	0.064	0.006	1.010	0.024	0.006	0.005	0.039
13	Pulp industry	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.236	0.207	0.807
14	Paper industry	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.877	0.000
15	Printing and publishing industry	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
16	Other industries	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

Böshin mallia on käytetty mm. Brunett-Navarro et al. tutkimuksissa.

Lähde: (Bösch et al, 2015).

- Leontiefin kääntematriisin elementit osoittavat toimialojen välisiä sidoksia kerrannaisvaikutuksineen; se on avain puuvirtojen allokontiin eri toimialoille ja sitä kautta erilaisten hiilivarastojen syntymiseen.
- Saksassa puutuotevirrat ovat hyvin lineaarisia; toimialat jalostavat raaka-aineet suoraan lopputuotteiksi tai vientiin, ei välituotteiksi toisille toimialoille.
- Panos-tuotos -malli on yleensä staattinen ja nojaa yksinkertaistaviin oletuksiin esimerkiksi toimialoille tyyppillisistä tuotteista ja tuotantomäärien taloudellisiin painotuksiin.

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin; Puutuotteet

- MECOREN (rakennuskannan kuvaus)

MECOREN, Häkkinen et al. (2012)

- MECORE kehitettiin VTTn koordinoimassa pohjoismaisessa hankkeessa, alun perin rakennuskannan korjaustarpeista syntyvää energian käytön ja hiilijalanjäljen vaikutusten arviointia varten.
- Malli kattaa laajat tiedot rakennuskannasta, mm:
 - rakennusten määrät ja poistumat
 - pinta-ala, tilavuus, kerroskorkeus
 - asuntojen lukumäärä, asukkaiden lukumäärä
 - keskeisten rakenteiden pinta-alat
 - vertikaalin kantavan rakenteen materiaali
 - korjaustarve (suuri, pieni).
- MECOREN tietokannassa on vain asuinrakennukset. MODERN hankkeessa tarkastelua on laajennettu muihin rakennustyyppeihin.

MECOREN hankkeessa on selvitetty rakennuskannan rakenteen muutoksia vuosikymmenittäin

Table 51. Vertical load bearing structure of detached houses. Source: VTT's and Statistics Finland's housing data. As in 2008.

Detached houses	Sum of floor area, 1000 m ²	Concrete Floor area, 1000 m ²	Brick, floor area, 1000 m ²	Steel, floor area, 1000 m ²	Wood, floor area, 1000 m ²	Unknown + other, floor area, 1000 m ²
-1920	7 861	37	107	5	7 480	233
1921-1939	7 312	74	253	2	6 801	181
1940-1959	25 707	533	719	9	24 035	412
1960-1969	14 081	636	1 913	7	11 304	223
1970-1979	22 011	724	2 564	29	18 344	351
1980-1989	29 15 9	1 585	1 325	43	25 945	261
1990-1999	18 974	1 137	602	36	16 983	216
2000-2008	20 078	2 031	430	62	17 121	434
Unknown	2 965	187	84	11	2 532	152
sum	148 148	6 944	7 996	204	130 543	1 636
	100%	5%	5%	0.1%	88%	2%

Table 55. Surface areas of detached houses, estimated.

Detached house	Wall area, m ²	Roof area, m ²	Floor area, m ²	Window area, m ²
-1920	128	150	150	17.5
1921- 1939	125	127	127	14.8
1940-1959	120	121	121	14.2
1960-1969	130	149	149	20.0
1970-1979	132	152	152	20.5
1980-1989	129	126	126	14.7
1990-1999	131	124	124	14.5
2000-2008	144	140	140	16.4

- Ei sisällä hiilivarastoarviota, mutta työkalussa on mallinnettu arkkityyppien ominaisuudet vuosikymmenittäin vuoteen 2008 asti.
- Samaa pohjatietoa on käytetty Vares et al. (2017) laskelmissa, missä hiilivarasto on tuotettu ominaiskertoimilla.

Lähde: Häkkinen et al., (2012).

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin; Puutuotteet

- MECOREN työkalu

MECOREN työkalu, Häkkinen et al. (2012)

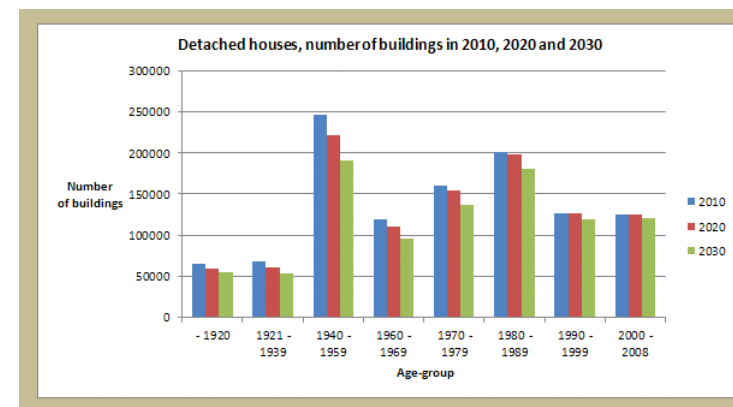
- Excel työkalu joka on tarkoitettu lähinnä energiatehokkuuden muutosten arviointiin, mutta sisältää hiilivarastolaskennan kannalta olennaista tietoa.
- Muutosten laskenta perustuu oletuksiin tulevista poistumista vuosikerroittain (taulukko) ja niistä seuraaviin muutoksiin rakennuskannan rakenteessa.
- Rakennuskannan tietoja olisi mahdollista päivittää ainakin kansallisella tasolla.
- Pidemmän ajanjakson muutosten ennustaminen edellyttäisi oletusten herkkyysanalyysiä
- [MECOREN kotisivut](#)

MECOREN työkalussa on tehty oletukset rakennuskannan muutoksesta rakennusvuosikerroittain.

Reduction in the floor area of detached houses between 2010 and 2020, and from 2020 to 2030.

Building Year	2010–2020	2020–2030
–1920	-8%	-8%
1921–1939	-10%	-14%
1940–1959	-10%	-14%
1960–1969	-7%	-14%
1970–1979	-4%	-11%
1980–1989	-2,0%	-8%
1990–1999	-0,5%	-8%
2000–2008	0%	-3%
Average	-4%	-9%

Lähde: Häkkinen et al., (2012)



III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Puutuotteet

- Tampere

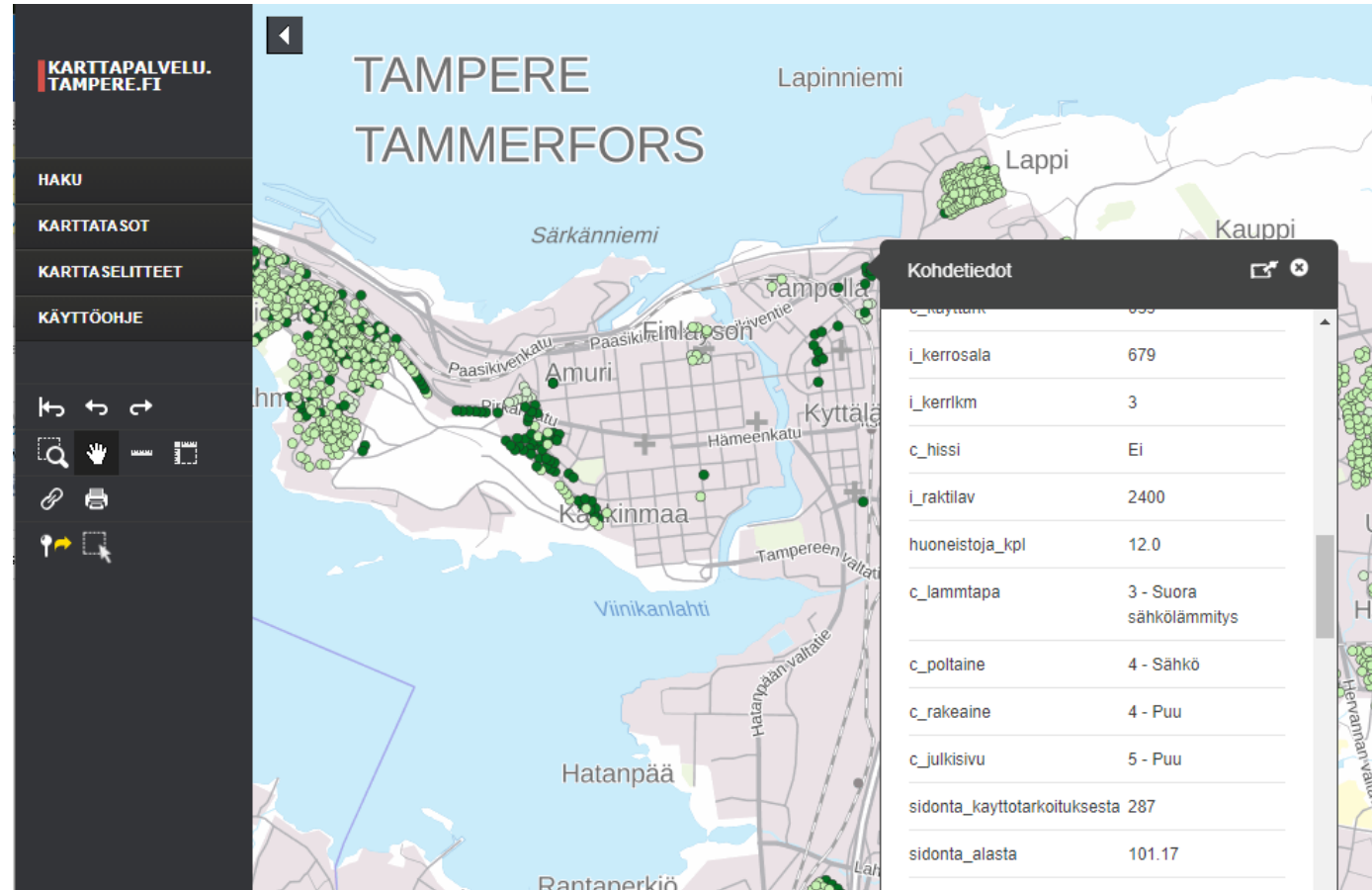
kartat.tampere.fi/oskari

Tampereen kaupungin puurakentamisen ja hiilensidonnän avoimen tietokannan kehittäminen

- Seuranta rakennustasolla - aineistona sovelluksessa käytettiin kaupungin ylläpitämää rakennus- ja huoneistorekisteriä.
- Hiilensidontakyvyn arvioimisessa käytettiin suuntaa antavia arvioita siitä, miten asuin kerrostalot, rivitalot ja pientalot keskimäärin sitovat hiiltä itseensä elinkaarensa aikana Vares et al., (2017) mukaisesti.

Huomioita

- Pohjautui rakennus- ja huoneistorekisterin tietoihin. Se löytyy yksittäisen rakennuksen tasolla koko maasta. Rekisterin tietojen laatu vaihtelee, eikä rakennuksista ole materiaalitietoja rungon ja julkisivun päämateriaaleja lukuun ottamatta.
- Laskentaa voitaisiin tarkentaa tyyppirakennusten ja monipuolisemman laskennan käytöllä. Tämä mahdollistaisi alueellisen tarkastelun tarkkuustasolla, joka vertautuu suunnilleen VTT Rakennuskannan hiilivarasto Vares et al., (2017) –raportissa esitettyyn.



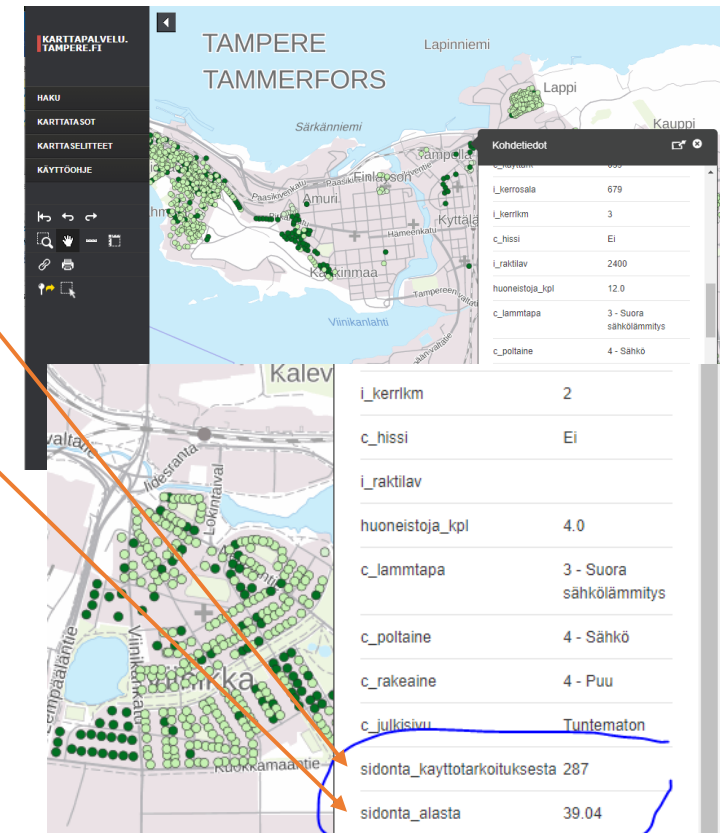
III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Puutuotteet

- Tampere

kartat.tampere.fi/oskari

Lähtötiedot	Laskenta
<ul style="list-style-type: none">• Kaupungin rakennus- ja huoneistorekisteristä saatava talokohtainen, ajantasaisin tieto kaupungin rakennuskannasta ominaisuustietoineen• VTT:n ja Puufon arviot puukerrostalon ja puisen omakotitalon hiilensidonnasta keskimäärin (esim. Omakotitalo = 30tonnia)• Kokonaisalaan perustuva arvio hiilensidontakyvystä/bruttom2 - yksi arvo kaikille rakennustyypeille	<p>Automaattinen laskenta Tampereen avoimessa karttapalvelussa kahdella yksinkertaistetulla kaavalla</p> <ol style="list-style-type: none">1. Rakennusmäärä x keskimääräinen hiilensidonta talotyypeittäin (omakoti-, rivi- ja kerrostalo)2. Rakennuksen bruttoala x arvioitu hiilensidontakerroin per bruttoneliometri <p>Laskenta on kiinteistökohtainen.</p>
<p><i>Lähtötiedot hiilensidonnasta ovat vahvasti yksinkertaistetut. Myös hankkeen raportissa tunnistetaan useita laskennan tarkkuutta parantavia tarkennuksia.</i></p>	<p><i>Laskenta on yksinkertainen mutta perustuu rakennustietojen osalta päivittyvään aineistoon. Hankkeen raportissa tarjotaan myös laskentakaavojen kehitysideoita. Malli ei pidä sisällään herkkyyksianalyysiä, eikä oletettua vaihteluväliä tuloksille.</i></p>



Kerrostalojen osalta suuret kokovaihtelut johtavat eri laskennoilla hyvin erisuuruisiin tuloksiin

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, puutuotteet

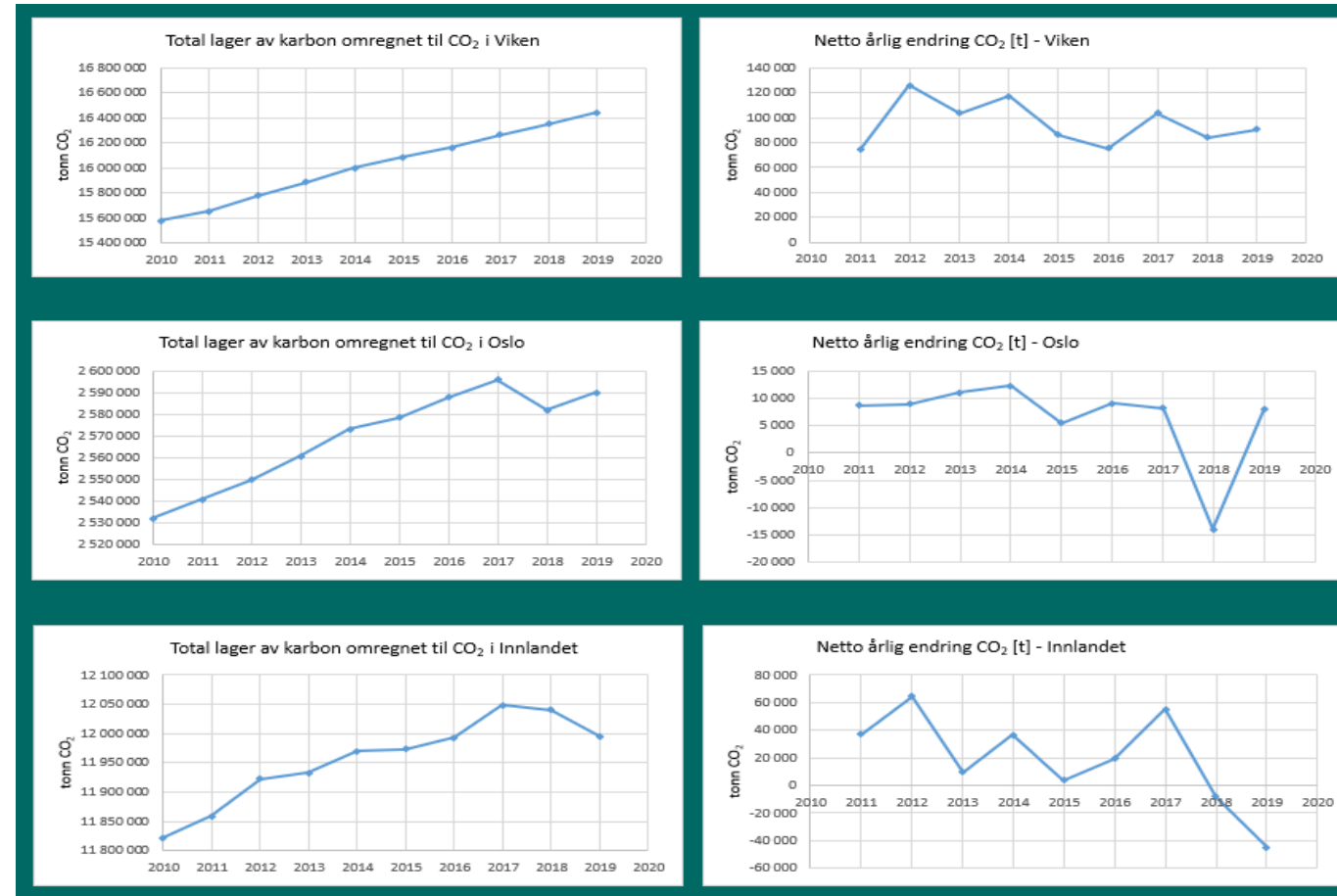
- Trebaserat karbonlagring i bygningsmasse

Norjan puurakennuksiin sitoutuneen hiilen kunta- ja aluekohtainen malli (Alfredsen et al., 2020)

- Kaupunki- ja maakuntatasoinen rakennustyyppien tilastoihin perustuva Excel-malli puurakennuksiin sitoutuneen hiilen ja sen muutosten arviointiin ja havainnolliseen vertailuun.
- Laskenta perustuu talotyyppeihin (omakotitalo, kerrostalo,...), niiden keskimääräisiin pinta-aloihin, keskimääräiseen sitoutuneen hiilen määrään neliometriä kohden ja rakennusten kokonaismääriin.
- Työkalussa on myös yksinkertainen mahdollisuus lisätä suunniteltu rakentaminen, mutta ei varsinaista skenaario-osuutta tai ennustetta.

Huomioita

- Kunnittaisten ja talotyyppittäisten tilastojen ja keskiarvojen pohjalta tehty laskenta on lähinnä suuntaa antava.
- Sitoutuneen hiilen muutosten arviointi ja vertailu alueittain näyttää tuovan esiin alueellisia eroja.
- [Linkki työkaluun](#)



III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, puutuotteet

- Trebaserat karbonlagring i bygningsmasse

Lähtötiedot	Laskenta
<ul style="list-style-type: none">• Tilastot kunkin kunnan ja alueen talomääristä talotyypeittäin (esim. 25520 kpl omakotitaloa Oslossa 2019)• Tutkitut puun määrät kunkin talotyyppin osalta Norjassa keskimäärin• Laskennassa on eritelty talotyypeittäin keskimääräinen koko ja puun määrä per neliö• Samoja arvoja käytetään toistaiseksi kaikille kunnille ja alueille	<p>Yksinkertainen laskenta ja paljon kuvaajia tuomaan esille määrien kehitystä ja alueellisia eroja.</p> <p>Laskenta</p> <ul style="list-style-type: none">• Hiilen sidonta: Talotyyppin kappalemäärä alueella x keskimääräinen hiilensidonta talotyyppissä• Varaston muutos vuosittain: Sidottu hiili – sidottu hiili edellisenä vuonna <p>Kunta- ja aluetason laskenta.</p>
<p><i>Lähtötiedot ovat yksinkertaiset, käytännössä vain talojen määrä ja sitoutuneen hiilen kerroin talotyypeittäin.</i></p> <p><i>Excel-mallissa on kuitenkin periaatteessa mahdollisuus varioida lähtötietoja myös alueellisesti.</i></p>	<p><i>Laskenta on yksinkertainen, mutta tarjoaa kuntatason tietoa myös hiilivaraston muutoksesta. Mallia voi pitää ensimmäisenä, suuntaa antavana kokeiluna. Malli ei pidä sisällään herkkyyksianalyysiä, eikä oletettua vaihteluväliä tuloksille.</i></p>



III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Puutuotteet

- Wood C calculator (Kanada)

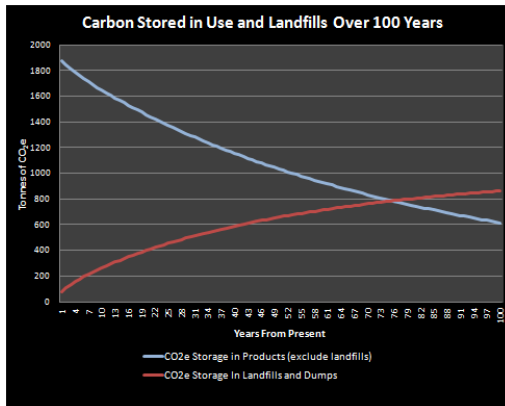
[Wood Product Carbon Calculator](#), Dymond (2012), Dymond et al. (2016)

Malli rakennettu [CBM-FHWP](#) alustalla. Soveltuu erityisesti tietyn metsäalan (kerta)käytön tai puun hankinnan elinkaariseen tarkasteluun.

Syöttötietona annetaan primääripuutuotteen määrä: Tukkeja, sahatavaraa, vaneria OSB, MDF levyä.

Sovellus jakaa syötteen lopputuotteille määritellyillä kertoimilla, laskee vuosittaisen lopputuotteelle eksponentiaalisen poistuman.

Sovellus tulostaa myös elinkaarisen fossiilisen hiiljalanjäljen ja substituutiovaikutukset ja grafiikkaa:



Input Data					
Input Product:	Roundwood	Lumber	Plywood	OSB	MDF
Input Metric:	tC	tC	sf		
Select the correct input metric from the drop down list					
Input Type		SPF	SPF		
Select the correct input type from the drop down list					
Thickness			3/8		
Select the correct panel thickness from the drop down list (inches)					
Input Quantity:		0	1,000,000		
Enter the quantity of input product being used in the project					

Product Retention and Emissions (in Tonnes of CO ₂)													
Year No.	Single Family Homes	Multi-Family Homes	Commercial Buildings	Manuf. Prod.s (furniture etc)	Paper	Shipping	Repairs	Other	CO ₂ e Storage in Products (exclude landfills)	CO ₂ e Storage In Landfills and Dumps	CO ₂ e Emissions from Landfill and Dumps	CO ₂ e Total Storage	CO ₂ e Total Emissions
10	748	54	162	116	0	2	405	159	1647	263	49	1910	1074
20	693	49	148	97	0	0	322	149	1457	399	107	1856	1132
30	641	45	135	81	0	0	255	139	1296	505	169	1801	1194
40	594	41	123	67	0	0	203	129	1156	590	231	1746	1256
50	550	37	112	56	0	0	161	118	1034	659	292	1693	1317
60	509	34	102	47	0	0	128	108	928	715	349	1643	1374
70	471	31	93	39	0	0	101	99	834	762	403	1596	1428
80	436	28	85	32	0	0	80	90	752	802	452	1554	1477
90	404	26	77	27	0	0	64	81	679	835	498	1515	1523
100	374	23	70	22	0	0	51	74	615	864	539	1479	1564

MONSU, Monitavoitteinen metsäsuunnittelu (esim . Zubizarreta-Gerendiain et al., 2016)

(Kalliokoski et al., 2019)

Hiilitase on sidotun ja vapautetun hiilen erotus laskentakauden aikana.

Se lasketaan kolmen osataseen summana:

- elävän biomassan sisältämän hiilen muutos
- maan hiilitase
- tuotteiden hiilitase.

Maan hiilitase koostuu seuraavista komponenteista (+ tarkoittaa, että komponentti parantaa hiilitasetta, ja – tarkoittaa, että komponentti alentaa tasetta):

- laskentakauden aikana kuolleet puut (+)
- laskentakauden aikana hakattujen puiden tähteet (oksat, neulaset, kannot, juuret) (+)
- uusi, elävistä puista peräisin oleva karike (oksat, lehdet, hienoitujuuret) (+)
- kuolleen aineksen hajoamisessa vapautuva hiili (-).

Tuotteiden hiilitase koostuu seuraavista komponenteista:

- laskentakauden aikana valmistetut uudet tuotteet (+), Sahatavara ja vaneri, Mekaaninen massa, kemiallinen massa, biopolttoaine.
- tuotteiden hajoamisessa vapautuva hiili (-), Eksponentiaalinen poistuma
- puunkorjuun hiilipäästöt (-)
- puun kaukokuljetuksen hiilipäästöt (-)
- tuotteiden valmistuksen hiilipäästöt (-)
- korvausvaikutukset (+)
- uusiokäytöstä aiheutuvat korvausvaikutukset (+).

Esimerkki MONSU hiilitaselaskelmasta

Tunnus	2013-2022	2023-2032	2033-2042
Biomassan muutos, tn	72	155	94
Kuolleet puut, tn	14	19	23
Hakkuutähteet, tn	282	241	288
Karike + hajoaminen, tn	-174	-241	-271
Maan hiilitase, tn	122	19	39
Puutavara, tn	520	503	541
Puunkorjuu, tn	-10	-9	-11
Kaukokuljetus, tn	-3	-3	-3
Valmistus, tn	-52	-30	-57
Korvausvaikutukset, tn	210	225	223
Vanhat tuotteet hajoaminen,	-370	-173	-109
Uudet tuotteet hajoaminen, t	-253	-390	-460
Uusiokäyttö, tn	83	80	77
Tuotteiden hiilitase, tn	125	203	200
Kokonaistase, tn	319	377	333

Lähde: (Kalliokoski, et al., 2019, s.80)

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- CO2Fix/EFISCEN

CO2Fix, European Forest Institute (Schelhaas, et al., 2004) :

Hiilikirjanpito malli joka simuloi puuperäisten hiilivirtojen kertymistä metsäekosysteemissä, maaperässä ja puutuotteissa. Nämä kohdistetaan metsähehtaareille vuositasolla.

Laskelmat tehdään metsikkö -tasolla yhden tai useamman kasvusyklin ajan.

Mahdollisuus mallittaa myös puutuotteen kierrätystä, tosin rajoittamattomana kiertona.

CO2Fix on vapaasti käytettävissä, viimeisin versio v3.2 vuodelta 2009.

The screenshot shows the 'Products' window with the 'Scenario 1' dropdown selected. It features two main sections: 'Raw material allocation' and 'Process losses'. The 'Raw material allocation' table shows the distribution of raw materials (Logwood and Pulpwood) into Sawwood, Boards, Paper, and Firewood. The 'Process losses' table shows the fraction of material lost in the process and reallocated to other products or sent to a mill site dump.

RAW MATERIAL	FRACTION TO PRODUCTION LINE			
	Sawwood	Boards	Paper	Firewood
Logwood	0	0	0	1.000000
Pulpwood	0	0	0	1.000000

PRODUCTION LINE	FRACTION LOST IN PROCESS REALLOCATED TO			
	Boards	Paper	Firewood	Mill site dump
Sawwood	0	0.10	0.20	0.2
Boards		0.05	0.2	0.1
Paper			0.1	0.05
Firewood				0.00

The screenshot shows the 'Products' window with the 'Scenario 1' dropdown selected. It features two main sections: 'Products allocation' and 'End of life'. The 'Products allocation' table shows the distribution of products (Sawwood, Boards, Paper) into Long term, Medium term, and Short term categories. The 'End of life' table shows the fraction of material disposed to Recycling, Energy, and Landfill for each product type and term.

PRODUCTS allocation	FRACTION ALLOCATED TO		
PRODUCT LINE	Long term	Medium term	Short term
Sawwood	0.50	0.25	0.250000
Boards	0.30	0.50	0.200000
Paper	0.01	0.10	0.890000

End of life	FRACTION DISPOSED TO		
PRODUCT TYPE	Recycling	Energy	Landfill
Long term	0.1	0.8	0.100000
Medium term	0.1	0.8	0.100000
Short term	0.2	0.75	0.050000

Puumäärät ohjataan primäärituotantoon ja jaetaan lopputuotteille elinkaaren pituuden mukaan. Lopputuotteet voidaan kierrättää, polttaa tai sijoittaa kaatopaikalle. Puoliintumisajat ovat käyttäjän hallittavissa.

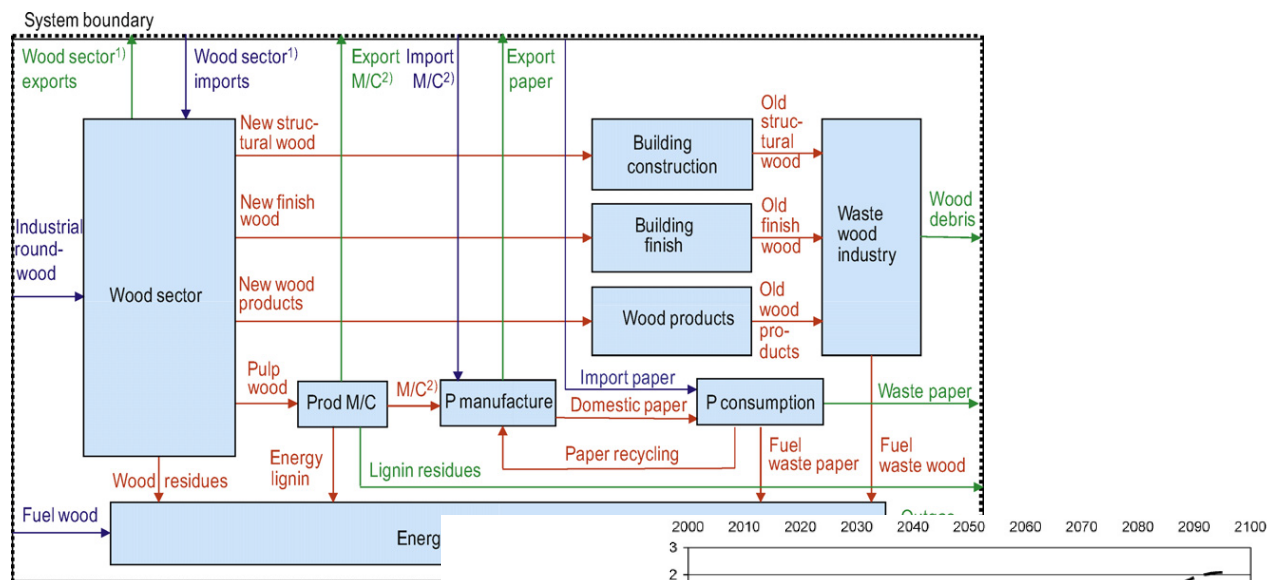
III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- Wood flow model for Swiss timber industry

Wood flow model for Swiss timber industry Taverna et al. (2007), Werner et al. (2010)

- Metsänhoidon, puutuotteiden ja hiilivarastojen integroitu malli.
- Puutuotemallissa Stock Change Approach, eli maan rajojen sillä tapahtuva muutos.
- Materiaalivirta malli (MFA). Poistumat puutuotevarastoista määritelty "mean residence time" jolla kiinteä vaihteluväli, esimerkiksi rakennuksissa 80 ± 20 vuotta.



¹⁾ Collected from four individual wood fluxes

²⁾ M/P: mechanical/ chemical pulp

KHK vaikutuksen vuosimaksimi saavutetaan noin 2030, alussa metsän ja puutuotteiden varastojen kasvu merkittävä, mutta tasaantuu ja substituutiovaikutukset lisääntyvät.

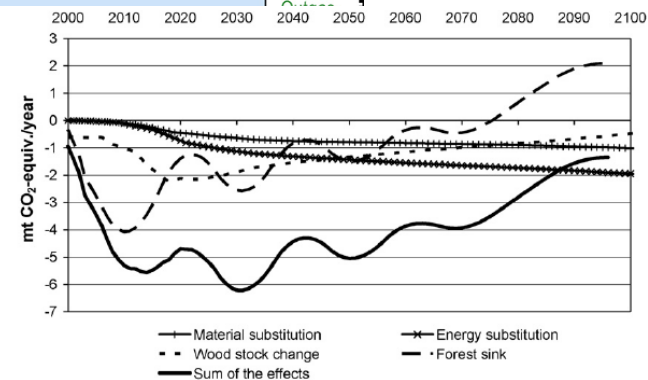


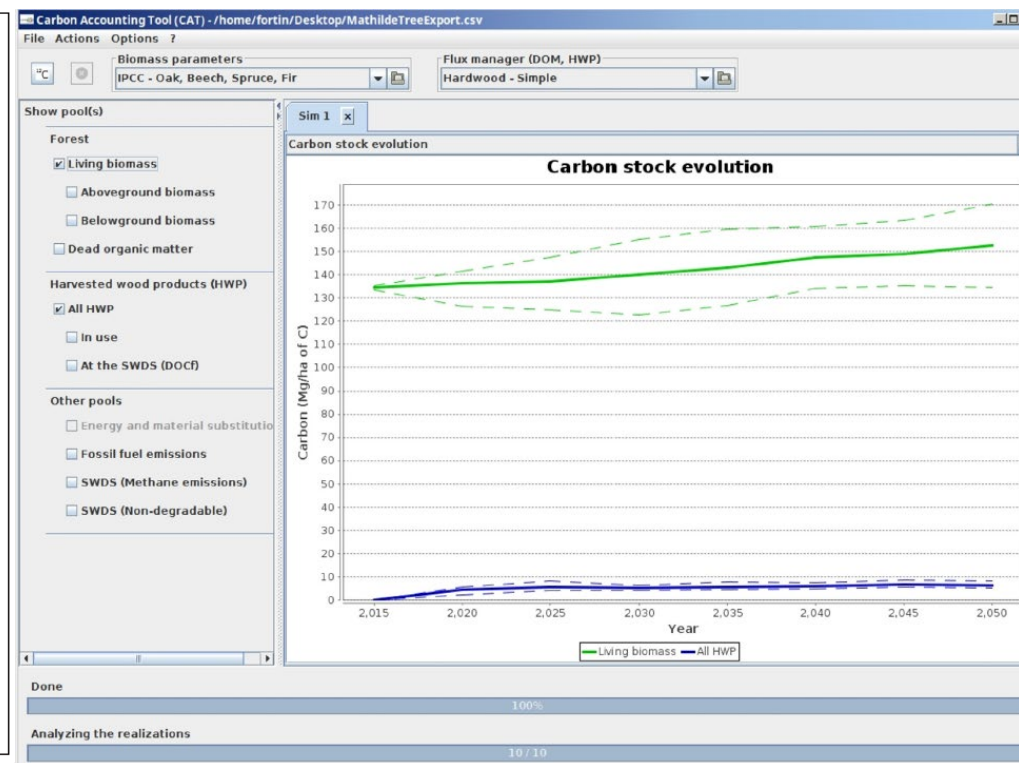
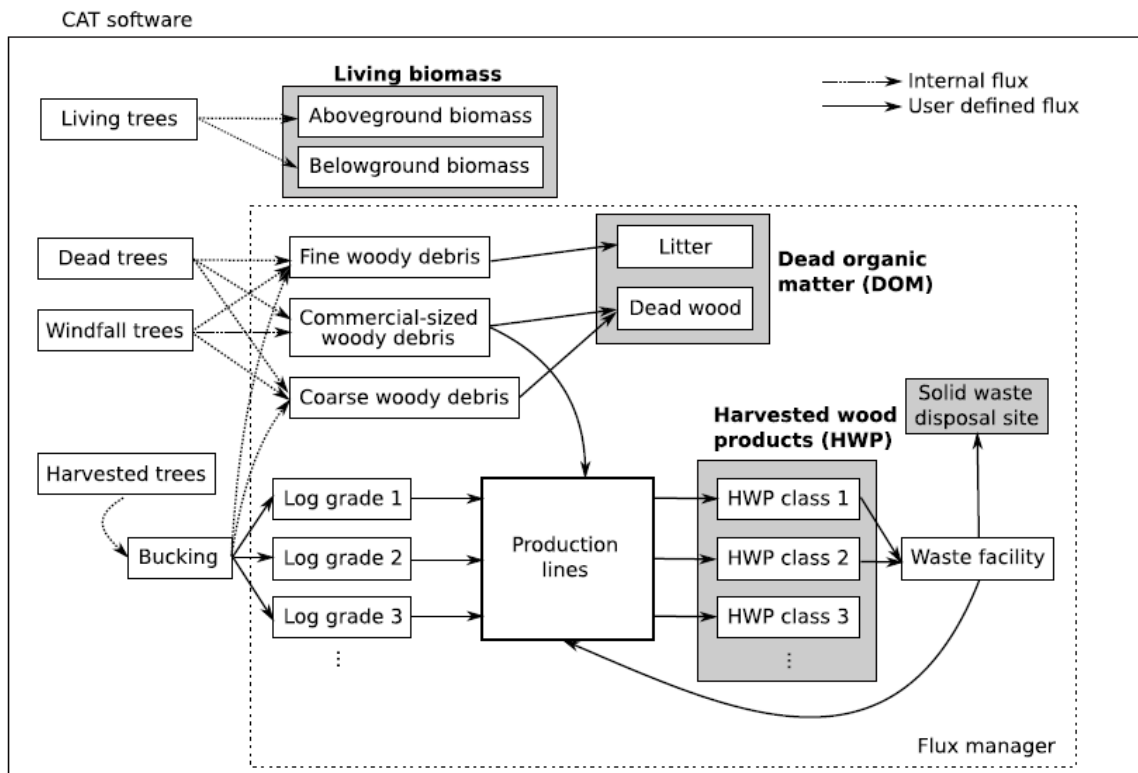
Fig. 6 – Temporal sequence of individual global annual stock and material effects based on the Kyoto-Optimized scenario (2000–2100).

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- Carbon calculator for wood products

A Carbon Accounting tool, CAT, Pichancourt et al., (2018) <https://sourceforge.net/p/lerfobforesttools/wiki/CAT/>



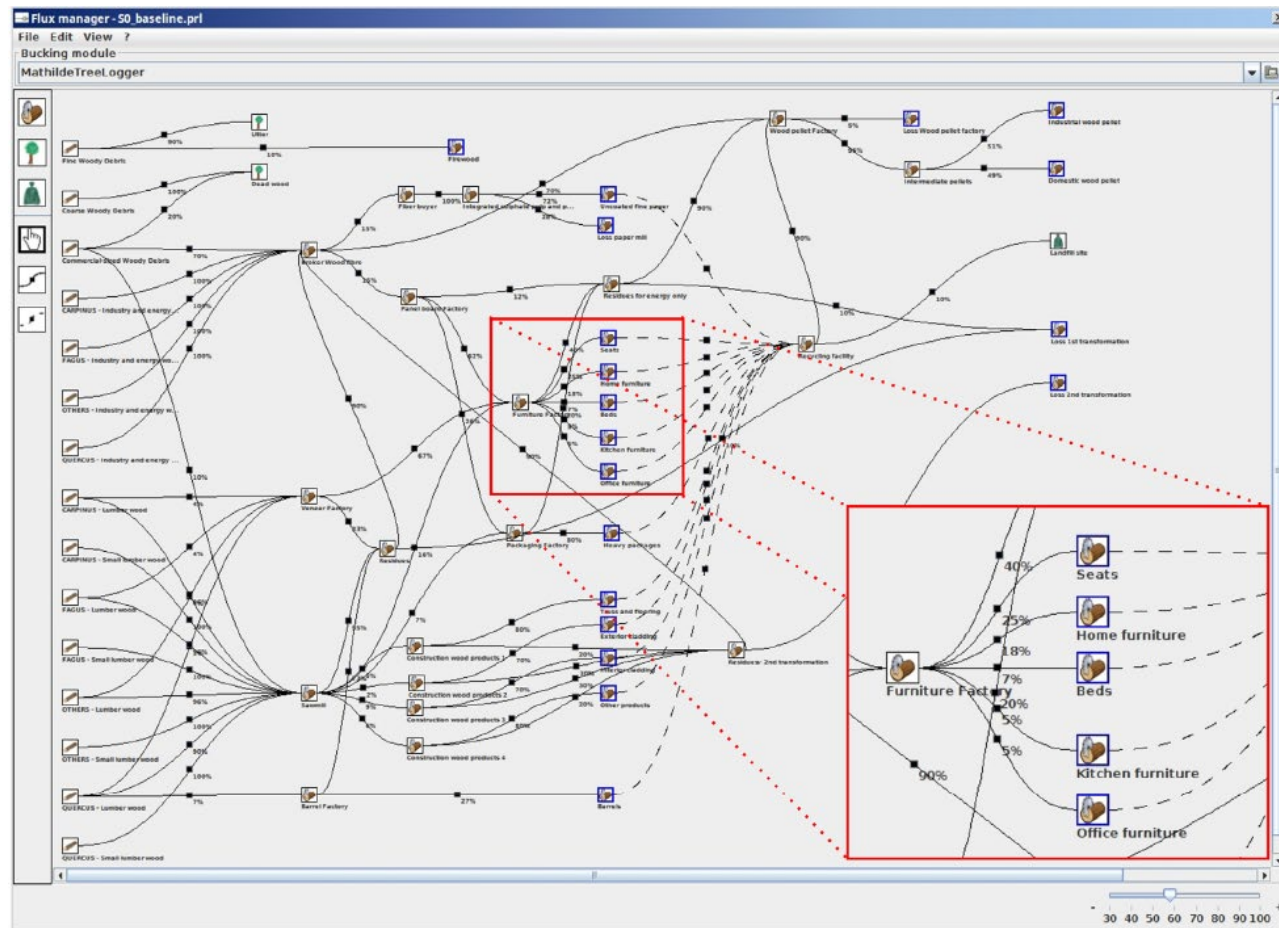
III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- Carbon calculator for wood products

- Hiilivarastot : maanpäällinen ja maanlainen, DOM, puutuotteet käytössä ja kaatopaikalla.
- IPCC laskentaa johon voidaan liittää substituutiovaikutus, ketjun GWP ja loppusijoitus.
- Metsämallin parametrit ja rakenne on sovitettavissa IPCC Tier 1-3 tason malleihin.
- Parametrien epävarmuuden simulointi Monte Carlo menetelmällä.
- Puutuoteketju voidaan mallittaa myös pidemmäksi, esim. sahatavara, rakennustuotteet, arkkityypit, käytöstä poisto.
- Materiaalikirjanpito täsmää, eli puutuotteen käytölle pitää aina osoittaa myös raaka-aine.
- Mallin resoluutiota voi säätää, esim. valtakunnallinen tai alueellinen tarkastelu.
- Parametrit ovat ajassa vakioita eivätkä riipu markkinatilanteesta; eli teollisuuden rakenne ei muutu.
- FOD poistuma tuoteryhmittäin, ei vuosikertamallinnusta puutuotteille.
- IPCC Production approach: Vienti voidaan mallittaa oman virtana, mutta puun tuontia ei.

[Linkki ohjelmistoon](#)



III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- Brunet-Navarro et al. WPM model

Brunet-Navarro, et al., 2018, Effect of cascade use on the carbon balance of the German and European wood sectors

- Puun kaskadikäyttö ohjataan eri tuotteille ja tutkitaan miten kaskadi- ja kierrätysketjujen pituus vaikuttaa hiilivarastoon.
- Monte-Carlo simulointi tulosten luottamusvälille, esimerkiksi epävarmuus puuvirtojen allokoinnissa eri käyttötarkoituksiin.
- Metsä-puutuote-ketjun tarkastelussa puutuotteiden hiilivarasto voidaan suhteuttaa metsäpinta-alaan, mittayksikkönä hiilitonnia per ha.
- Täysi malliketju metsien tuotosta, puun jalostuksen kautta lopputuotekäyttöön ja sen kierrätykseen tai kaskadikäyttöön.
 - Metsien tuotto rajoittaa puun käyttöä, mutta metsien hiilivarastojen muutoksia ei lasketa.
 - Mallielementtejä voidaan vaihtaa, erityisesti puun tuotannossa ja allokointiossa eri käyttötarkoituksiin.

Table 5

Overview of the different combinations for the simulation runs.

Tree species	Allocation scheme	Cascading scenario	Variation of product characteristics
4 tree species spruce (9 yield classes), pine (12 yield classes), beech (9 yield classes) and oak (3 yield classes)	FAOSTAT Bösch Simple <i>High quality wood benchmark</i> <i>Low quality wood benchmark</i>	6 scenarios (R, C1-C5)	3 parameter sets (standard, increased lifespan, and increased recycling rate) Not needed

Mallissa simuloidaan (spin up) varaston taso historiallisella aineistolla. Tulevaisuuden skenaariot erilaisilla puun allokointioilla käyttökohteisiin (Allocation scheme) ja elinkaaren lopun oletuksilla (cascadin scenarios) lasketaan eteenpäin kunnes hiilivarasto ei enää muutu (steady state).

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- Brunet-Navarro et al. WPM model

Brunet-Navarro, et al., 2018, Effect of cascade use on the carbon balance of the German and European wood sectors

- Steady state hiilivarastot Saksassa eri skenaarioilla, hiilitonnia per talousmetsähehtaari.
 - Metsämalli rakennettu kasvutaulukoiden perusteella.
 - Skenaarioissa kiinteä osuus aina uudelleenkäyttöön (R) ja rajoitetummat kaskadiskenaariot (C1-C5). Kuviossa a) oletusarvoilla, b) käyttöiän jatkumisen vaikutus ja kuviossa c) kierrätyksen lisäys.
 - Viiksi: simuloitu hiilivaraston standardipoikkema (SD), 95% simuloinnista viiksen alueella. Oletus käyttöiän SD=1/3 keskiarvosta; hiilivaraston vaihteluväli on merkittävä suhteessa keskiarvoon.

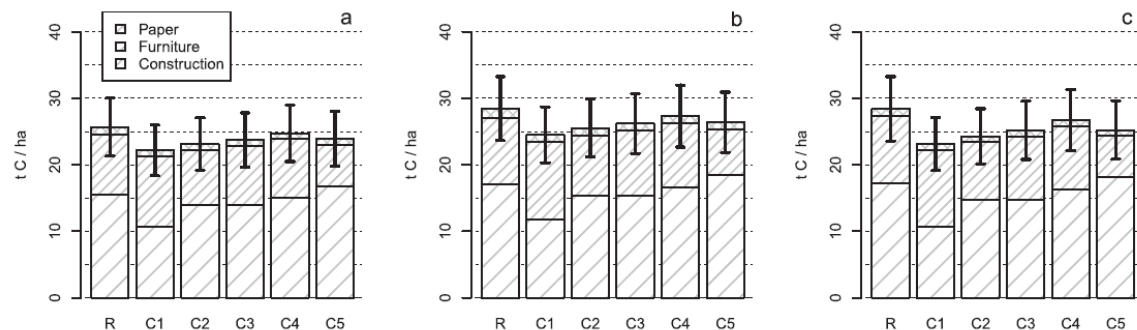


Fig. 3. Carbon stock in wood products (mean \pm standard deviation) estimated using production from yield tables according to the re-use and the five cascading scenarios analysed (a) using standard values of average lifespan and recycling rate, (b) using standard values of recycling rate and increased lifespans, and (c) using standard values of average lifespan and increased recycling rates. R: Re-use scenario; C1: Cascading scenario 1; C2: Cascading scenario 2; C3: Cascading scenario 3; C4: Cascading scenario 4; C5: Cascading scenario 5.

Table 10

Amount of carbon harvested and stored in wood products domestically produced per hectare of productive forest (Forest available for wood supply) for each European country using FAOSTAT data.

Country	Forest area (million hectares)	Products Production (t C ha ⁻¹ year ⁻¹)	Products production (10 ⁶ t C year ⁻¹)	Sawnwood Stock (t C ha ⁻¹)	Sawnwood stock (10 ⁶ t C)	Panels stock (t C ha ⁻¹)	Panels stock (10 ⁶ t C)	Paper stock (t C ha ⁻¹)	Paper stock (10 ⁶ t C)	Total stock in products (t C ha ⁻¹)	Total stock in products (10 ⁶ t C)
EU28	134.486	0.767	103.151	5.349	719.366	2.533	340.653	1.276	171.604	9.159	1231.75
Austria	3.339	1.787	5.967	19.744	65.925	5.526	18.451	2.681	8.952	27.952	93.332
Belgium	0.670	3.057	2.048	14.922	9.998	25.518	17.097	5.477	3.670	45.917	30.764
Bulgaria	2.213	0.572	1.266	3.083	6.823	1.758	3.890	0.259	0.573	5.101	11.289
Croatia	1.740	0.682	1.187	3.816	6.640	0.477	0.830	0.411	0.715	4.704	8.185
Cyprus	0.041	0.043	0.002	4.323	0.177	1.468	0.060	0.000	0.000	5.791	0.237
Czech Republic	2.301	0.892	2.052	12.515	28.797	3.254	7.487	0.585	1.346	16.353	37.628
Denmark	0.572	1.656	0.947	8.025	4.590	4.747	2.715	1.565	0.895	14.337	8.201
Estonia	1.994	0.548	1.093	3.878	7.733	1.071	2.136	0.066	0.132	5.015	10.000
Finland	19.465	0.461	8.973	4.022	78.288	0.542	10.550	1.033	20.107	5.597	108.946
France	16.018	0.890	14.256	4.984	79.834	2.101	33.654	0.962	15.409	8.048	128.913
Germany	10.888	1.845	20.088	12.238	133.247	7.785	84.763	3.771	41.059	23.794	259.069

- Steady state hiilivarastot EU-28 (vain osa näkyy).
 - FAOSTAT tiedot puun tuotanto ja allokointi puutuotteille.
 - Hiilivarastot primäärisissä puutuoteryhmissä, brutto ja per talousmetsähehtaari.

Mallin lähtöparametrit ja R ohjelmointikoodi on julkaistu artikkelin sähköisenä liitteenä.

III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- Carbon Budgeting Model – Framework for Harvested Wood Products (CBM-FHWP)

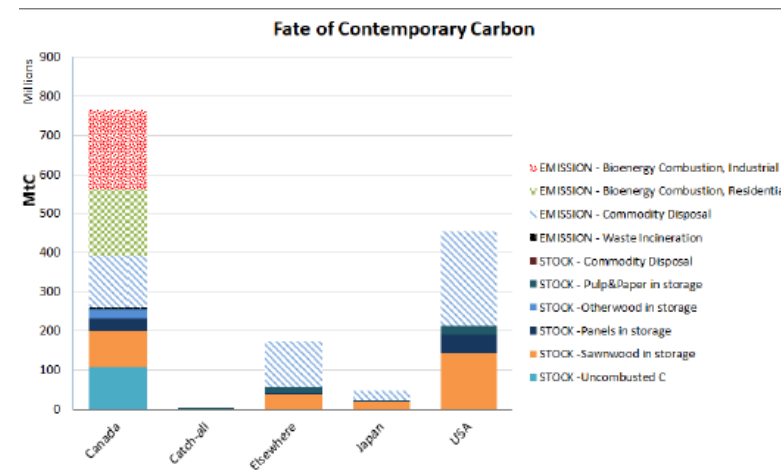
Työkalu elinkaaristen hiilivirtojen ja –varastojen mallin rakentamiseksi. Sovelluksen kehittäjä: Natural Resources Canada; Carbon Accounting Team. Sovellettu esim. Dymond (2012, 2016) , Smyth (2014), Xie (2020), Head (2021).

Työkalun ominaisuuksia:

- joustavat puutavaran (hiilen) syöttötiedot
- käyttäjä voi määrittää itse syötettävän raakapuun määrät, TAI
- saada ne suoraan metsien kasvumallista.
- Puutuoteisiin sitoutunut hiili on aina jäljitettävissä ajassa/ja paikassa.
- Jokainen hiilivarastojenvälinen muutos (vuo) tallentuu.
- "In-use pools" Varasto voi joko säilyttää, siirtää muuhun käyttöön (jalostus, kierrätys) tai päästää hiiltä ilmakehään.
- Käytöstä poistetun hiilen varastointi.
- Mallinnus on joustavaa:
 - virtoja/komponentteja voidaan päivittää/poistaa/lisätä tarpeen mukaan
 - tulevia hiilivirtoja voi liittää mihin tahansa verkon kohtaan.
 - massatasapaino varmistetaan alueellisesti/ajallisesti
- Simulaattori valitsee aina "parhaat" käyttäjän antamat parametrit:
 - Käyttäjä voi määrittää parametreja vaihteleville spatiaalisille/ajallisille tasoille
 - järjestelmä käyttää aina tarkinta annettua tasoa.
- Hiilivarastojen lähtötasot voidaan laskea tai antaa.
- Herkkyysanalyysiä ei ole automatisoitu, mutta se on mahdollinen.
- IPCC yhteensopivuus: sekä tuotanto että varastonmuutos -mallinnus mahdollista.

- FHWP -mallinnustulokset kertovat hiilen kohtalon valittuina ajanjaksoina. Se voi olla:
 - päästö: CO₂, CH₄, N₂O jne
 - varastointi: Käytössä tai käytöstä poistettuna
 - hyödykkeiden tuotanto tai
 - vienti.

Mallista saadaan tarvittaessa tieto hiilen alkuperävuodesta/ sijainnista/ lajista/ fyysisestä tilasta/ omistuksesta/ massansiirrosta jne.



(Source:Michael Magnan, NRC)

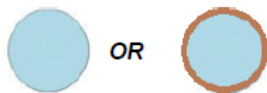
III Käytännön ratkaisuja

Työkaluja arviointiin, Metsä-puutuote-ketju

- CBM-FHWP, esimerkki puun elinkaaren rakenteellisesta mallista.

CBM-FHWP building blocks

Pools (containers for mass)



Events (Lifecycle processes which move mass between pools)



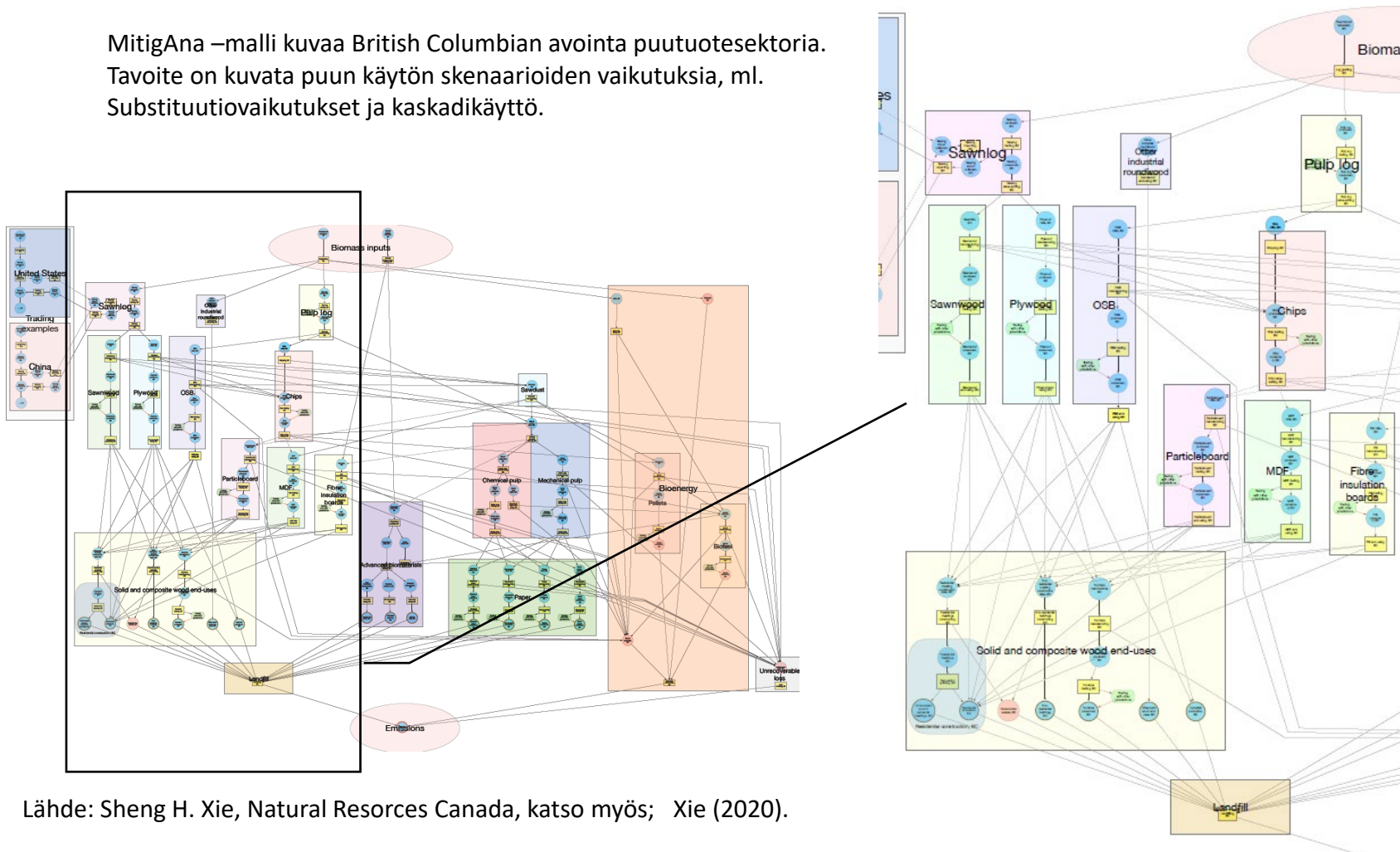
Connectors (Direct flow of mass)



Sovelluksella voi rakentaa ajassa muuttuvia elinkaaren rakenteita. Esimerkiksi rakentamisen vuosikertoja joilla on omat poistumafunktionensa. Poistumia ei ole sidottu First Order Decay malliin.

CMB-FHWP mahdollistaa hyvin tarkan skenaarion ajassa muuttuvan mallittamisen, mutta ei poista niiden parametrisoinnin ongelmaa. Parametrivalintojen liittyvää epävarmuutta voidaan simuloida Monte Carlo simuloinneilla.

MitigAna –malli kuvaa British Columbian avointa puutuotesektoria. Tavoite on kuvata puun käytön skenaarioiden vaikutuksia, ml. Substituutiovaikutukset ja kaskadikäyttö.



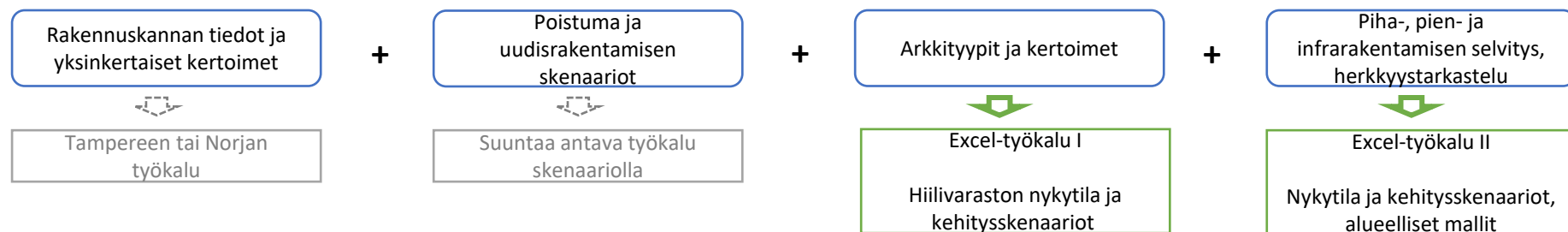
Lähde: Sheng H. Xie, Natural Resources Canada, katso myös; Xie (2020).

III Käytännön ratkaisuja

Hiilivarastolaskurin jatkokehittäminen; Rakennusten hiilivarastolaskurit

Rakennuskannan hiilivaraston arvioimisen avuksi on tarjolla selvitettyä tietoa Suomesta

- Rakennus- ja huoneistorekisterissä ja siihen pohjautuvissa tilastotiedoissa on tietoa rakennuskannan määrästä ja rakenteesta.
- Tarvittavia tunnuslukuja ja ominaishiilikertoimia rakennusten hiilivaraston mallintamiseen on jo selvitetty. Esimerkiksi Tampereen laskennat on tehty Vares et al. (2017) -raportin yksinkertaisten tunnuslukujen perusteella.
- Tarkempaa tai alueellista tarkastelua varten tietoa arkkityypeittäin (esim. talotyyppi ja rakennusvuosikymmen) löytyy useista lähteistä, kuten Mecoren ja Modern –hankkeiden tuloksista.
- Näitä tietoja yhdistelemällä voidaan rakentaa yksinkertainen Excel -työkalu rakennusten hiilivaraston kehityksen simulointiin esimerkiksi Norjalaisen excel-työkalun tapaan, mutta Suomeen paremmin sopivilla (yksinkertaisilla) laskusäännöillä.
- Tampereen ja Norjan aluetason malleissa oletukset hiilen sidonnasta rakennustyypeittäin ovat karkeita eikä laskelmien epävarmuutta ole mallinnettu. Mahdollisuuksia laskennan tarkentamiseksi on tunnistettu ja kohtuullisella panostuksella, esimerkiksi arkkityyppien avulla, voitaisiin rakennuskannan osalta päästä tarkemmalle tasolle.
- Kummassakaan edellä mainitussa työkalussa ei luoda skenaariota tulevasta kehityksestä, mutta Suomessa on tehty useita malleja (mm. VTT ja SYKE) rakennuskannan energian ja päästöjen skenaarioiden laskentaan. Näissä malleissa tehtyjä poistumien ja uudisrakentamisen arvioita voitaisiin käyttää myös tulevan hiilivaraston arvioinnin pohjana. [Wood C Calculator](#) työkalua voisi muokata Suomen oloihin ja samalla kehittää mallin poistumafunktiota ja herkkyysanalyysiä.
- Pien-, piha ja infrarakentamisen osalta tieto on karkealla tasolla. Huonekalujen ja kalusteiden osalta puuvarastoa ei ole arvioitu. Luotettavan tiedon saanti voi olla haastavaa. Tarkemman selvityksen mahdollista hyötyä voi arvioida puutuotesektorin rakennetta kuvaavilla työkaluilla (katso ruutu 49).



Rakennuskannan taulukkolaskentamallit ovat rakenteeltaan staattisia. Niihin on vaikea liittää mielekkäästi puun tarjontaa ja sen muutoksia, uusia innovatiivisia puutuotteita, puun käytöstä poistoa/uudelleenkäyttöä tai kierrätystä. Ne havainnollistavat kehityskaaria suppeasti lyhyellä ajanjaksolla.

III Käytännön ratkaisuja

Hiilivarastolaskurin jatkokehittäminen; Puutuotesektorin rakenteelliset laskurit

Hiili varastoituu eri puutuotteissa vaihtelevia aikoja ja vapautuu niistä eri muodoissa. Koko puutuotesektorin laskureiden pitää seurata hiilen lähtöpaikkaa ja kohdetta jokaisena ajanhetkenä. Sektorin rakennetta ja sen sisäisiä virtoja ja varastoja kuvaavalla mallilla voi simuloida myös uusien hiilensidontaratkaisujen potentiaalista merkitystä.

Esiselvityksessä löydettiin laskentakehikoita joita voitaisiin sovittaa myös Suomen puutuotesektorille.

- Parametrisointia vaikeuttaa se, ettei Suomen puutuoteteollisuuden massavirroista lopputuotteisiin ole kovin tarkkaa kuvaa, kuten IO tauluja vrt. Bösh et al (2015).
 - Piha- pien- ja infrarakentamisen hiilivarastojen selvitys voidaan tehdä selvittämällä massavirrat näihin lopputuotteisiin.
 - [CAT työkalu](#) on joustava alusta monipolvisten massavirtojen elinkaariseen mallintamiseen ja linkittämiseen yli sektorirajojen (flux manager). Ei tarvitse erillistä metsämallia, lähtöarvoiksi riittää kasvuprojektit. CAT varastojen kertymä- ja poistumaparametrit ovat kuitenkin ajassa kiinteitä, soveltuu huonosti pitkän ajan tarkasteluun.
 - [Brunet-Navarro et al, 2018](#) laskentakehikko on lopputuloksiltaan hyvin samankaltainen kuin CAT, mutta ei niin pitkälle valmiiksi ohjelmoitu alusta. Soveltuu vuosikertamallinnukseen ja mahdollisuus kierrätys ja kaskadikäytön rakennemallinnukseen. Lähdekoodi (R-sovellus) on hyvin tunnettu, mutta mallikehittäminen vaatii sen osaamista.
 - [CBM-FHWP](#) työkalulla voidaan räätälöidä simulointimalli puutuotteiden elinkaarelle dynaamisella rakenteella. Jokaiselle hiilivarastolle voi asettaa omat ajankohtaan/ikänsä ja muihin ominaisuuksiin sidotut parametrit jotka säätelevät siirtymiä toisiin varastoihin tai päästöiksi Ilmakehään. Työkalulla voidaan rakentaa myös skenaarioita havainnollistamaan uusien innovatiivisten puutuotteiden tai puun uusien käyttömuotojen vaikutusta hiilen elinkaareen. Sovelluksen lähdekoodi ei ole avoin, mutta sovellus on vapaasti käytettävissä.
- **Monissa malleissa lasketaan yleensä myös päästöjä ilmakehään ja puun käytön substituutiovaikutuksia.**
 - Fossiilisen energiatuotannon vähetessä ilmasto tavoitteiden mukaisesti, substituutiovertailussa tulisi olla puun ja vaihtoehtoisten materiaalien hiilijalanjälki lopputuotteessa.
 - Puun kierrätys ja kaskadikäyttö voivat olla tulevaisuudessa merkittävämpiä kuin substituutiovaikutukset.

Koko metsä-puutuote-ketjun hiilitaseiden työkaluista

- Suomeen sovelletuista työkaluista MONSU on primäärituotemalli, CO2fix lopputuotteet määritellään vain pitoajan suhteen.
 - Molemmat ovat ensisijaisesti metsämalleja. CO2Fix mallissa käytetty suppea puutuotekehikko on helposti uudelleenparametrisoitavissa.
 - MONSUn puutuotemoduulissa vaikutukset kattavat myös hiilijalanjäljen ja substituution.
 - Mallit ovat kiinteäparametrisia ja tarjontaketjuja ei voi itse rakentaa, eikä epävarmuutta ei voi simuloida.
- Suomen ilmastopaneelin raportissa (Kalliokoski, et al., 2019) todetaan että alhaisimmalla hakkuutasolla kaikki tarkastellut mallit tuottivat suurimman metsien hiilivaraston ja nielun. Kun metsänhoitoskenaarioon lisätään puutuotteisiin sitoutunut hiili, tulokset ovat osin ristiriitaisia. Kuitenkin, koko metsäsektorin hiilitasetta voidaan kehittää sekä metsien hoidon että puun käytön kautta (ks esim. Zubizarreta-Gerendiain et al. 2016, Seppälä et al. 2019, Carle et al., 2020).
- Koko metsäsektorin mallinnuksessa tulokset riippuvat valitusta tarkastelunäkökulmasta ja aikaperspektiivistä. Esimerkiksi Laine et al. (2021) ja Soimakallio et al. (2021) tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia vaikka tulokset ovat samansuuntaisia; sekä metsän että puutuotteiden hiilivarastojen muutosta käsitellään eri olettamuksilla.
- Em. tutkimukset tarkastelevat hiilitaseita tietyn metsä-alan hyödyntämisen/käyttämättä jättämisen näkökulmasta. Vaihtoehtona olisi tarkastella hiilitaseita alueellisesti (ns. landscape -tasolla) kuten IPCC ohjeistuksessa, mutta dynaamisesti ja liittää nämä puutuotesektorin malliin. Molemmat lähestymistavat ovat mahdollisia [puutuotesektorin rakenteellisissa laskureissa](#).
- Puutuotteiden ja metsän hiilivarastojen taseen määritelmä ei ole yksiselitteinen. Dynaamisissa laskelmissa voidaan verrata hiilitaseita joko puun korjuuhetkestä nähden tulevaan kasvuun (regrowth) tai taaksepäin metsästä poistetun puun kasvuhistoriaan (Peñaloza et al., 2016). Liptow et al. (2018) tekevät yhteenvedon hiilenkierron laskentameteodeista.

IV Johtopäätökset



IV Johtopäätökset

Aineistot ja työkalut, nykytila

- **Esiselvityksessä tarkasteltiin pelkkien puutuotelaskurien ohella myös metsä-puutuote-ketjun laskureita.**
 - Puutuotteiden hiilivarastoista on tehty yksittäisiä selvityksiä kotimaassa, mutta työkaluja joilla voisi itsenäisesti laskea rakennuksiin tai rakennuskantaan liittyviä muutoksia ei ole julkaistu.
 - Kotimaisissa puutuotemalleissa ei ole mallinnettu kierrätys ja kaskadikäytön vaikutuksia.
 - Metsien hiilivarastoja laskeviin malleihin liitetyt puutuotemallit tekevät vain karkeita oletuksia puun lopputuotekäytöistä.
- **Puutuotteiden hiilivarastojen kehitys riippuu paitsi puun tarjonnasta myös puutuotteiden käytön muutoksista**
 - Monsu ja CO2Fix soveltuvat metsänkäytön vaihtoehtojen vertailuun, mutta niiden puutuotemallit on mekaanisesti sidottu skenaariossa metsistä korjattavan puun määrään.
 - Kotimaista koko puutuotesektorin rakenteellista mallia joka soveltuisi puun käytön vaihtoehtojen vertailuun ei löydetty.
- **Hiilivarastojen määrään, sijoittumiseen ja ajoittumiseen liittyvää epävarmuutta ei juuri esitetä**
 - Hiilivaraston dynamiikkaan sekä metsissä että puutuotteissa vaikuttaa olennaisesti epävarmuus virtauksesta sisään ja poistumista. Laskelmien herkkyys satunnaisvaihtelulle tai virhearvioinneille pitäisi aina pystyä esittämään. Toistaiseksi näin on vain yhdessä kotimaisessa puutuotetutkimuksessa tehty.
- **Metsän - ja puutuotteiden hiilivarastojen rinnastamien keskenään on aina tulkinnanvaraista, mutta mahdollista**
 - Metsänkasvumalleissa hiilivarastojen muutoksia voidaan seurata, mutta niiden rinnastaminen pitkäaikaisten puutuotteen kanssa on hyvin tulkinnanvaraista. Tämä on erityisesti ongelma jos tarkastellaan sekä yksittäistä metsäaluetta että siitä korjatun puun elinkaaria yhdessä.
 - Skenaariolaskentaa maisematasolla, missä vain tietty osa maiseman puustosta otetaan käyttöön vuosittain on tehty (esim Kalliokoski et al. , 2019), mutta mahdollisuudet simuloida erilaisia puutuotteiden käyttötapoja ja niiden muutoksia ovat hyvin rajalliset.

Puutuotteiden pitkäaikaisen hiilivaraston arviointimenetelmän tulisi käsittää ainakin:

- **Pitkäikäisiin lopputuotteisiin valmistusvaiheessa sitoutuvan hiilen laskenta.**
 - Rakennuksissa arkkityypeittäin - infrarakentamisessa ja muissa puutuotteissa ei ainakaan vielä päästä primäärituotteita (puutavaran määrä) tarkempaan tarkasteluun.
 - Pelkän rakennuksiin sitoutuvan varaston laskenta sopii suunnittelumalleihin, joissa tarkastellaan esimerkiksi jonkin alueen rakentamista tai kaavoitusta.
- **Hiilivaraston määrä (hiilitonneja), vai varaston vaikutus ilmaston lämpenemiseen (GWP)?**
 - Huomioidaanko varastojen pitoaika ja muutkin varaston KHK-päästöt kuin CO₂, vai seurataanko vain sitoutuneen hiilen määrä tarkasteluajanjaksoittain.
 - Varastojen dynamiikkaan vaikuttaa niistä poistuva hiilen määrä ja tapan/muotoon millä se poistuu. Poistuma-ajankohdalla suhteessa tarkastelujaksoon on suuri merkitys.
- **Oletukset puuvirtojen jakautumisesta varastoihin ja niiden pysyvyydestä vaikuttavat merkittävästi tuloksiin. Epävarmuus näistä oletuksista pitää pystyä arvioimaan.**
 - Lasketun skenaarion herkkyyttä tehdyille valinnoille pitää aina pystyä tarkastelemaan.
 - Malleissa käytetty Monte-Carlo simulointi tulosten luottamusväleille on vain apuväline epävarmuuden vaikutuksen havainnollistamiseksi. Luottamusvälin simulointia varten tehdään pääsääntöisesti vain arvaus taustalla olevien parametrien epävarmuudesta. Laskettu luottamusväli on täysin ehdollinen tälle.
- **Kierrätys- ja kaskadikäytöt sekä uusien innovatiivisten tuotteiden potentiaalinen merkitys.**
 - Tärkeää jos ei tarkastella pelkästään uudistuotantoa, vaan mukana on myös lähivuosisikymmeninä nykykäytöstä poistuvaa hiilivarastoa.
 - Arviointimenetelmällä pitäisi pystyä havainnollistamaan eri kierrätysratkaisujen ja mahdollisten uusien innovatiivisten tuotteiden potentiaalia hiilen sitojana.
 - Kierrätyskehän täytyy olla rajattu, samoin kaskadikäytön ohjautua määritelyihin tuotteisiin.
- **Arviointimenetelmän pitäisi sopeutua toimintaympäristön oletettuihin muutoksiin.**
 - Skenaariota pitää pystyä rakentamaan siten että varastojen määrän kehitys riippuu ajankohdasta ja varaston rakenteen muutoksista.
 - Esimerkiksi asteittainen luopuminen fossiilisten polttoaineiden poltosta poistaa puun energiakäytön substituutiohyödyt tai energiapuu voi tulevaisuudessa ohjautua ensisijaisesti muuhun käyttöön.
- **Erilaiset näkökulmat metsien ja puutuotteiden hiilitaseisiin**
 - Laskennan tavoitteet määrittävät pitääkö tasetta tarkastella maisematasolla (Landscape) vuosittain vai tietyn metsä-alan hyödyntämisen ja siitä valmistettujen puutuotteiden kautta.

IV Johtopäätökset

Ehdotukset jatkokehitykselle

Esiselvityksen ehdotukset kansallisen arviointimenetelmän jatkokehittämistä varten:

- **I Rakennusten hiilivarastolaskurien kehitys hyödyntämällä jo olemassa olevia aineistoja ja työvälineitä**
 - Perustuen rakennuskannan arkkityyppeihin eri ajanjaksoilla, niihin sitoutuneen hiilen ja ennustettavan poistuman ajankohtaan (esimerkiksi Excel-työkalu I).
 - Edellisen työkalun jatkokehitys, joka kohteena on **skenaariotyökalun kehitys**; erityisesti **herkkyystarkastelu**, sekä laskurin alueellistaminen. Lisäksi selvitetään **onko piha-, pien- ja infrarakentamisen hiilivarastoista** mahdollista saada käyttökelpoista tietoa (Esimerkiksi Excel-työkalu II).
 - **Avoin dokumentoitu alusta laskentamalleille**, siinä valmis käyttöliittymä jossa mukana komponenttien (perusskenaarion lähtöarvot ja laskentaparametrit) oletusarvot.
- **II Koko puutuotesektorin rakenteellisten laskurien kehitys**
 - Laskurissa pitää pystyä analysoimaan puutuotevirtoja ja niissä **syntyviä hiilivarastoja sidottuna aikaan, sijaintiin ja muihin ominaisuuksiin**. Tämä mahdollistaa kannustimien tai toimenpiteiden tehokkaan kohdentamisen.
 - **Puutuotesektorin laskurin parametrisointia varten puutuotevirtoja sektorin sisällä ja sen ulkopuolelle** voidaan selvittää panos-tuotos mallilla.
 - Laskurin pitää pystyä kuvaamaan realistisesti **kierrätys ja kaskadikäytön vaikutuksia** sekä havainnollistamaan esimerkiksi **uusien innovatiivisten tuotteiden tai käytäntöjen potentiaalia ilmastomuutoksen hidastamisessa**.
 - Puutuotteiden hiilivaraston pitkän ajan muutosta ennustavissa malleissa hiilivaraston kehitys pitäisi pystyä **ehdollistamaan kysyntä- tai tarvetekijöille**, esimerkiksi alueelliselle väestörakenteen kehitykselle.
 - Kaksi rakennetta kuvaavaa sovellusta **CAT** ja **Brunet-Navarro**, ovat jo valmiita laskenta-alustoja, mutta metodiset ratkaisut rajoittavat käyttöä jonkin verran. **CBM-FHWP** työkalulla voidaan simulointimalli sovittaa joustavasti laskennan tavoitteisiin ja kotimaisten puutuotteiden elinkaareen.
- **III Koko metsä-puutuote-ketjun hiilivarastojen muutoksen tarkastelu.**
 - Tavoitteeksi voidaan asettaa **kokonaiskuva puun käytön vaikutuksesta biogeenisen hiilen varastoihin metsässä ja puutuotteissa**. Hiilivaraston laskentatapa voi vaihdella tuloksen käyttötarkoituksen mukaisesti.
 - On selvittettävä miten suomalaiset metsien kasvumallit voidaan liittää kehitettäviin puutuotteiden hiilivaraston laskentamalleihin. Sekä **CAT**, **Brunet-Navarro** että **CBM-FHWP** voidaan liittää metsäsektorin malleihin.
- **IV Toimintatavasta**
 - Puutuotteisiin sitoutuvan hiilen laskenta, erityisesti koko metsä-puutuoteketjun käsittävänä, edellyttää lukuisia metodologisia valintoja.
 - Johtuen työkalujen eri käyttötarkoituksista ja välttämättömistä metodista valinnoista, ennakkoon **ei ole olemassa vain yhtä ratkaisumallia tai työkalua**.
 - Erityisesti rakennuskannan osalta kaikilla mahdollisilla kehittäjillä tulisi olla käytössään **avoimet lähtötiedot**.
 - **Kehitystyöstä tulisi vastata konsortion** jonka tehtävä on varmistaa että metodisten ratkaisujen vaikutukset ovat havainnollistettavissa ja niitä verrataan vaihtoehtoihin ratkaisuihin.

Lähdeviitteet

- Alfredsen, G.; Sandland, K. M.; Tellnes, L. G.; & Selvig, E. (2020). Trebasert karbonlagring i bygningsmasse Metodedokumentasjon. NIBIO Rapport, 6(148), s. 40.
- Amiri, A.; Ottelin, J.; Sorvari, J.; & Junnila, S. (2020). Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings. *Environmental Research Letters*, 15(9), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba134>
- Bates, L.; Jones, B.; Marland, E.; Mrland, G.; Ruseva, T.; Kowalczyk, T.; & Hoyle, J. (2017). Accounting for Harvested Wood Products in a Forest Offset Program: Lessons from California. *Journal of Forest Economics*, 27, 50-59. doi:10.1016/j.jfe.2017.02.004
- Bösch, M.; Jochem, D.; Weimar, H.; & Dieter, M. (2015). Physical input-output accounting of the wood and paper flow in Germany. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 99-109. doi:10.1016/j.resconrec.2014.11.014
- Brunet-Navarro, P.; Jochheim, H.; Kroiher, F.; & Muys, B. (2018). Effect of cascade use on the carbon balance of the German and European wood sectors. *Journal of Cleaner Production*, 170, 137-146. doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.135
- Brunet-Navarro, P.; Jochheim, H.; & Muys, B. (2016). Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review. *Global Change Biology*, 22, 2555-2569. doi: 10.1111/gcb.13235
- Carle, M.-A.; D'Amours, S.; Azouzi, R.; & Rönnqvist, M. (2020). A Strategic Forest Management Model for Optimizing Timber Yield and Carbon Sequestration. *Forest Science*, 67(2), 205-218. doi:10.1093/forsci/fxaa043
- Chen, J.; Ter-Mikaelian, M. T.; Hongqiang, Y.; & Colombo, S. J. (2018). Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada. *Forestry*, 91(2), 193-205. doi:10.1093/forestry/cpx056
- De Rosa, M.; Pizzol, M.; & Schmidt, J. (2018). How methodological choices affect LCA climate impact results: the case of structural timber. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 147-158. doi:10.1007/s11367-017-1312-0
- Dymond, C. C. (2012). Forest carbon in North America: annual storage and emissions from British Columbia's harvest, 1965–2065. *Carbon Balance and Management*, 7(8), 1-20. doi:10.1186/1750-0680-7-8
- Dymond, C.; McCulloch, L.; & Salazar, J. (2016, update July 19, 2016). A Carbon Calculator for Harvested Wood Products - User's Manual. (s. 15). Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations, British Columbia, CA. Noudettu osoitteesta https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/natural-resource-stewardship/nrs-climate-change/mitigation/users_manual_july_19_2016.pdf
- Gustavsson, L.; Haus, S.; Lundblad, M.; Lundström, A.; Ortiz, C. A.; Sathre, R.; . . Wikberg, P.-E. (2017). Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 612-624. doi:10.1016/j.rser.2016.09.056
- Hafner, A.; & Rüter, S. (2018). Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings—an exemplary study for residential buildings in Germany. *Wood and Fibre Science*, 50(Special Issue), 139-154. doi:10.22382/wfs-2018-047
- Head, M.; Magnan, M.; Kurz, W. A.; Levasseur, A.; Beauregard, R.; & Margni, M. (2021). Temporally-differentiated biogenic carbon accounting of wood building product life cycles. *SN Applied Sciences*, 17. doi:10.1007/s42452-020-03979-2
- Heräjärvi, H. (2019). Wooden buildings as carbon storages - Mitigation or oratorio. *Wood Material Science & Engineering*, 14(5), 291-297. doi:10.1080/17480272.2019.1635205
- Hill, C. A. (2019). The Environmental Consequences Concerning the Use of Timber in the Built Environment. *Frontiers in built Environment*, 5(129), 1-10. doi:10.3389/fbuil.2019.00129
- Häkkinen, T.; Ruuska, A.; Vares, S.; Pulakka, S.; Kouhia, I.; & Holopainen, R. (2012). Methods and concepts for sustainable renovation of buildings. Espoo: VTT.
- Häkkinen, T.; Sylviane, N.; & Harpa, B. (2021). Carbon handprint for buildings. Definitions and methods. Ministry of Environment Finland. Noudettu osoitteesta <https://ym.fi/documents/1410903/40549091/Raportti+-+Definition+and+methods+for+the+carbon+handprint+of+buildings.pdf/ed3c5535-c1b8-3beb-7765-ec0ee1f61443/Raportti+-+Definition+and+methods+for+the+carbon+handprint+of+buildings.pdf?t=1617775615867>
- Howard, C.; Dymond, C. C.; Griess, V. C.; Tolkien-Spurr, D.; & van Kooten, G. K. (2021). Wood product carbon substitution benefits: a critical review of assumptions. *Carbon Balance and Management*, 19(9), 1-11. doi:10.1186/s13021-021-00171-w

Lähdeviitteet

- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry. IPCC.
- IPCC. (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Teoksessa B. E. Calvo;K. Tanabe;A. Kranjc;J. Baasansuren;M. Fukuda;N. S.; . . S. Federici, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol 4 Agriculture, Forestry and other Land Use 2019* (s. 49). Switzerland: IPCC.
- Jasinevičius, G.;Lindner, M.;Pingoud, K.;& Tykkyläinen, M. (2015). Review of models for carbon accounting in harvested wood products. *International Wood Products Journal*, 6(4), 198-212. doi:10.1080/20426445.2015.1104078
- Kalliokoski, T.;Heinonen, T.;Holder, J.;Lehtonen, A.;Mäkelä, A.;Minnunno, F.; . . Salminen, O. (2019). Skenaarioanalyysi metsien kehitystä kuvaavien mallien ennusteiden yhtäläisyyksistä ja eroista. Suomen Ilmastopaneeli. Noudettu osoitteesta https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2019/02/Ilmastopaneeli_mets%C3%A4mallit_raportti_180219.pdf
- Kalt, G. (2018). Carbon dynamics and GHG implications of increasing wood construction: long-term scenarios for residential buildings in Austria. *Carbon Management*, 9(3), 265-275. doi:10.1080/17583004.2018.1469948
- Laine, A.;Kilpinen, S.;Horváth, M.;Sihvonen, H.;Linnamaa, P.;& Raivio, T. (12.3.2021). Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki osana sääntelyä – haasteet ja mahdollisuudet. Gaia Consulting Oy.
- Lasseur, A.;Lesage, P.;Margni, M.;& Samson, R. (2013). Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 117-128.
- Leturcq, P. (2020). GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution. *Scientific Reports*, 10:20752, 1-9. doi:10.1038/s41598-020-77527-8
- Liptow, C.;Janssen, M.;& Tillman, A.-M. (2018). Accounting for effects of carbon flows in LCA of biomass-based products—exploration and evaluation of a selection of existing methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 2110-2125. doi:10.1007/s11367-018-1436-x
- Liski, J.;Pussinen, A.;Pingoud, K.;Mäkipää, R.;& Karjalainen, T. (2001). Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research*, 31(11), 2004-2013. doi:10.1139/cjfr-31-11-2004
- Müller, D. B. (2006). Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands. *Ecological Economics*, 59(1), 142-156. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.09.025
- Peñaloza, D.;Erlandsson, M.;& Falk, A. (2016). Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. *Construction and Building Materials*, 125, 219-226. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041
- Pichancourt, J.-B.;Manso, R.;Ningre, F.;& Fortin, M. (2018). A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles. *Environmental Modelling & Software*, 107, 158-174. doi:10.1016/j.envsoft.2018.06.005
- Pingoud, K.;Perälä, A.-L.;Soimakallio, S.;& Pussinen, A. (2003). Greenhouse gas impacts of harvested wood products. Evaluation and development of methods. Espoo: VTT.
- Puutuoteteollisuus ry. (2020). Vähähiilisen puurakentamisen tiekartta. Granlund Oy. Puutuoteteollisuus ry.
- Sathre, R.;& O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13(2), 104-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>
- Schelhaas, M.;van Esch, P.;Groen, T.;de Jong, B.;Kanninen, M.;Liski, J.; . . Vilén, T. (2004). CO2FIX V 3.1 - Manual. EFI.
- Seppälä, J.;Heinonen, T.;Pukkala, T.;Kilpeläinen, A.;Mattila, t.;Myllyviita, T.; . . Peltola, H. (2019). Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of Environmental Management*, 580-587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.031>
- Smyth, C.;Stinson, G.;Neilson, E.;Lemprière, T.;Hafer, M.; . . Kurz, W. (2014). Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeosciences*, 11, 3515–3529. doi:10.5194/bg-11-3515-2014
- Soimakallio, S.;Kalliokoski, T.;Lehtonen, A.;& Salminen, O. (2021). On the trade-offs and synergies between forest carbon. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(4), 17. doi:10.1007/s11027-021-09942-9
- Statistics Finland. (2021). Greenhouse gas Emissions in Finland - National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Helsinki: Statistics Finland.

Lähdeviitteet

- Taverna, R.;Hofer, P.;Werner, F.;Kaufmann, E.;& Thürig, E. (2007). The CO2 Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry. Scenarios of future potential for climate-change mitigation. Bern: Federal Office for the Environment.
- Vares, S.;Häkkinen, T.;& Vainio, T. (2017). Rakentamisen hiilivarasto. VTT. Noudettu osoitteesta <https://www.ym.fi/download/noname/%7B2859F537-ECD2-479D-A62B-F13AD75403F2%7D/136827>
- Werner, F.;Taverna, R.;Hofer, P.;& Richter, K. (2006). Green House Gas Dynamics of an Increased Use of Wood in Buildings in Switzerland. Climate Change, 74, 319-347. doi:10.1007/s10584-006-0427-2
- Werner, F.;Taverna, R.;Hofer, P.;Thürig, E.;& Kaufmann, E. (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science & Policy, 13(1), 72-85. doi:10.1016/j.envsci.2009.10.004
- Zhang, X.;Yang, H.;& Chen, J. (2018). Life-cycle carbon budget of China's harvested wood products in 1900–2015. Forest Policy and Economics, 92, 181-192. doi:10.1016/j.forpol.2018.05.005
- Zubizarreta-Gerendiain, A.;Pukkala, T.;& Peltola, H. (2016). Effects of wood harvesting and utilisation policies on the carbon balance of forestry under changing climate: a Finnish case study. Forest Policy and Economics, 62, 168-176. doi:10.1016/j.forpol.2015.08.007
- Xie, S. H. (2020). Impact of harvested wood products consumption strategies on British Columbia's greenhouse gas emissions (T). University of British Columbia. Retrieved from

<https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/10390321>

Selvityksen yhteydessä on kuultu seuraavia tahoja		
Kohde	Henkilö(t)	Asia
Cei-Bois	Paul Brannen, Andrew Norton	Tools to assess carbon storage in wood products
NORSUS	Lars Tellners	Long-term carbon storage in wood products – rules & applications
SLU	Dimitris Athanassiadis	Long-term carbon storage in wood products – rules & applications
Puutuoteteollisuus ry	Matti Mikkola	Puurakentamisen tiekartta
LCA Listserver		Tools for carbon storage accounting
EFI	Hans Ververk	CO2Fix model
Gov. BC, Kanada	Caren Dymond	Wood C Calculator
Gaia Consulting	Anna Laine	Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki osana sääntelyä – haasteet ja mahdollisuudet
Natural Resources Canada	Werner Kurz, Michael Magnan ja Sheng, H. Xie	Carbon Budgeting Model- Framework for Harvested Wood Products (CBM-FHWP)