

SUOMEN ILMASTOPANEELIN RAPORTTI 5/2026

Bioperäisen hiilidioksidin tulevaisuus Suomessa

Arvonlisäystä metsäteollisuuden korkeamman jalostusasteen
tuotteista ja hiilidioksiditaloudesta

KATI KOPONEN, TEKLA TAMMELIN-PELTONEN, SAMPO MÄKIKOURI, ONNI LINJALA, MARC BORREGA,
ANTTI ARASTO, JUSSI LINTUNEN, ESA VAKKILAINEN, RISTO SOUKKA, MONIKA ÖSTERBERG, MARI
HEIKKINEN, HANNU SAVOLAINEN, JYRI SEPPÄLÄ

© Suomen ilmastopaneeli

Julkaistu CC BY 4.0 -lisensillä.

Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2026

Bioperäisen hiilidioksidin tulevaisuus Suomessa – Arvonlisäystä metsäteollisuuden korkeamman jalostusasteen tuotteista ja hiilidioksiditaloudesta

Tekijät: Kati Koponen¹, Tekla Tammelin-Peltonen¹, Sampo Mäkikouri¹, Onni Linjala¹, Marc Borrega¹, Antti Arasto¹, Jussi Lintunen², Esa Vakkilainen³, Risto Soukka³, Monika Österberg⁴, Mari Heikkinen⁵, Hannu Savolainen⁵, Jyri Seppälä⁵

¹ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

² Luonnonvarakeskus

³ LUT-yliopisto

⁴ Aalto-yliopisto

⁵ Suomen ympäristökeskus

Raportin laatijat kiittävät työssä avustaneita ja oletuksia tarkastaneita tutkijoita organisaatioissaan. Erityiskiitos VTT:n Lotta Sorsamäelle tasemallin tarkastusavusta.

Toimitussihteeri: Maria Karttunen

Julkaisupäivä: 15.6.2026

ISSN: 2737-0666

ISBN: 978-952-7457-42-9

DOI: [lisätään myöhemmin]

Viittausohje:

Koponen, K., Tammelin-Peltonen, T., Mäkikouri, S., Linjala, O., Borrega, M., Arasto, A., Lintunen, J., Vakkilainen, E., Soukka, R., Österberg, M., Heikkinen, M., Savolainen, H., Seppälä, J. Bioperäisen hiilidioksidin tulevaisuus Suomessa – Arvonlisäystä metsäteollisuuden korkeamman jalostusasteen tuotteista ja hiilidioksiditaloudesta. Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2026.

Suomen ilmastopaneeli edistää tieteen ja politiikan välistä vuoropuhelua ilmastokysymyksissä. Se antaa suosituksia hallituksen ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja vahvistaa monitieteellistä otetta ilmastotieteissä. Ilmastopaneelin selvitykset ja kannanotot tehdään tieteellisin perustein.

[Ilmastopaneeli.fi](https://ilmastopaneeli.fi)

info@ilmastopaneeli.fi

Metsäbiotalouden tiedepaneeli tarjoaa riippumatonta ja monialaista tutkimustietoa Suomen metsien kestävästä ja monipuolisesta käytöstä. Paneeli vahvistaa päätöksenteon tietopohjaa ja tukee metsäalan innovaatioiden kehittämistä.

[Metsätiedepaneeli.fi](https://metsatiedepaneeli.fi)

metsatiedepaneeli@luke.fi

SISÄLLYS

KESKEISET VIESTIT	IV
TIIVISTELMÄ	VI
SAMMANDRAG	VII
SUMMARY	VIII
SANASTO	IX
1 JOHDANTO	1
1.1 ARVONLISÄYSTÄ METSÄTEOLLISUUDEN KORKEAMMAN JALOSTUSASTEEN TUOTTEISTA JA BIOPERÄISESTÄ HIILIDIOKSIDISTA	1
1.2 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTON, HYÖTYKÄYTÖN JA VARASTOINNIN ROOLI SUOMEN JA EU:N ILMASTOPOLITIIKASSA	2
1.3 METSIEN HYÖDYNTÄMISEN KYTKÖS ILMASTOTAVOITTEISIIN JA -VELVOITTEISIIN	4
1.4 TYÖN TAVOITTEET	6
2 AINEISTOT JA MENETELMÄT	9
2.1 TILASTOPOHJAISEN MALLINNUKSEN LÄHTÖKOHDAT JA TARKASTELTAVAT SKENAARIOT	9
2.1.1 TARKASTELTAVAT PUU- JA HIILIDIOKSIDIVIRRAT	9
2.1.2 KORKEAMMAN ARVONLISÄN METSÄTEOLLISUUSTUOTTEET	11
2.1.3 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO, HYÖTYKÄYTTÖ JA VARASTOINTI	12
2.1.4 UUSI SÄHKÖNTUOTANTO JA LÄMMITYSSEKTORIN SÄHKÖISTYMINEN	13
2.1.5 TARKASTELTAVAT HAKKUUTASOT	14
2.1.6 TARKASTELTAVAT SKENAARIOT	14
2.1.7 TILASTOPOHJAINEN PUUNKÄYTTÖMALLI	16
2.1.8 KESKEISIMMÄT LÄHTÖTIEDOT	17
2.1.9 MALLIN RAJOITUKSET JA EPÄVARMUUDET	19
2.2 ARVONLISÄYSTARKASTELU	20
2.3 KANSANTALOUSVAIKUTUSTEN ARVIOINTI ENVIMATSCEN-MALLILLA	23
2.3.1 ENVIMATSCEN-MALLIN PERUSPERIAATTEET	23
2.3.2 SKENAARIOIDEN ARVIOINTIPERIAATTEET	24
2.4 TUOTEKOHTAISTEN ILMASTOVAIKUTUSTEN ARVIOINTI	25
2.4.1 RUNKOPUUN KÄYTTÖ ERI KOHTEISSA	25
2.4.2 PUUTUOTTEIDEN HIILITASEEN MUUTOS	26

2.4.3	PUUTUOTTEIDEN KORVAUSHYÖDYT _____	27
2.4.4	PUUN ENERGIATUOTANNON KORVAUSHYÖDYT _____	28
2.4.5	METSIEN HIILINIELUN MUUTOKSET _____	28
2.4.6	ILMASTOVAIKUTUSTEN TOTEUTUMINEN SUOMESSA JA ULKOMAILLA _____	28
3	TULOKSET _____	30
3.1	TILASTOPOHJAISEN PUUNKÄYTTÖMALLIN TULOKSIA _____	30
3.1.1	HIILIDIOKSIDIN SAATAVUUS JA BECCU-TUOTTEIDEN MÄÄRÄT _____	30
3.1.2	LISÄÄNTYNYT SÄHKÖNTUOTANNON TARVE _____	33
3.1.3	INVESTOINNIT JA ARVONLISÄYS _____	35
3.1.4	HERKKYYSTARKASTELUT _____	42
3.2	ENVIMATSCEN-MALLINNUKSEN TULOKSIA _____	43
3.3	TUOTEKOHTAISET ILMASTOVAIKUTUKSET _____	47
3.4	SKENAARIOIDEN VAIKUTUKSET SUOMEN ILMASTOTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISEEN JA KANSALLISTEN EU-VELVOITTEIDEN TÄYTTÄMISEEN _____	49
4	TULOSTEN TARKASTELUA _____	54
4.1	ARVONLISÄYSTÄ METSÄTEOLLISUUDEN KORKEAMMAN JALOSTUSARVON TUOTTEISTA _____	54
4.2	BIOPERÄISEN HIILIDIOKSIDIN SAATAVUUS SUOMESSA SÄILYY HYVÄNÄ _____	55
4.3	HIILIDIOKSIDIN HYÖTYKÄYTÖN RAJOITTEENA UUSIUTUVAN SÄHKÖN SAATAVUUS _____	56
4.4	HIILIDIOKSIDITALOUDEN MAHDOLLISUUDET LUODA ARVONLISÄYSTÄ _____	57
4.5	INVESTOINTEJA TARVITAAN _____	58
4.6	KYSYNTÄ TUOTTEILLE LUOTAVA KUNNIANHIMOISELLA ILMASTOPOLITIIKALLA _____	59
4.7	SKENAARIOIDEN ILMASTOVAIKUTUKSET _____	59
5	JOHTOPÄÄTÖKSET _____	61
	LÄHTEET _____	63
	LIITTEET _____	74

KESKEISET VIESTIT

- **Metsien ja puun käytön resurssitehokkuutta, arvonlisäystä ja ilmastovaikutuksia pystytään parantamaan yhtäaikaisesti**, kun metsäteollisuuden sivuvirrat, kuten ligniini ja kuori, ohjataan polton sijaan korkeamman arvonlisäyksen tuotteisiin ja metsäteollisuuden prosesseista sekä bioenergialaitoksista vapautuvaa bioperäistä hiilidioksidia hyödynnetään tuotteina tai varastoidaan pysyvästi.
- **Metsäteollisuuden korkeamman jalostusarvon tuotteista kuten kuoren tanniineista (nahan käsittely) ja ligniinisovelluksista (esimerkiksi kovahiili akkumateriaaleihin, liimat) voidaan saada merkittävää arvonlisäystä.** Nämä virrat voidaan hyödyntää maltillisilla investoinneilla. Puun hiilen tehokas hyödyntäminen tulisi toteuttaa ensin materiaalina mahdollisimman tehokkaasti ja pitkäaikaisesti ennen polttoa ja näin edistää kiertotaloutta ja tukea energia- ja materiaalitehokkuutta. Uusien puutuotteiden kysyntää tulisi pyrkiä edistämään EU:n yhteisten toimien kautta EU:n biotalousstrategian mukaisesti.
- **Suomessa on yksi EU:n merkittävimmistä bioperäisen hiilidioksidin talteenottopotentiaaleista.** Suomi voisi esimerkiksi valmistaa merkittävän osan EU:n synteettisten lentopolttoaineiden (BECCU) tarpeesta ja samalla tuottaa pysyviä hiilidioksidin poistoja (BECCS). Bioperäisen hiilidioksidin saatavuus säilyy hyvänä (yli 15 Mt vuodessa), vaikka metsäteollisuuden sivuvirtoja, kuten ligniiniä ja kuorta, ohjattaisiin pois poltosta ja hakkuutaso madaltuisi nykytasosta 64 miljoonaan kuutiometriin vuodessa.
- **Bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämisen ratkaisut (BECCU) mahdollistavat potentiaalisen suuren mittakaavansa takia merkittävän arvonlisäyksen mutta vaativat huomattavia investointeja.** Uuden hiilidioksiditalouden potentiaalin toteutuminen edellyttää investointeja hiilidioksidin talteenottoon, uusiutuvan sähkön lisätuotantoon ja uusiin teknologioihin.
- **Jos Suomessa pyrittäisiin esimerkiksi vuoteen 2040 mennessä hyödyntämään 20 prosenttia bioperäisen hiilidioksidin potentiaalista BECCU-tuotteiksi, se tarkoittaisi tässä raportissa tarkasteltujen skenaarioiden mukaisesti 3,4–5 Mt CO₂ talteenottoa vuodessa.** Tämä vastaa noin kahden suuren metsäteollisuuden yksikön päästöjä. Panokseksi vaadittaisiin noin 42–48 TWh uusiutuvaa sähköä, ja kokonaisinvestoinnit olisivat noin 40–49 Mrd. €. Mahdollinen arvonlisäys olisi tällöin noin 3–5 Mrd. € vuodessa.
- **Hiilidioksidin hyötykäyttöä suuressa mittakaavassa rajoittaa erityisesti vedyn tuotantoon tarvittavan uusiutuvan sähkön saatavuus.** Esimerkiksi viimeisen kolmen vuoden kasvuvauhti tuulivoiman tuotannossa Suomessa johtaisi noin 50 TWh lisätuotantoon vuoteen 2040 mennessä. Tämä riittäisi noin 20 % bioperäisen hiilidioksidin jalostamiseen BECCU-tuotteiksi. Todellisuudessa uutta sähköntuotantoa tarvittaisiin vielä enemmän, huomioiden muiden sektorien sähköistyminen. Suuressa mittakaavassa hiilidioksiditaloutta voi rajoittaa myös työvoiman saatavuus.
- **Hiilidioksidin pysyvä varastointi (BECCS) vaatii huomattavasti vähemmän investointeja sekä lisäsähkön tuotantoa kuin BECCU, mutta luo vastaavasti vähemmän arvonlisäystä.** Arvonlisäys myös kohdistuu osittain ulkomaille hiilidioksidin geologista varastointia tarjoaviin maihin. Kotimaisen keskiluokan mittakaavan varastointimahdollisuuden voisi luoda hiilidioksidin mineralisointi kaivosjätteisiin, mutta tämä on vasta pilotointiasteella.

- **BECCU-tuotteiden ja BECCS:n potentiaalinen toteutuminen edellyttää vakaan ja kunnianhimoisen ilmastopolitiikan lisäksi ennakoitavaa kysyntä- ja investointiympäristöä.** Markkina syntyy sääntelyn sekä EU:n ja kansallisten tavoitteiden kautta. Toistaiseksi EU on asettanut tavoitteita erityisesti lentoliikenteen synteettisille polttoaineille (ns. RFNBO-polttoaineet), mikä mahdollistaa tietyn kysyntänäkymän. BECCS-kysyntää voidaan luoda esimerkiksi sisällyttämällä pysyvät hiilidioksidin poistot EU:n päästökauppaan, mutta tämä ei todennäköisesti alkuvaiheessa yksinään riitä kannusteeeksi. Teknologioiden skaalautuminen vie aikaa, joten potentiaalinen toteuttamiseksi tarvitaan nopeasti demonstraatioita ja investointipäätöksiä teollisen mittakaavan hankkeisiin.
- **BECCU:n sekä metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden ja toisaalta BECCS:n ilmastohyödyt kohdistuvat eri tavoin:** uusien tuotteiden ilmastohyödyt näkyvät markkinoiden myötä myös Suomen rajojen ulkopuolella, kun taas BECCS:n muodostamien teknologisten nielujen ilmastohyödyt kohdistuvat Suomen ilmastolain mukaisten tavoitteiden saavuttamiseen. BECCS:n rooli kansallisten EU-velvoitteiden täyttämässä vuoden 2030 jälkeen selkiytyy myöhemmin EU-sääntelyn täsmentyessä.
- **Metsäteollisuuden ilmastovaikutuksia voidaan parantaa siirtämällä puuta energiakäytöstä materiaalikäyttöön ja kasvattamalla hiilidioksidin talteenottoastetta.** Uusi tuotantotoiminta ei kuitenkaan pysty kompensoimaan metsänielun heikkenemisestä aiheutuvaa päästövaikutusta korkeamman hakkuutason skenaariossa verrattuna matalamman hakkuutason skenaarioon. Tämän vuoksi raportissa tarkastellun matalamman hakkuutason yhdistäminen uuteen tuotantotoimintaan tukee paremmin tulevien ilmastotavoitteiden ja -velvoitteiden saavuttamista sekä raaka-ainepohjan kestävyyskriteerien mukaisuutta.
- **Uudet metsäteollisuuden kuori- ja ligniinituotteet sekä hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö voivat mahdollistaa nykyisen tai jopa korkeamman arvonlisäyksen myös nykytasoa maltillisemmalla hakkuutasolla.** Jollei uusia arvonlisätuotteita saada markkinoille, hakkuiden alentaminen johtaisi metsäsektorin taloudellisen aktiviteetin laskuun, johon kansantalous ja aluetaloudet joutuisivat sopeutumaan. Hakkuiden 10 milj. m³ alentaminen nykyisellä tuotantorakenteella laskisi metsäsektorin arvonlisää 0,9–1,4 Mrd. € vuodessa. Kansantalouden sopeutumista kuvaavan ENVIMATscen-mallin avulla arvioitiin hakkuiden alentamisen laskevan bruttokansantuotetta 0,2 Mrd. € vuodessa. Mallissa kokonaistyöttömyys säilyy samana.

TIIVISTELMÄ

Raportissa tarkastellaan skenaarioita, joissa Suomessa voidaan luoda taloudellista arvonlisäystä metsien ja puun materiaalitehokkaamman käytön, metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden (kuoren tanniinit ja ligniinisovellukset) sekä bioperäisen hiilidioksidin talteenoton, hyötykäytön ja varastoinnin keinoin. Tarkastelun kohteena on bioperäisen hiilidioksidin saatavuus hyötykäyttöön (BECCU) ja varastointiin (BECCS), kun metsäteollisuuden sivuvirtoja ohjataan polton sijaan korkeamman arvonlisän tuotteisiin, lämmöntuotantoa sähköistetään ja hakkuutasoa muutetaan. Lisäksi tarkastellaan uusien tuotteiden määriä, sähköntuotannon lisätarvetta sekä uusilla tuotteilla saavutettavaa arvonlisäystä ja sen edellyttämiä investointeja. Samalla arvioidaan eri skenaarioiden kansantalous- ja ilmastovaikutuksia.

Tarkastelu kattaa vuoteen 2040 ulottuvat nykYTEKNOLOGIOIHIN perustuvan skenaarion sekä Tech-skenaariot, joissa metsäteollisuudessa siirrytään korkeamman jalostusarvon ratkaisuihin ja lämmöntuotantoa sähköistetään. Lisäksi tarkastellaan BECCU- ja BECCS-skenaarioita, joissa talteenotettu hiilidioksidi hyödynnetään tuotteisiin tai varastoidaan pysyvästi. Ratkaisuja tarkastellaan suhteessa eri hakkuumääriin. Mallinnuksessa käytetään 74 miljoonan kuutiometrin (vastaa vuoden 2024 hakkuukertymää runkopuulle) sekä vaihtoehtoisesti 64 miljoonan kuutiometrin vuosittaista hakkuutasoa, joka vastaa Ilmastopaneelin aiempia suosituksia. Tulokset esitetään bioperäisen hiilidioksidin 20 prosentin, 50 prosentin ja 100 prosentin käyttöasteella.

Tulokset osoittavat, että Suomessa on mahdollista luoda tulevaisuudessa merkittävää taloudellista arvonlisää ja saavuttaa myönteisiä ilmastovaikutuksia parantamalla puun käytön materiaalitehokkuutta, kehittämällä metsäteollisuuden korkeamman jalostusasteen tuotteita sekä hyödyntämällä bioperäistä hiilidioksidia tuotteina tai varastoimalla sen pysyvästi. Erityisesti ligniiniin ja tanniiniin perustuvat metsäteollisuuden tuotteet voivat tuottaa merkittävää arvonlisäystä maltillisilla investoinneilla.

Bioperäisen hiilidioksidin saatavuus Suomessa säilyy hyvänä, vaikka hakkuutaso madaltuisi ja puun polttoa vähennettäisiin. Tämä mahdollistaa sekä BECCU- että BECCS-ratkaisujen kehittämisen. BECCU-skenaarioissa taloudellinen potentiaali on suurin, mutta niiden toteutuminen edellyttää huomattavia investointeja. Uusiutuvan sähkön, sekä suuressa mittakaavassa myös työvoiman, saatavuus voivat muodostaa rajoitteen potentiaalın toteutumiselle. BECCS-ratkaisut vaativat pienempiä investointeja mutta tuottavat myös pienemmän arvonlisäyksen.

Arvonlisäyksen potentiaalın toteutuminen edellyttää toimivien markkinoiden syntymistä, mikä vaatii kunnianhimoista ja vakaata ilmastopolitiikkaa. Nykyinen sääntely luo kysyntää osalle tuotteista, mutta lisätoimia tarvitaan erityisesti BECCU- ja BECCS-ratkaisujen kysynnän ja investointien vauhdittamiseksi.

Ilmastovaikutukset ovat myönteisimmät tarkastellulla 64 miljoonan kuutiometrin hakkuutasolla. Suuremmalla, 74 miljoonan kuutiometrin hakkuutasolla uusien tuotteiden tuomat ilmastohyödyt eivät riitä kompensoimaan metsien hiilinielun heikkenemistä raportissa tarkasteltuun matalampaan hakkuutasoon nähden. Ilmastohyödyt jakautuvat eri tavoin Suomen ja ulkomaiden välillä BECCU- ja BECCS-ratkaisujen osalta. BECCU-tuotteiden korvaushyödyt toteutuvat pitkälti Suomen ulkopuolella, kun taas BECCS tukee varmemmin Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamista. Hakkuiden vähentyminen 10 miljoonaa kuutiometriä nykyisellä tuotantorakenteella laskisi metsäsektorin arvonlisää 0,9–1,4 miljardilla eurolla vuosittain. Kansantalouden sopeutumista kuvaavan ENVIMATscen-simulointimallin avulla arvioitiin hakkuiden vähentymisen laskevan bruttokansantuotetta 0,2 miljardia euroa vuodessa. Mallissa kokonaistyöttömyys säilyy samana.

Raportti on laadittu Suomen ilmastopaneelin ja Metsäbiotalouden tiedepaneelin yhteistyönä.

SAMMANDRAG

I rapporten granskas scenarier där man i Finland kan skapa ekonomisk värdeökning genom en mer materialeffektiv användning av skogar och trä, produkter med högre mervärde inom skogsindustrin (tanniner från bark och ligninapplikationer) samt genom avskiljning, nyttoanvändning och lagring av biobaserad koldioxid. Föremålet för granskning är tillgången till biobaserad koldioxid för nyttoanvändning (BECCU) och lagring (BECCS), när skogsindustrins sidoströmmar styrs till produkter med högre mervärde i stället för förbränning, värmeproduktionen elektrifieras och avverkningsnivån förändras. Dessutom granskas mängden nya produkter, behovet av ytterligare elproduktion samt den värdeökning som uppnås med nya produkter och de investeringar som detta förutsätter. Samtidigt bedöms de olika scenariernas konsekvenser för samhällsekonomin och klimatet.

Granskningen omfattar ett scenario som bygger på nuvarande teknik och sträcker sig till 2040 samt Tech-scenarier där skogsindustrin övergår till lösningar med högre förädlingsvärde och värmeproduktionen elektrifieras. Dessutom granskas BECCU- och BECCS-scenarierna, där den koldioxid som avskiljs utnyttjas i produkter eller lagras permanent. Lösningarna granskas i förhållande till olika avverkningsmängder. I modelleringen används en årlig avverkningsnivå på 74 miljoner kubikmeter (motsvarande avverkningsmängden för stamved år 2024) samt alternativt en årlig avverkningsnivå på 64 miljoner kubikmeter, vilket motsvarar klimatpanelens tidigare rekommendationer. Resultaten presenteras för en användningsgrad på 20 %, 50 % och 100 % för biobaserad koldioxid.

Resultaten visar att det i Finland i framtiden är möjligt att skapa ett betydande ekonomiskt mervärde och uppnå positiva klimateffekter genom att förbättra materialeffektiviteten i användningen av trä, utveckla produkter med högre förädlingsgrad inom skogsindustrin samt genom att använda biobaserad koldioxid i produkter eller lagra den permanent. Särskilt skogsindustrins produkter som bygger på lignin och tannin kan ge en betydande värdeökning med måttliga investeringar.

Tillgången på biobaserad koldioxid i Finland förblir god även om avverkningsnivån sänks och förbränningen av trä minskar. Detta möjliggör utvecklingen av både BECCU- och BECCS-lösningar. I BECCU-scenarierna är den ekonomiska potentialen störst, men genomförandet av dem förutsätter betydande investeringar. Tillgången till förnybar el och i stor skala även arbetskraft kan utgöra en begränsning för att potentialen ska kunna förverkligas. BECCS-lösningarna kräver mindre investeringar men ger också en mindre värdeökning.

För att potentialen för värdeökning ska kunna förverkligas krävs att fungerande marknader uppstår, vilket förutsätter en ambitiös och stabil klimatpolitik. Den nuvarande regleringen skapar efterfrågan på en del produkter, men ytterligare åtgärder behövs särskilt för att påskynda efterfrågan på och investeringar i BECCU- och BECCS-lösningar.

Klimateffekterna är mest positiva vid den granskade avverkningsnivån på 64 miljoner kubikmeter. Vid den högre avverkningsnivån på 74 miljoner kubikmeter räcker de klimatfördelar som de nya produkterna medför inte till för att kompensera försvagningen av skogarnas kolsänka jämfört med den lägre avverkningsnivå som granskas i rapporten. Klimatfördelarna fördelar sig på olika sätt mellan Finland och utlandet när det gäller BECCU- och BECCS-lösningar. Ersättningsfördelarna med BECCU-produkter förverkligas i stor utsträckning utanför Finland, medan BECCS säkrare stöder uppnåendet av Finlands klimatmål. En minskning av avverkningarna med 10 miljoner kubikmeter med den nuvarande produktionsstrukturen skulle minska skogssektorns mervärde med 0,9–1,4 miljarder euro per år. Med hjälp av simuleringsmodellen ENVIMATscen som beskriver samhällsekonomin anpassning bedömdes en minskning av avverkningarna minska bruttonationalprodukten med 0,2 miljarder euro per år. I modellen förblir den totala arbetslösheten oförändrad.

Rapporten har utarbetats i samarbete mellan Finlands klimatpanel och Vetenskapspanelen för skogsbioekonomi.

SUMMARY

The report examines scenarios in which Finland can create economic value added through the more material-efficient use of forests and wood, higher value-added products of the forest industry (bark tannins and lignin applications) and the capture, utilisation and storage of biogenic carbon dioxide. The focus is on the availability of biogenic carbon dioxide for utilisation (BECCU) and storage (BECCS), as forest industry side streams are directed to higher value-added products instead of combustion, heat production is electrified and the harvesting level varies. In addition, the volumes of new products, the additional need for electricity production, the value added achieved with new products and the investments required will be examined. At the same time, the impacts of different scenarios on the national economy and climate will be assessed.

The analysis covers a scenario based on current technologies, as well as Tech scenarios, extending until 2040. In Tech-scenario the forest industry moves to higher value-added products and heat production is electrified. In addition, the BECCU and BECCS scenarios are examined, where captured carbon dioxide is utilised in products or stored permanently. The solutions are examined in relation to different felling volumes. The modelling uses the annual harvesting level of 74 million cubic metres (corresponding to the level of roundwood harvest in 2024) and, alternatively, the annual harvesting level of 64 million cubic metres, which corresponds to the previous recommendations of the Finnish Climate Change Panel. The results are presented with a biogenic carbon dioxide utilisation rate of 20%, 50% and 100%.

The results show that it is possible to create significant economic value added in Finland, in the future, and to achieve positive climate impacts, by improving the material efficiency of wood use, developing higher value-added products in the forest industry, as well as by utilising biogenic carbon dioxide in products or storing it permanently. In particular, forestry products based on lignin and tannin can generate significant value added with moderate investments.

The availability of biogenic carbon dioxide in Finland remains good, even if the harvesting level declines and wood combustion is reduced. This enables the development of both BECCU and BECCS solutions. The BECCU scenarios have the highest economic potential, but substantial investments are needed to realise the potential. The availability of renewable electricity and, on a large scale, labour may be a constraint on the realisation of the potential. BECCS solutions require smaller investments but also produce less value added. The realisation of the potential of value added requires the creation of a functioning market, driven by an ambitious and stable climate policy. Current regulation creates demand for some of the studied products, but further efforts are needed to accelerate demand and investments in BECCU and BECCS solutions, in particular.

The climate impacts are most positive at the harvesting level of 64 million cubic metres. At the higher harvesting level of 74 million cubic metres, the climate benefits brought by new products are not sufficient to compensate for the weakening of the forest carbon sink compared to the lower harvesting level examined in the report. Climate benefits are distributed in different ways between Finland and abroad, in terms of BECCU and BECCS solutions. The substitution benefits of BECCU products are largely realised outside Finland, while BECCS more reliably support the achievement of Finland's climate targets. With the current production structure, a reduction in fellings of 10 million cubic metres would reduce the value added of the forest sector by EUR 0.9–1.4 billion annually.

The ENVIMATscen simulation model, which describes the adaptation of the national economy, estimated the reduction in fellings to reduce the gross domestic product by EUR 0.2 billion per year. In the model, total unemployment remains the same.

The report was prepared in cooperation between the Finnish Climate Change Panel and the Finnish Forest Bioeconomy Science Panel.

SANASTO

Arvonlisäys	Tässä työssä: Arvonlisäys = myyntitulot - tuotantokustannukset + työvoimakustannukset
BECCS	Bioenergian tuotanto yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon ja pysyvään varastointiin
BECCU	Bioenergian tuotanto yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon ja hyötykäyttöön
BECCUS	Bioenergian tuotanto yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon ja hyötykäyttöön tai pysyvään varastointiin
BioCO ₂	Bioperäinen hiilidioksidi
BKT	Bruttokansantuote
CCS	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CCU	Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö
CCU-tuote	Talteenotetusta hiilidioksidista ja vedystä valmistettu tuote
CCUS	Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja/tai varastointi
CHP	Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
CO ₂	Hiilidioksidi
DACCS	Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä ja pysyvä varastointi
e-SAF	Talteenotetusta hiilidioksidista ja vedystä valmistettu kestävä lentopolttoaine (= e-kerosiini)
e-bensiini	Talteenotetusta hiilidioksidista ja vedystä valmistettu bensiini
e-kerosiini	Talteenotetusta hiilidioksidista ja vedystä valmistettu kerosiini
ETS	EU:n päästökauppajärjestelmä
EU	Euroopan unioni
GWh	Gigawattitunti
Hiilidioksidin käyttöaste	Työssä tarkastellaan 20 %, 50 % tai 100 % skenaarioita hiilidioksidin käyttöasteelle, jolla tarkoitetaan sitä osuutta Suomessa saatavilla olevasta hiilidioksidista, joka skenaariossa otetaan käyttöön joko varastoitavaksi tai jalostettavaksi
HWP	Puutuotteiden hiilivarasto (Harvested wood products)

IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
LULUCF	Maankäyttösektori (maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous)
m-%	Massaprosentti
Maksimiskenaario	Maksimiskenaariolla viitataan 100 % hiilidioksidin käyttöasteen skenaarioon
Mm ³	Miljoonaa kuutiometriä
MWh	Megawattitunti
OPEX	Vaihtuvat kustannukset
RED-direktiivi	Uusiutuvan energian direktiivi
RFNBO	Talteenotetusta hiilidioksidista ja vedystä valmistettu polttoaine RED-direktiivin alaisten asetusten (DA1184 ja 1185) kriteerejä noudattaen
t C	Tonnia hiiltä
Talteenoton hyötysuhde	Hiilidioksidin talteenoton hyötysuhteella tarkoitetaan talteenottoprosessin hyötysuhdetta, joka on läpi tarkastelun 90 %.
Teknologinen hiilinielu	Bioperäisen tai suoraan ilmakehästä talteenotetun hiilidioksidin pysyvä varastointi. Tässä raportissa keskitytään bioperäisen hiilidioksidin pysyvään varastointiin eli BECCS:iin
TWh	Terawattitunti
USD	USA:n dollari
WACC	Painotettu keskimääräinen pääomakustannus
WAM	Lisätoimiskenaario

1 JOHDANTO

1.1 ARVONLISÄYSTÄ METSÄTEOLLISUUDEN KORKEAMMAN JALOSTUSASTEEN TUOTTEISTA JA BIOPERÄISESTÄ HIILIDIOKSIDISTA

Suomen metsiin kohdistuu monia, osin kilpailevia odotuksia: Metsäteollisuudella on merkittävä rooli Suomen kansantaloudelle ja puupohjaiset ratkaisut tuottavat merkittävää taloudellista arvonlisää. Lisäksi hakkutähteistä, energiapuusta sekä metsätalouden sivuvirroista tuotetulla bioenergialla on keskeinen rooli Suomen energiajärjestelmässä. Samanaikaisesti metsät ovat avainasemassa ilmastonmuutoksen hillinnässä ja luonnon monimuotoisuuden ylläpidossa. Suomen biotalousstrategian (TEM 2022) tavoitteena on metsäbiotalouden arvonlisäyksen kaksinkertaistaminen vuoteen 2035 mennessä tinkimättä kansallisista ilmasto- ja luonnon monimuotoisuustavoitteista. Strategian tavoitteena on lisätä materiaalien resurssiviisasta käyttöä ja kierrätystä sekä sivuvirtojen hyödyntämistä. Tavoitteeseen voidaan vastata tunnistamalla puuperäisten raaka-aineiden korkeamman jalostusarvon hyödyntämispotentiaali sekä arvioimalla puun poltossa vapautuvan hiilidioksidin arvoa yhtäältä jatkojalostuksen raaka-aineena ja toisaalta pysyvien hiilidioksidin poistojen tuottajana.

Metsäsektorin taloudellista arvonlisää voidaan kasvattaa laajentamalla nykyistä tuoteportfoliota korkeamman jalostusarvon tuotteisiin sekä ohjaamalla pää- ja sivuvirtoja energiakäytöstä korkeamman jalostusasteen tuotteiden raaka-aineiksi. Metsäteollisuuden uudistumismahdollisuuksia ja korkeamman arvonlisän tuotteita on selvitetty aiemmin esimerkiksi Metsäbiotalouden tiedepaneelin sekä Luonnonvarakeskuksen julkaisuissa (Österberg ym. 2024, Lintunen ym. 2023). Julkaisuissa tarkasteltiin markkinasellun jalostusta muun muassa joustaviksi pakkausmateriaaleiksi ja tekstiilikuiduiksi, lukuisien ligniinisovelluksien potentiaalia esimerkiksi akkumateriaalina, pinnoitteina ja liimoina sekä sahatavaran jalostusta massiivipuutuotteiksi (CLT) ja viilupuuksi (LVL). Kokonaisarvonlisälle arvioitiin 80 % kasvu vuoteen 2035 mennessä vuoden 2019 tasoon verrattuna ja samalla korkeamman arvonlisän tuotteiden kautta metsien käyttöä koskevat tavoitteet luonnon monimuotoisuus- ja ilmastohyötyjen aikaansaamiseksi voisivat helpottua (Österberg ym. 2024). Korkeamman arvonlisän tuotteiden läpilyöntiä kuitenkin hidastaa se, että niille on tyypillisesti olemassa halvempi fossiilipohjainen vastine, jonka käyttöön ei nykyään kohdistu haittamaksua fossiilisesta hiilisisällöstä.

Puun sisältämän hiilen materiaalitehokkuutta voidaan parantaa myös ottamalla talteen puun ja sivuvirtojen poltossa vapautuva bioperäinen hiilidioksidi metsäteollisuuden prosesseista ja bioenergiälaitoksista. Talteenotettu bioperäinen hiilidioksidi voidaan jalostaa uusiutuvan vedyn avulla esimerkiksi polttoaineiksi tai muoveiksi (BECCU) tai varastoida pysyvästi (BECCS). Näin samaa puuraaka-ainetta voitaisiin hyödyntää jopa useampaan kertaan: ensin puutuotteena ja tämän jälkeen hiilidioksidina joko uusien tuotteiden valmistuksessa tai pysyvänä hiilenpoistona. Hiilidioksidin hyötykäyttö voi näin mahdollistaa suuremman arvonlisän luomisen metsäteollisuuden jo käytössä olevista raaka-aineista. Myös bioperäisen hiilidioksidin pysyvä varastointi voi muodostua arvonlisää tuottavaksi palveluksi, jos hiilidioksidin poistolle ilmakehästä muodostuu hinta esimerkiksi päästökaupan, muiden politiikkamekanismien tai vapaaehtoisten markkinoiden kautta. Hiilidioksidin pysyvä poistaminen ilmakehästä on välttämätöntä Pariisin sopimuksen ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi (IPCC 2023).

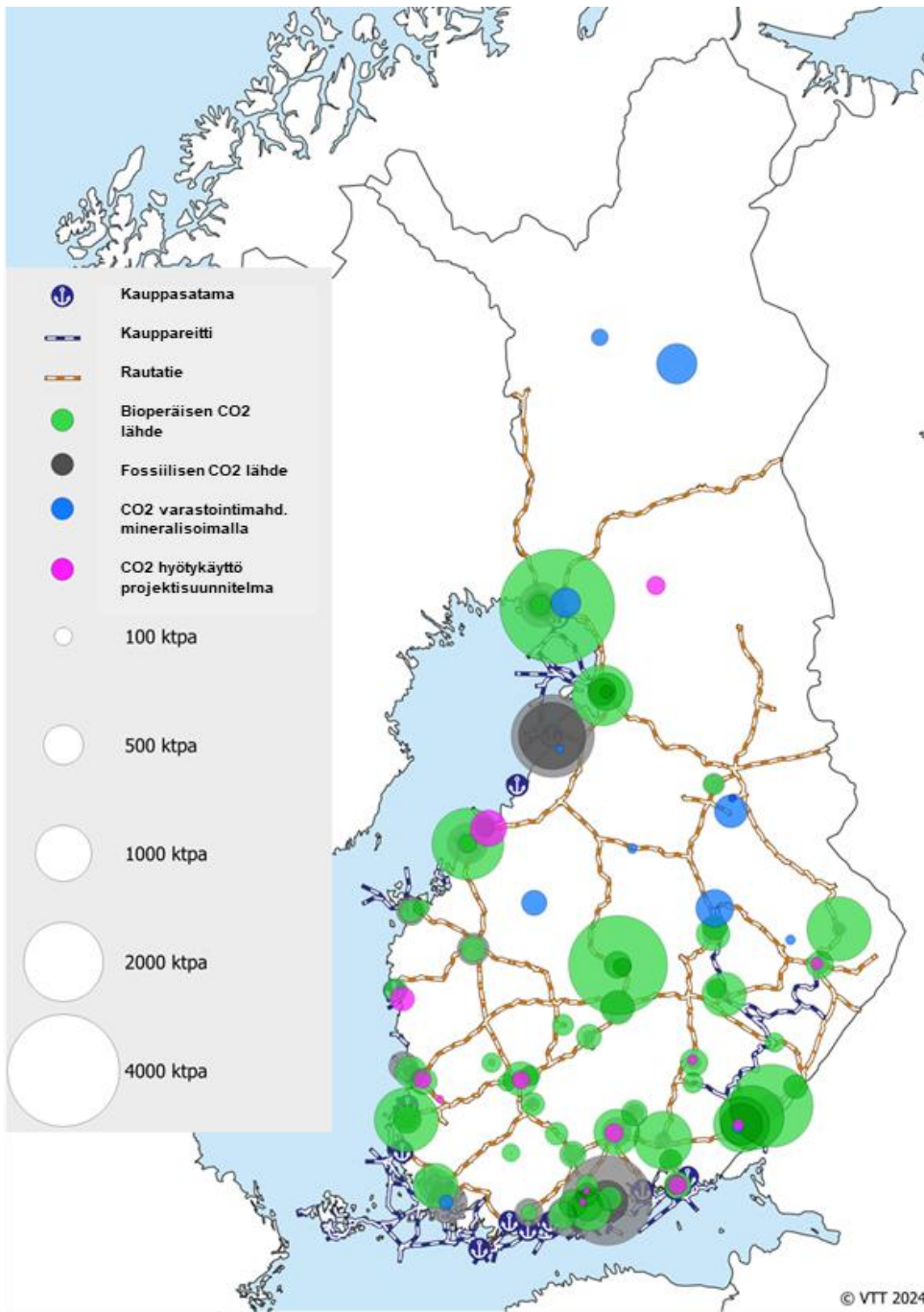
VTT:n ja Luken arvion mukaan BECCU- ja BECCS-ratkaisut voisivat tuottaa Suomelle yli kahden miljardin euron arvonlisäyksen vuoteen 2040 mennessä (Arasto ym. 2024). Raportissa arvioitiin erilaisia skenaarioita 20 Mt bioperäisen hiilidioksidin hyötykäytölle ja varastoinnille. Suurin arvonlisäys saatiin skenaarioissa, joissa kaikki hiilidioksidi jalostettiin tuotteiksi. Toisaalta näissä skenaarioissa tarvittiin myös suurimmat kumulatiiviset investoinnit, yli 35 miljardia euroa vuoteen 2040 mennessä ja vuotuinen sähkönkulutus pelkästään BECCU-ratkaisuihin nousi yli 200 TWh vuodessa (Arasto ym.

2024). Hiilidioksidin varastointiin keskittyvissä skenaarioissa arvonlisäys jäi merkittävästi pienemmäksi, mutta myös investointitarpeet ja erityisesti sähkönkulutus olivat alhaisemmat. LUT-yliopisto on arvioinut, että yksinomaan Euroopassa teoreettinen metanolin kysyntä olisi 50 Mt vuonna 2030 ja 424 Mt vuonna 2050 (Ruokonen ym. 2026). Tätä vastaava hiilidioksidin tarve olisi 86–726 MtCO₂ ja metanoliin tarvittavan vedyn tuottaminen vaatisi 618–5037 TWh uusiutuvaa sähköä. Selvityksessä arvioidulla uusiutuvan metanolin hinnalla, 800 €/tMeOH, on kysymys laajasta uudesta liiketoiminta-alueesta.

1.2 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTON, HYÖTYKÄYTÖN JA VARASTOINNIN ROOLI SUOMEN JA EU:N ILMASTOPOLITIIKASSA

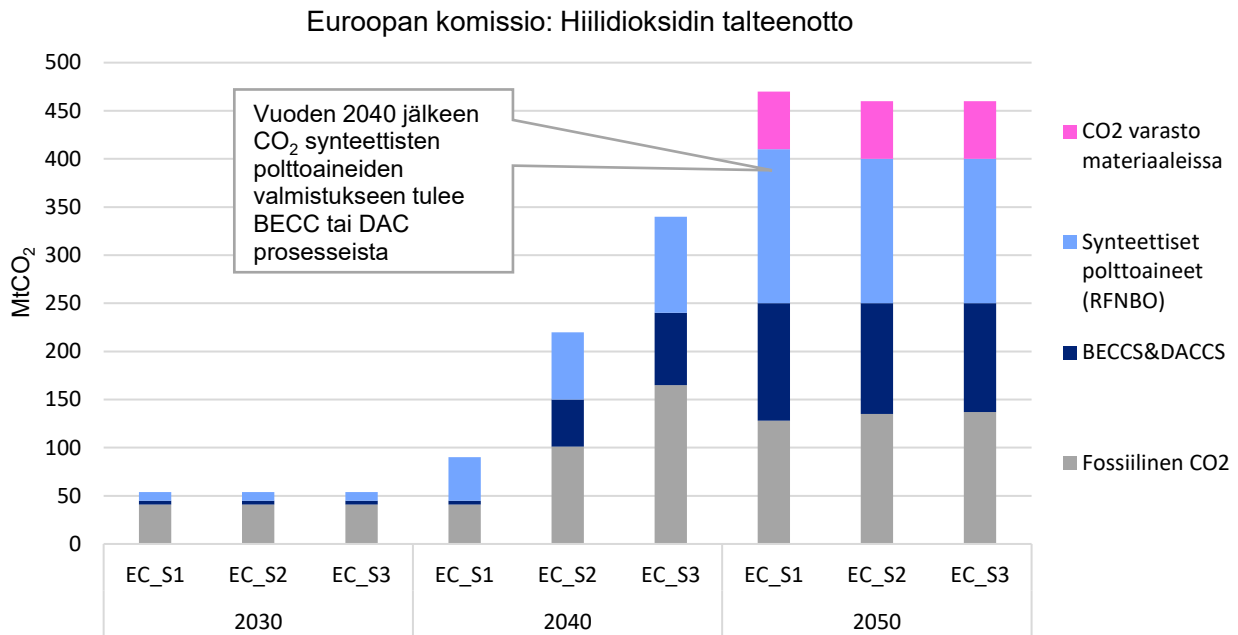
Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi (CCUS, carbon capture, utilisation and storage) nähdään tärkeänä osana sekä Suomen että Euroopan unionin (EU) ilmastotoimia matkalla kohti hiilineutraaliutta ja -negatiivisuutta. Hiilidioksidin talteenotolla tarkoitetaan teknologioita, joilla hiilidioksidia otetaan talteen pistemäisistä päästölähteistä tai suoraan ilmakehästä. Jos fossiilista hiilidioksidia otetaan talteen ja varastoidaan pysyvästi geologisiin muodostelmiin, saavutetaan päästövähennyksiä, kun ilmakehään pääsevän hiilidioksidin määrä pienenee (CCS). Kestävään bioenergian tuotantoon yhdistetty hiilidioksidin talteenotto ja pysyvä varastointi (BECCS) sekä hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä ja pysyvä varastointi (DACCS) mahdollistavat hiilidioksidin pysyvän poiston ilmakehästä, eli niin sanotut teknologiset nielut tai negatiiviset päästöt. Tämä on tarpeen kestävän nettonollatavoitteen saavuttamiseksi (IPCC 2023, ESABCC 2025, Allen ym. 2024). Mikäli talteenotettu hiilidioksidi hyötykäytetään (CCU), siitä voidaan valmistaa esimerkiksi kemikaaleja, liikenne- tai lentopolttoaineita, muoveja, keinokuituja tai muita teollisuustuotteita. Tällöin ilmastohyöty riippuu siitä, missä määrin CCU-tuotteet korvaavat suurempipäästöisiä vaihtoehtoja, kuten fossiilisia polttoaineita tai fossiilisista raaka-aineista valmistettuja kemikaaleja ja muoveja, joiden vähähiilistäminen on myös tarpeen. Hiilidioksidin hyötykäyttöön tarvitaan lisäksi vetyä, jonka valmistaminen vaatii merkittäviä määriä energiaa. Myös hiilidioksidin talteenotto kuluttaa energiaa. Tässä raportissa keskitytään bioperäisen hiilidioksidin hyötykäyttöön (BECCU) ja varastointiin (BECCS).

Suomessa bioperäiset hiilidioksidipäästöt ovat yhteensä noin 44 Mt vuodessa, joista noin 28 Mt syntyy yli 0,1 Mt vuodessa päästävissä metsäteollisuuden sekä bioenergian tuotantolaitoksissa (kuva 1) (Kujanpää ym. 2024). Petteri Orpon hallitusohjelmassa (Valtioneuvosto 2023) on tunnistettu Suomen suuri potentiaali bioperäisen hiilidioksidin varastoinnille ja hyötykäytölle. Hallitusohjelman kirjausten pohjalta on vuoden 2026 alussa järjestetty 90 M€ tarjouskilpailu bioperäisen hiilidioksidin talteenottoprojektien tukemiseksi (TEM 2025a). Myös pitkän aikavälin ilmastosuunnitelmassa (TEM 2025b) CCUS-ratkaisujen rooli on tunnistettu. Suunnitelman taustaksi tehdyssä KEITO WAM -skenaariossa BECCS tuottaa 3,7 Mt poiston vuoteen 2040 mennessä ja 14 Mt vuoteen 2050 mennessä, CCU-ratkaisujen jäädessä pieneen rooliin (Koljonen ym. 2025a). Pitkän aikavälin skenaarioissa (KEITO-LTS) CCUS-ratkaisujen roolia on varioitu tulevaisuusskenaarioiden välillä: hiilidioksidia varastoidaan BECCS:n avulla 0–13 Mt vuodessa, DACCS:n avulla 0–4 Mt vuodessa, ja CCU-ratkaisuihin käytetään enimmillään noin 2 Mt hiilidioksidia vuodessa vuoteen 2050 mennessä (Koljonen ym. 2025b).



Kuva 1: Bioperäisen hiilidioksidin nykyinen potentiaali Suomessa, vihreät ympyrät (kuva muokattu Kujanpää ym. 2024).

Euroopan komissio arvioi CCUS-ratkaisujen roolin erittäin merkittäväksi jo vuoden 2040 ilmastotavoitteiden saavuttamisessa (kuva 2). Komission arvion mukaan 90 %:n nettopäästövähennystavoitteen saavuttaminen edellyttää, että EU:ssa otetaan talteen yhteensä lähes 350 Mt hiilidioksidia vuoteen 2040 mennessä, josta noin 240 Mt varastoitaisiin pysyvästi. BECCS:n ja DACCS:n tuottamien pysyvien poistojen osuus olisi yhteensä 75 Mt vuonna 2040. Merkittävä osuus talteenotetusta hiilidioksidista käytettäisiin synteettisten polttoaineiden tuottamiseen. Vuoteen 2050 mennessä talteenotetun hiilidioksidin määrä nousisi 450 miljoonaan tonniin. (Euroopan komissio 2024a)



Kuva 2: Euroopan komission vuoden 2040-ilmastotavoitteen vaikutusarvioinnissa esitetyt CCUS-määrät. EC_S1, EC_S2, EC_S3 esittävät komission mallintamia skenaarioita, joista S3 saavuttaa 90 % nettopäästövähennystavoitteen 2040. (Euroopan komissio 2024a)

CCUS-ratkaisut ovat toistaiseksi kalliita, ja markkinoiden käynnistyminen edellyttää sääntelyä ja ohjauskeinoja. EU:ssa CCUS-politiikkatoimet ovat valmistelussa, eikä toistaiseksi ole käytössä unionin laajuisia kannusteita tai velvoitteita esimerkiksi BECCS-ratkaisujen edistämiseksi. BECCS:n mahdollisesta liittämisestä EU:n päästökauppaan on tarkoitus päättää kuitenkin jo vuonna 2026. Sen sijaan esimerkiksi CCU-polttoaineille on jo asetettu tavoitteita RED-direktiivissä (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2018, 2023a) sekä RefuelEU Aviation -asetuksessa (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023b). EU:n ohjauskeinoja on tarkasteltu lähemmin Ilmastopaneelin raportissa EU:n 2040 ilmastoarkkitehtuurista (Ahlvik ym. 2026) ja koottu liitteeseen 1.

Haasteena komission skenaarioissa esitettyjen CCUS-määrien saavuttamiseksi on uusien talteenotto- ja höyrykäyttöteknologioiden nopea skaalaaminen teolliseen mittakaavaan, CCUS-ratkaisujen suuri energiantarve sekä hiilidioksidin kuljetus- ja varastointilogistiikan kehittäminen. Lisäksi tarvittavien investointien suuruus voi olla kymmeniä miljardeja euroja (esim. ESABCC 2025, Tumara ym. 2025, Trompoukis ym. 2025).

1.3 METSIEN HYÖDYNTÄMISEN KYTKÖS ILMASTOTAVOITTEISIIN JA -VELVOITTEISIIN

EU:n ja Suomen ilmastopolitiikka perustuu nettopäästövähennysperiaatteeseen, jonka mukaisesti fossiilisten ja prosessiperäisten päästöjen lisäksi maankäyttösektorin nettovaikutus huomioidaan vuotuisissa kokonaispäästöissä. Maankäyttösektorilla seurataan sekä päästöjä että hiilinieluja, ja niiden erotus raportoidaan vuosittain nettotuloksena. Jos metsät ja puutuotteet sitovat enemmän hiiltä kuin metsien maaperä ja muut maankäyttöluokat (viljelysmaat, kosteikot, ruohikkoalueet ja rakennettu ympäristö) vapauttavat, maankäyttösektori on kyseisenä vuonna nettonielu. Tällöin se vaikuttaa ilmastoa viilentävästi.

EU:n nykyinen ilmastoarkkitehtuuri rakentuu kolmesta osa-alueesta: päästökaupparektorista (ETS), taakanjakosektorista ja maankäyttösektorista (LULUCF). Päästökaupparektorin piiriin kuuluvilla teollisuus- ja energiantuotantolaitoksilla on EU-tasoinen, yhteinen päästökatto. Sen sijaan taakanjakosektorilla ja maankäyttösektorilla kullekin jäsenmaalle on sovittu omat yhteisesti määritellyt velvoitteet vuoteen 2030 asti. EU:n vuoden 2030 jälkeisen ilmastoarkkitehtuurin yksityiskohdat ovat vielä valmistelussa. EU, ja Suomi sen jäsenenä, on kuitenkin sitoutunut vuodelle 2040 asetettuun 90 prosentin nettopäästövähennystavoitteeseen. Tämänhetkisen tiedon perusteella maankäyttösektorin toimet ovat siten jatkossakin keskeinen osa EU:n ilmastopolitiikkaa. Toimet, jotka vahvistavat maankäyttösektorin nettoielua, tukevat ilmastomuutoksen hillintää. Ne voivat myös luoda taloudellista arvoa, esimerkiksi CRCF-hiilenpoistomekanismin (Euroopan komissio 2024b) mahdollisesti luoman markkinan kautta.

Suomen kansallisen ilmastolain mukainen hiilineutraaliustavoite vuodelle 2035 ja hiilinegatiivisuus sen jälkeen edellyttävät riittävän suuria metsä- ja puutuotenieluja sekä teknologisia nieluja. Tämä johtuu siitä, että fossiilisia päästöjä ei saada vähennettyä nollaan edes vuoteen 2050 mennessä, ja muun maankäyttösektorin kuin metsien ja puutuotteiden ennakoitaan olevan Suomessa vielä 2040-luvun alussa päästölähde (Koljonen ym. 2025b).

Puun hyödyntäminen voi muodostaa puutuotenielen (HWP), jos Suomessa nykyisin ja aiempina vuosina valmistettujen puutuotteiden hiilivarasto kasvaa kyseisenä laskentavuonna. Käytännössä puutuotenieliä kasvattavat ensisijaisesti pitkäikäiset puutuotteet, joiden puoliutumisaika on selvästi yli 10 vuotta. Suomessa valmistettujen puutuotteiden hiilivaraston kasvusta syntyvä nettoielu kirjataan Suomen hyväksi. Vastaavasti tilanteessa, jossa Suomessa valmistettujen puutuotteiden hiilivarasto pienenee, muutos näkyy ilmastotavoitteiden ja -velvoitteiden näkökulmasta nettopäästönä.

Puutuotenielijien laskentaperiaate eroaa puutuotteiden käytönaikaisista korvausvaikutuksista. Kun puutuotteilla korvataan fossiilisia materiaaleja tai polttoaineita, korvaushyöty kohdistuu sen maan kasvihuonekaasuintentaarioon, jossa tuote käytetään ja jossa korvaus käytännössä tapahtuu. Näitä edellä kuvattuja laskentaperiaatteita sovelletaan ilmastolain tavoitteiden toteutumisen arvioinnissa, ja tämänhetkisen käsityksen mukaan niitä sovelletaan myös EU:n ilmastopolitiikassa maakohtaisten velvoitteiden seurannassa. Vastaava tuotenieli voidaan ajatella syntyvän myös bioperäisestä hiilidioksidista valmistetuille, pitkäikäisille BECCU-tuotteille, mutta tätä ei toistaiseksi huomioida inventaariolaskennassa (IPCC 2026).

BECCS:n ilmastohyötyjen kirjaaminen voi tulevaisuudessa kohdistua päästökaupparektorille (Ahlvik ym. 2026). Tällöin BECCS:stä saatavat hyödyt eivät välttämättä auttaisi täyttämään mahdollista vuoden 2030 jälkeistä maankäyttösektorin maakohtaista EU-velvoitetta. Kansallisessa tarkastelussa BECCS-hyödyt voidaan kuitenkin lukea Suomen ilmastolain mukaisten tavoitteiden hyväksi. BECCU-tuotteiden käytönaikaiset hyödyt näkyvät esimerkiksi liikennesektorilla, jos BECCU-polttoaineet korvaavat fossiilisia polttoaineita kotimaassa. Siltä osin kuin tuotteet viedään ulkomaille, BECCU-tuotteiden hyödyt eivät kerry Suomen ilmastolain tavoitteiden ja EU-velvoitteiden hyväksi. Sen sijaan puutuotteiden valmistuksen päästöt ja Suomessa hankitun puuraaka-aineen vaikutukset metsien hiilitaseeseen maankäyttösektorilla sisältyvät Suomen ilmastotavoitteisiin ja -velvoitteisiin.

Edellä kuvattujen puun hyödyntämisen ja ilmastopolitiikan välisen kytkennän perusteella ei ole yhdentekevää, millaiseksi puun käyttö ja jalostus Suomessa muodostuvat vuoteen 2040 mennessä. Korkeamman jalostusarvon puutuotteiden ja bioperäisen hiilidioksidin hyötykäyttö voivat parantaa materiaalitehokkuutta. Tällä on olennainen yhteys tulevien ilmastotavoitteiden saavuttamiseen ja EU-velvoitteiden täyttämiseen. Kun samasta biomassamäärästä voidaan tuottaa enemmän arvonlisäystä, voidaan periaatteessa vähentää painetta hakkuumäärien kasvattamiseen. Suomen ilmastopaneeli on todennut, että hakkuumäärillä on Suomessa suora vaikutus metsien hiilinielun suuruuteen ja että

ilmastolain mukaisen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen vaatisi hakkuiden vähentämistä (Suomen ilmastopaneeli 2025, Seppälä ym. 2026). Toisaalta, jos BECCUS-ratkaisujen käyttöönotto ja bioperäisen hiilidioksidin kysynnän kasvu johtaisivat metsien hiilitaseen heikennykseen Suomen ilmastotavoitteiden ja -velvoitteiden saavuttamisen näkökulmasta, voisivat BECCUS-ratkaisujen ilmastohyödyt jäädä arvioituja pienemmiksi. Samalla heikko maankäyttösektorin nettonielu voi muodostaa riskin bioperäisen hiilidioksidin kestävyydelle raaka-aineena, mikä voi heijastua esimerkiksi hankkeiden hyväksyttävyyteen ja investointirahoituksen saatavuuteen. Tämän vuoksi kokonaisvaikutusten ymmärtäminen on keskeistä BECCUS-ratkaisujen ilmastovaikutuksia arvioitaessa.

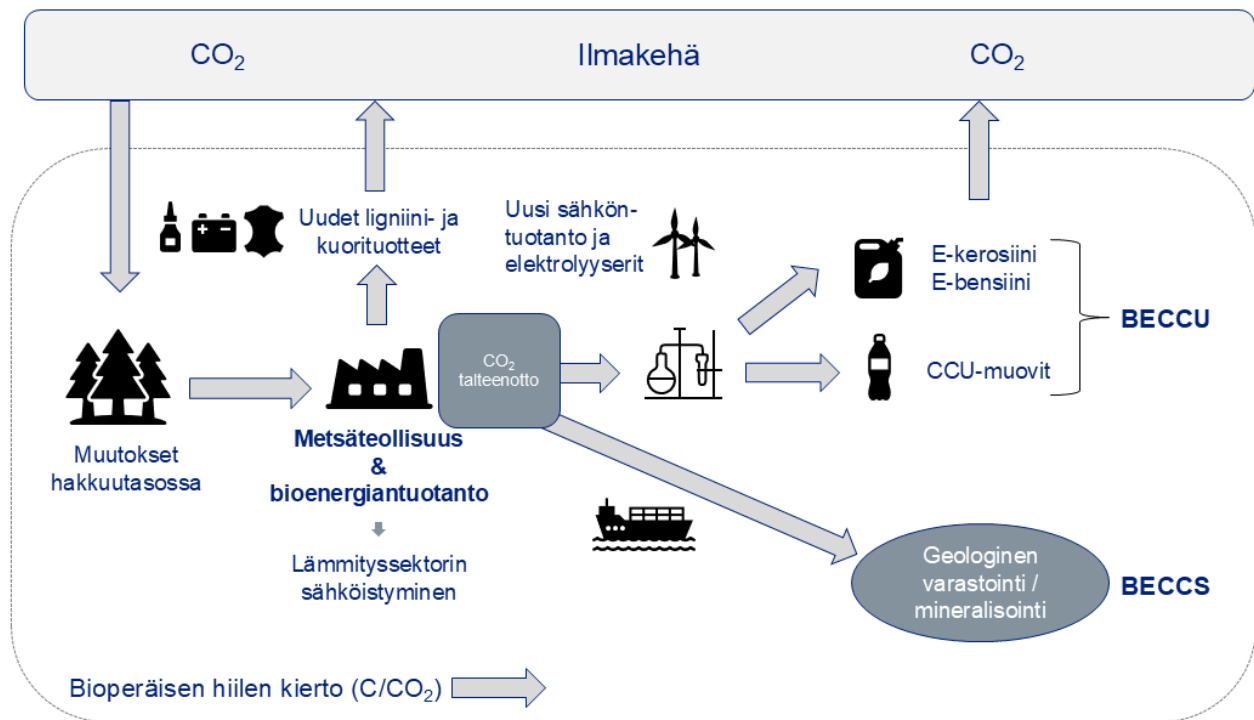
BECCUS-ratkaisujen eteneminen ja niille kysynnän syntyminen kytkeytyvät tiiviisti ilmastopolitiikan kunnianhimon tasoon. BECCUS-ratkaisuille syntyy kysyntää vain, kun ilmastomuutoksen hillinnän ohjaus on riittävän vahvaa ja esimerkiksi EU-tasolla luodaan tehokkaita ohjauskeinoja ja velvoitteita hiilidioksidin talteenotolle, varastoinnille ja hyötykäytölle. Samanaikaisesti kunnianhimoiseen ilmastopolitiikkaan sisältyy tavoite maankäyttösektorin nettonielun vahvistamisesta. Näin ollen sekä BECCUS-ratkaisujen käyttöönottoa että metsien hiilinielun vahvistamista tulisi edistää rinnakkain (ESABCC 2025).

1.4 TYÖN TAVOITTEET

Tässä työssä tarkastellaan vuoteen 2040 ulottuvia skenaarioita, joissa Suomessa voidaan luoda taloudellista arvonlisää puun materiaalitehokkaamman käytön, metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden sekä bioperäisen hiilidioksidin talteenoton, hyötykäytön ja varastoinnin avulla (kuva 3). Korkeamman arvonlisän metsäteollisuustuotteina tarkastellaan tällä hetkellä polttoon päätyvien sivuvirtojen hyödyntämistä: mustalipeän ligniiniä sekä puun kuoren sisältämiä tanniineja. Muut metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteet sekä mekaanisen metsäteollisuuden ratkaisut, kuten puurakentamisen edistäminen, jätetään tarkastelun ulkopuolelle, ja huomio kohdistetaan sivutuotevirtoihin, jotka kytkeytyvät samalla bioperäisen hiilidioksidin saatavuuteen.

Ligniinistä tuotetaan skenaarioissa kovahiiltä (akkusovellukset) sekä liimasovelluksia (esim. rakennusliimat). Kuoresta tuotetaan tanniinituotteita, joita voidaan käyttää esimerkiksi nahan käsittelyssä. Hiilidioksidin hyötykäytön ja varastoinnin ratkaisuina tarkastellaan BECCU-polttoaineita (e-kerosiini ja e-bensiini) ja -muoveja (polykarbonaattipolyolit) sekä hiilidioksidin pysyvää varastointia geologisiin muodostelmiin tai mineralisointia kotimaisiin kaivosjätteisiin (BECCS).

Ligniinin ja kuoren osittainen ohjaaminen pois poltosta korkeamman jalostusasteen tuotteisiin vaikuttaa bioperäisen hiilidioksidin virtoihin Suomessa. Lisäksi bioperäisen hiilidioksidin määrä voi vähentyä energijärjestelmän sähköistyessä, kun esimerkiksi kaukolämpösektorilla sähkökattilat ja hukkalämpöjen hyödyntäminen lämpöpumppujen avulla vähentävät puun polton tarvetta (Hiltunen ym. 2025). Tässä työssä jatketaan ja tarkennetaan VTT:n ja Luken aiempaa bioperäisen hiilidioksidin hyötykäytön ja varastoinnin arvonlisätarkastelua (Arasto ym. 2024) laajentamalla tarkastelu tulevaisuudessa saatavilla olevan bioperäisen hiilidioksidin määrään. Skenaarioissa tarkastellaan hiilidioksidivirtojen ja bioenergiantuotannon muutoksia, kun puuta ja sivuvirtoja hyödynnetään nykyistä tehokkaammin tuotteina ja kun lämmityssektorin sähköistyminen vähentää puun energiakäyttöä.



Kuva 3: Tässä raportissa tarkasteltava järjestelmä sisältäen metsäteollisuuden arvonlisätuotteet sekä hiilidioksidin talteenoton, hyötykäytön ja varastoinnin teknologiat (BECCUS). Kuva muokattu lähteestä Koponen & Kujanpää (2025).

Tarkastelun kohteena ovat (i) bioperäisen hiilidioksidin saatavuus tuotteisiin ja varastoitavaksi yli 0,1 Mt vuodessa päästävistä metsäteollisuuden ja bioenergian tuotantolaitoksista, (ii) uusien tuotteiden määrät, (iii) sähköntuotannon lisätarve sekä (iv) uusilla tuotteilla saavutettava arvonlisäys ja sen edellyttämät investoinnit. Lisäksi arvioidaan skenaarioiden kansantalous- ja ilmastovaikutuksia. Maankäyttösektorin kytkennän merkityksen ymmärtämiseksi näitä tarkastellaan suhteessa kahteen eri hakkuutasoon: nykytilaa vastaavat runkopuuhakkuut (74 milj. m³/v) sekä alemmat runkopuuhakkuut (64 milj. m³/v). Lisäksi tarkastellaan, miten korkeamman jalostusarvon tuotteiden sekä hiilidioksidin hyötykäytön ja varastoinnin edellyttämät investoinnit ja niiden tuottama arvonlisäys muuttuvat eri teknologiavaihtoehdoilla ja hakkuutasoilla. Tarkastelu tehdään tilastopohjaisella tasemallilla, joka pohjautuu puun käyttöön ja bioenergiantuotantoon Suomessa vuonna 2024. Tasemallin avulla arvioidaan arvoketjujen arvonlisäpotentiaalia. Kansantalousvaikutuksia arvioidaan ENVIMATscen-mallinnuksella, joka huomioi tuotannontekijöiden rajallisuuden ja uudelleenkehentymisen kansantaloudessa.

Tulokset esitetään varioimalla saatavilla olevan bioperäisen hiilidioksidin käyttöastetta siten, että käytettäväksi tai varastoitavaksi oletetaan 20 %, 50 % tai 100 % saatavilla olevasta bioperäisestä hiilidioksidista. Tavoitteena on hahmottaa bioperäiseen hiilidioksidin perustuvien CCUS-ratkaisujen suuruusluokkia, mahdollisuuksia ja rajoitteita Suomessa. Laskennan kannalta keskeisten lähtöoletusten vaikutusta tarkastellaan herkkyyštarkasteluilla.

Tilastopohjainen tarkastelu tehdään kokonaistaseena Suomelle. Siinä ei arvioida investointien tai logististen ketjujen kannattavuutta yksittäisen toimijan tai teollisuuslaitoksen näkökulmasta. Oletuksena on, että korkeamman arvonlisän metsäteollisuustuotteiden ja CCUS-ratkaisujen markkinat kehittyvät politiikkaohjauksen seurauksena siten, että tuotteista maksetaan tarkastelussa oletetut hinnat, jolloin arvoketjut ovat kannattavia. Mallin tilastopohjaisuus edellyttää karkeita yksinkertaistuksia erityisesti

energiantuotannon osalta, mutta samalla se mahdollistaa oletusten läpinäkyvyyden. Työn tavoitteena ei ole määrittää biomassan optimaalisia käyttökohteita Suomessa, vaan tarkastella mahdollisia ratkaisupolkuja. Tarkastelun rajaukset on kuvattu tarkemmin luvussa 2.1.9 ja liitteessä 3.

Raportin rakenne on seuraava: Luvussa 2 esitellään mallinnuksen lähtökohdat, lähtötiedot, tarkasteltavat skenaariot sekä mallin toiminta. Lisäksi kuvataan arvonlisäystarcastelun, ENVIMATscen-
mallilla tehtävän kansantaloustarkastelun ja ilmastovaikutusarvion periaatteet. Luvussa 3 esitetään laskennan tulokset ja herkkyystarkastelut, luvussa 4 keskustellaan tuloksista ja luvussa 5 esitetään johtopäätökset.

2 AINEISTOT JA MENETELMÄT

2.1 TILASTOPOHJAISEN MALLINNUKSEN LÄHTÖKOHDAT JA TARKASTELTAVAT SKENAARIOT

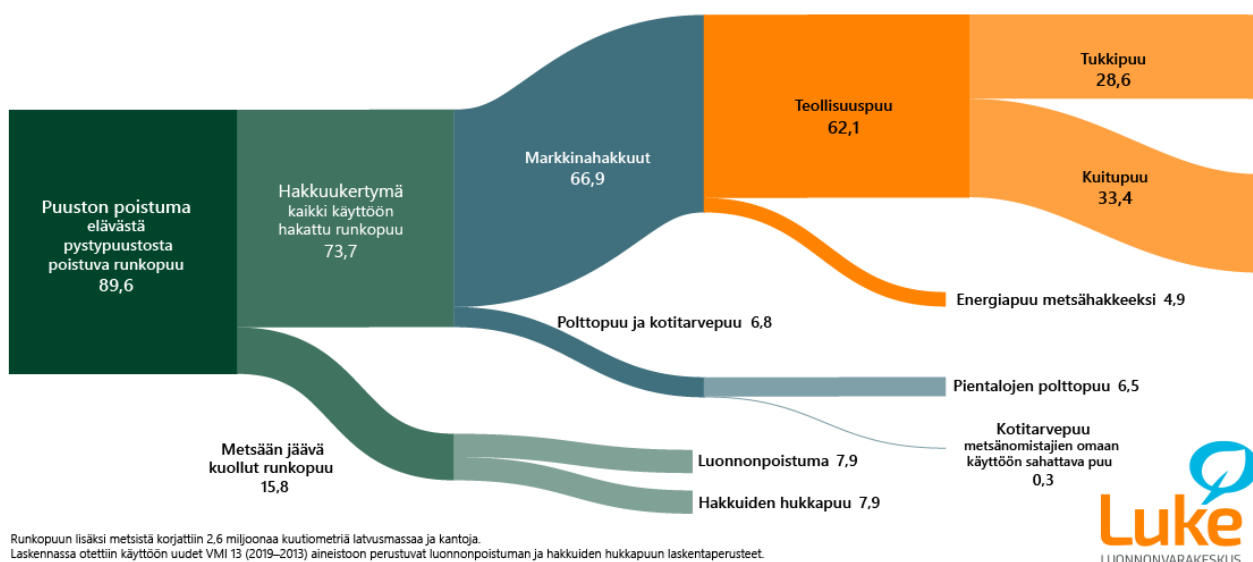
Tässä luvussa esitellään tilastopohjaisen mallinnuksen päälähtökohdat sekä työssä tarkasteltavat skenaariot. Mallin tarkempi kuvaus esitetään tämän raportin liitteissä 2 ja 3 sekä Ilmastopaneelin verkkosivuilla erikseen julkaistussa lisämateriaalissa¹.

2.1.1 Tarkasteltavat puu- ja hiilidioksidivirrat

Skenaarioiden lähtökohtana käytetään vuoden 2024 runkopuuhakkuiden tasoa, noin 74 milj. m³ (Luonnonvarakeskus 2024a), sekä puuvirtoja. Kuvassa 4 esitetään runkopuun jakautuminen eri käyttökohteisiin vuonna 2024 (Luonnonvarakeskus 2024a). Puun käyttö oletetaan jakautuvaksi eri käyttökohteisiin samassa suhteessa kaikissa raportin skenaarioissa, myös alemman hakkuutason (64 milj. m³) skenaarioissa. Metsäteollisuuden rakenteeseen ei siten oleteta muutoksia.

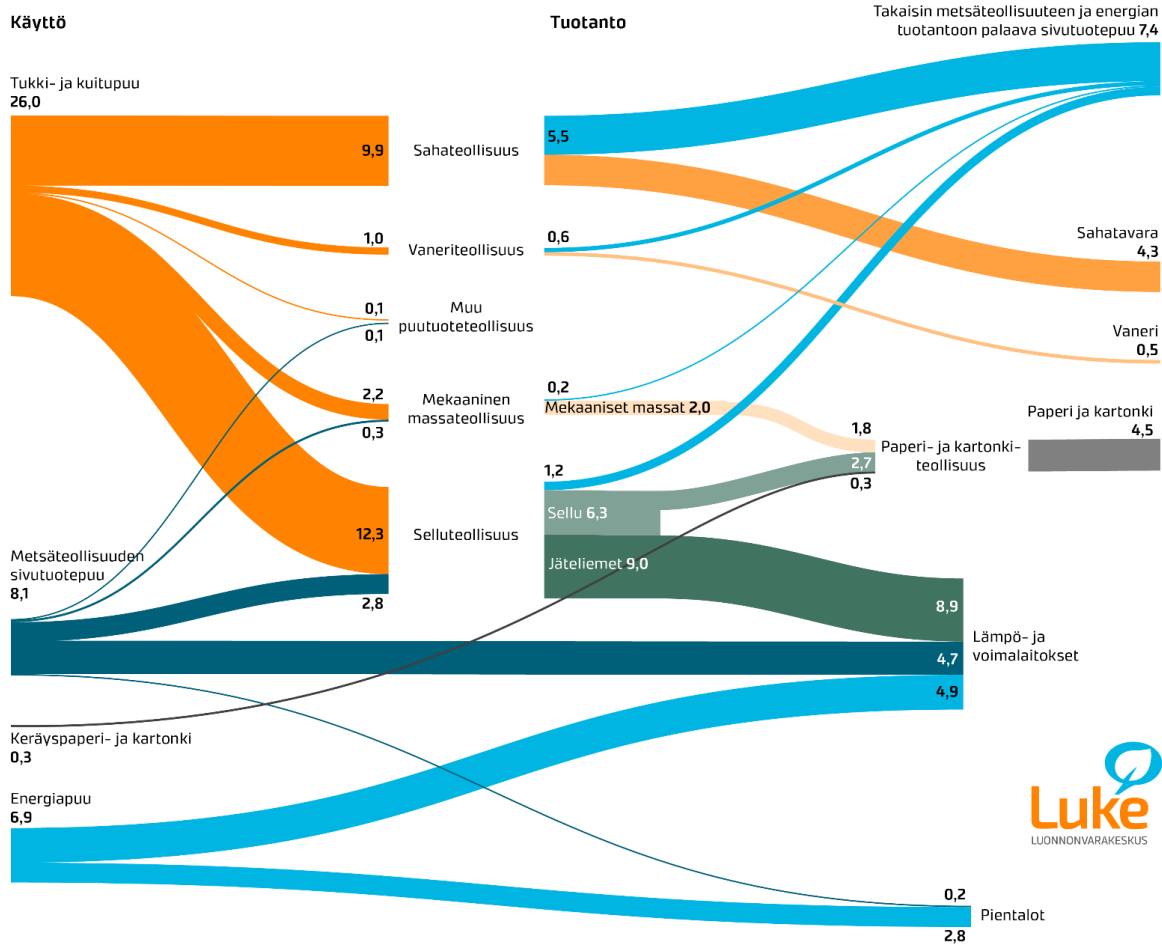
Mallin sisältämät puuvirrat kattavat raaka-ainepuolella hakkuukertymän ja hakkuutähteet, kierrätyspuun, runko-, kuitu- ja tukkipuun sekä hakkeen tuonnin ja viennin. Vuoden 2024 hakkukertymästä havupuun osuus oli 79,1 % (mäntyä 31,6 milj. m³ ja kuusta 26,8 milj. m³) ja lehtipuun osuus oli 20,9 % (15,4 milj. m³). (Luonnonvarakeskus 2024a)

Hakkeen ja sivutuotepuun virtoja saha-, massa- ja energiateollisuuden välillä täydennetään vuoden 2023 tiedoilla (Luonnonvarakeskus 2024d), sillä vuoden 2024 osalta metsäteollisuuden käyttötasetta ei ollut saatavilla. Nämä puuvirrat esitetään kuvassa 5.



Kuva 4: Runkopuun hakkuukertymä ja puuston poistuma vuonna 2024 (milj.m³). (Luonnonvarakeskus 2024a)

¹ Lisämateriaali ladattavissa Ilmastopaneelin verkkosivuilla: https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2026/06/Lisamateriaali_BioCO2tulevaisuus.xlsx



Kuva 5: Metsäteollisuuden käyttötase vuonna 2023 (milj. tonnia puuta kuiva-aineena). (Luonnonvarakeskus 2024d)

Työssä tarkastellaan sellutehtaisiin yhdistettäviä uusia teknologioita, kuten ligniinin erotusta, kuoren jalostusta ja hiilidioksidin talteenottoa. Jotta voidaan mallintaa näiden vaikutuksia sellutehtaan energiataseeseen ja sähköntuotantoon, tarvitaan tarkempia lähtötietoja koskien muun muassa sellunkeiton mustalipeän tuotantoa, koostumusta ja lämpöarvoa sekä höyryn- ja sähköntuotantoa sellutehtaalla. Nämä nykyiseen sellutehtaan toimintaan liittyvät lähtötiedot saatiin aiemmasta sellutehdasmallista (Kangas ym. 2014), jota on käytetty pohjana muun muassa IEAGHG:lle tehdystä mallinnuksessa hiilidioksidin talteenotosta sellutehtailla (Onarheim ym. 2016) ja tässä työssä sovelletussa ligniinin erotusprosessin mallinnuksessa (Sorsamäki ym. 2025). Kuoren ja puupolttoaineiden ominaisuuksia koskevia lähtötietoja hankittiin Puupolttoaineiden laatuohjeesta (Alakangas & Impola 2013) sekä vuoden 2024 polttoaineluokituksesta (Tilastokeskus 2024a).

Laitosten bioperäiset hiilidioksidipäästöt lasketaan laitoksissa käytettävien materiaalivirtojen ja päästökertoimien avulla. Työssä eritellään, kuinka suuri osa bioperäisestä hiilidioksidista syntyy eri kokoisista ja tyyppisistä päästölähteistä, jotta voidaan ottaa huomioon hiilidioksidin talteenottoteknologian skaalautuvuus investointikustannuksissa sekä mahdollisuudet lämpöintegrointien osalta. Valitut laituskategoriat esitetään taulukossa 1. Jotta bioperäiset päästöt vastaavat tilastoituja hiilidioksidipäästöjä ja laituskategorioiden keskinäiset osuudet voidaan määrittää, lähtötietoina käytetään EU:n päästörekiesteriä vuodelta 2022 (EEA 2023). Päästörekiesterin tietoja on lisäksi korjattu ja päivitetty vastaamaan tekijöiden ajantasaisinta käsitystä vuoden 2024 teollisuuden bioperäisen hiilidioksidin päästölähteistä.

Hiilidioksidipäästöt ovat kussakin laitoskategoriassa samaa suuruusluokkaa, noin 9–10 Mt bioCO₂/v. Laitosten lukumäärät ovat sen sijaan selvästi erilaisia: kolme laitosta kategoriassa 1, yhdeksän laitosta kategoriassa 2 ja 41 laitosta kategoriassa 3. Myös keskimääräiset laitoskohtaiset päästömäärät vaihtelevat merkittävästi: suurissa biotuotetehtaissa (kategoria 1) bioperäiset hiilidioksidipäästöt ovat keskimäärin 3,15 Mt/v, keskiuurissa sellutehtaissa (kategoria 2) 1,07 Mt/v ja kategoriassa 3 vain 0,24 Mt/v. Pienemmän kokoluokan päästölähteet, kuten biokaasulaitokset, jätetään tässä tarkastelun ulkopuolelle. Vuoden 2024 biokaasulaitosten bioperäiset hiilidioksidipäästöt Suomessa olivat noin 0,094 Mt vuodessa, mutta voivat kasvaa tulevaisuudessa jopa 0,4 Mt:iin vuodessa (Winqvist & Hakala 2026).

Taulukko 1: Hiilidioksidin talteenotossa huomioituiden teollisuuden bioperäisten päästöjen laitoskategoriat.

Laitoskategoria	Laitosten lukumäärä	BioCO ₂ -päästöt, Mt/v	Keskimääräinen bioCO ₂ päästö, Mt/v
1) suuret biotuotetehtaat	3	9,45	3,15
2) selluteollisuus, keskiluokka	9	9,63	1,07
3) CHP, lämpölaitokset, paperin- ja kartongintuotanto	41	9,82	0,24
3a) CHP, lämpölaitokset	33	8,4	
3b) paperi, kartonki, mekaaninen ja puolikemiallinen massa	8	1,4	

2.1.2 Korkeamman arvonlisän metsäteollisuustuotteet

Metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteina tarkastellaan mustalipeästä erotettavia ligniiniä ja siitä jalostettavia tuotteita: akkukäyttöön ja hiilikuitusovelluksiin soveltuvaa kovahiiltä sekä liimasovelluksia, kuten rakennusliimoja. Lisäksi tarkastellaan puun kuoren jalostamista tanniinituotteiksi, esimerkiksi nahan käsittelyä varten.

Ligniini on uusiutuva aromaattisen hiilen lähde, jolla on merkittävä potentiaali fossiilipohjaisten materiaalien korvaajana materiaalivalmistuksessa. Suomessa sellunkeiton sivuvirtana syntyy vuosittain noin neljä miljoonaa tonnia ligniiniä, josta yli 95 % hyödynnetään edelleen energiantuotannossa. Ligniinin nykyistä suurempi talteenotto olisi kuitenkin teknisesti mahdollista ilman, että se vaarantaisi energiantuotannon tarpeita, mikä korostaa sen huomattavaa jalostuspotentiaalia erityisesti korkean arvonlisän sovelluksissa.

Ligniiniä voidaan ottaa talteen sellutehtaiden mustalipeästä erottamalla. Talteenotto voidaan toteuttaa esimerkiksi saostamalla, jolloin mustalipeän pH:ta lasketaan ensin laimealla hapolla, kuten hiilihapolla, ja tämän jälkeen väkevällä hapolla, esimerkiksi rikkihapolla. Suomessa ligniinin teollista talteenottoa on aiemmin toteutettu Sunilan tehtaalla, mutta tehtaan sulkemisen myötä myös ligniinin talteenotto päättyi (Eloranta-Jokela 2023). Helmikuussa 2026 Äänekoskella käynnistyi Metsä Groupin koetehdas, jonka kahden tonnin ligniinikapasiteetti mahdollistaa teollisten loppusovellusten laajamittaisen testauksen (Metsä Group 2026). Tässä työssä ligniinin talteenotto perustuu SmartRecovery-projektissa (Kalliola ym. 2025) mallinnettuun prosessiin (Sorsamäki ym. 2025), jossa ligniini erotetaan ultrasuodatuksella, pestään ja spray-kuivataan. Prosessin syötteinä ovat mustalipeä, sähkö ja höyry.

Prosessin tuotteena saadaan ligniinituote, jonka kuiva-ainepitoisuus on 95 % ja joka sisältää epäpuhtauksina sellunkeittokemikaaleja. Tuotetta voidaan pitää välituotteena, jonka jatkojalostaminen lopputuotteiksi kovahiilisovelluksiin (akut) sekä liimasovelluksiin (rakennusliimat) edellyttää jatkojalostusvaiheita, joita ei tässä työssä tarkastella. Ligniinin talteenoton seurauksena sellutehtaan kierrosta poistuu sellunkeittokemikaaleja, kuten natriumsulfaattia (Na_2SO_4). Tilalle hankitaan natriumhydroksidia, koska sellutehtailla kertyy tyypillisesti ylimääräistä rikkiä. Vaikka natriumhydroksidi ei ole varsinaisen ligniinin erotusprosessin syöte, sen lisätarve sellunkeitossa on huomioitu ligniinin erotuksen epäsuorana vaikutuksena. Ligniinin erotuksella on myös merkittävä vaikutus energiataseeseen: soodakattilalle päätyvän polttoaineen määrä vähenee, mikä pienentää sellutehtaan sähköntuotantoa ja bioperäisten hiilidioksidipäästöjen määrää. Tämän työn tarkasteluissa ligniiniä erotetaan vain siinä määrin, että sellutehdas säilyy höyryn suhteen omavaraisena, vaikka höyryä käytetään myös hiilidioksidin talteenottoon. Erotetun ligniinin määrä vastaa 6,5 m-% soodakattilaan menevän mustalipeän kuiva-ainepitoisuudesta.

Havupuun kuori on metsäteollisuuden merkittävä sivuvirta, jolla on huomattavaa arvonlisäpotentiaalia suoran energiakäytön lisäksi. Kuori sisältää kondensoituneita tanniineja tyypillisesti kymmeniä milligrammoja grammaa kuivamassaa kohti. Tällä hetkellä yhdisteet päätyvät kuitenkin useimmiten energiakäyttöön poltettaviksi, vaikka ne voitaisiin erottaa korkean lisäarvon polyfenolisiksi kemikaaleiksi. Tanniinit kykenevät ristisilloittamaan proteiineja, kuten nahan kollageenia, sekä toimimaan antioksidanteina, antimikrobisina aineina ja liimoina (Pizzi 2019). Ne soveltuvat myös biopohjaisten polymeerien ja komposiittien valmistukseen. Kondensoituneilla tanniineilla on lisäksi antibakteerista ja antiviraalista aktiivisuutta, mikä laajentaa niiden käyttömahdollisuuksia (Pizzi 2021). Näin ollen tanniinit eivät ole vain korvaava kemikaali, vaan monikäyttöinen biopohjainen molekyyli.

Kuoren jalostusta varten mallinnetaan yhteinen jalostuslaitos, jossa sellutehtaiden ja sahojen kuori jalostetaan tanniinituotteiksi. Laitos integroidaan energiankäytön osalta sellutehtaaseen. Mekaanisen ja puolikemiallisen massateollisuuden kuori jätetään kaikissa skenaarioissa tehtaiden omaan käyttöön. Tarkasteltuna jalostusprosessina on kuumavesiuutto, jonka tuotteena syntyy tanniinivälituotetta nahankäsittelyteollisuuden käyttöön (Niiranen 2025). Mallinnetun prosessin syötteinä ovat kuori, sähkö ja lämpö sekä yhdistettynä virtana uuttokemikaalit ja entsyymit. Tanniinituotteen oletetaan korvaavan kromiyhdisteisiin perustuvaa nahankäsittelyä. Teknisesti tanniinit voivat korvata kromisuoloja parkituksessa sitoutumalla kollageeniin polyfenoli–proteiini-vuorovaikutusten kautta ja tuottamalla näin jämäkkää ja kestäväää nahkaa. Tällä hetkellä tanniiniparkittu nahka on usein jäykempää ja rakenteeltaan vahvempaa sekä vanhenee sille ominaisella patinalla. Havupuutanniinien keskeinen etu liittyy niiden ympäristö- ja ilmastovaikutuksiin. Koska kuusen tanniinit eivät sisällä raskasmetalleja, niiden käyttö ei aiheuta kromikontaminaatiota. (Pagliaro ym. 2021)

2.1.3 Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi

Mallissa tarkastellaan metsäteollisuuden ja energiantuotannon bioperäisten hiilidioksidipäästöjen talteenottoa lähteistä, joiden vuotuinen päästömäärä on yli 0,1 Mt bio- CO_2 . Investointien skaalauksen arviointia varten päästölähteet jaetaan kolmeen ryhmään: suuriin biotuotetehtaisiin, keskikokoisiin sellutehtaisiin sekä muihin laitoksiin (Taulukko 1). Hiilidioksidin talteenotto-prosessien syötteinä ovat kaikissa tapauksissa bioperäistä hiilidioksidia sisältävä savukaasu sekä prosessin tarvitsema sähkö ja lämpö. Tuotteina saadaan puhdistettua hiilidioksidia ja CHP-laitosten tapauksessa kaukolämpönä hyödynnettävää hukkalämpöä. Talteenottoteknologiaksi oletetaan kaupallisesti kypsä, kemialliseen absorptioon perustuva amiiniuusioprosessi, ja talteenoton hyötysuhteeksi oletetaan 90 %.

Skenaariosta riippuen talteen otettu hiilidioksidi joko hyödynnetään raaka-aineena tai varastoidaan. BECCU-skenaarioissa oletetaan, että 80 % talteenotetusta hiilidioksidista jalostetaan vedyn kanssa

sähköpolttoaineiksi Fisher-Tropsch-synteesillä, jolla tuotetaan e-kerosiinia ja e-bensiiniä korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Loput 20 % talteenotetusta hiilidioksidista jalostetaan polykarbonaattipolyoleiksi, jotka voivat korvata esimerkiksi fossiilisista raaka-aineista valmistettua muovia rakennuskäyttökohteissa. BECCU-prosessien syöteinä ovat paineistettu ja puhdistettu hiilidioksidi, veden elektrolyysillä valmistettu vety sekä prosessin kuluttama sähkö. Sivutuotteina elektrolyysereissä sekä BECCU-prosesseissa syntyy myös lämpöä. Elektrolyyserilämmön hyötykäyttöä ei tässä erikseen tarkastella, mutta sen ajateltiin toimivan mahdollisena lämmönlähteenä lämpöpumpuille.

BECCS-skenaarioissa 95 % hiilidioksidista varastoidaan geologisesti ulkomailla ja 5 % mineralisoidaan Suomessa. Geologisen varastoinnin syöteinä ovat puhdistettu, paineistettu ja nesteytetty hiilidioksidi, josta kuljetusketjun häviöiden jälkeen tuotteena on pysyvästi varastoitu hiilidioksidi. Tässä työssä mallinnettu hiilidioksidin mineralisointiprosessi perustuu hiilidioksidin varastointiin kaivosalueella hyödyntäen kaivoksen sivuvirtoja. Syöteinä ovat mineraalit, sähkö ja lämpö sekä puhdistettu ja paineistettu hiilidioksidi, ja tuotteena on magnesiumkarbonaattipitoinen sivuvirta, johon hiilidioksidi on varastoitu pysyvästi.

Eri arvoketjujen logistiset tarpeet, kuten hiilidioksidin paineistus, nesteytys, kuljetus ja välivarastointi, voivat poiketa toisistaan merkittävästi riippuen hiilidioksidin käyttökohteesta sekä päästölähteen sijainnista ja sitä ympäröivästä infrastruktuurista. Tässä työssä hiilidioksidin logistiikka päästölähteiltä loppukäyttöön mallinnetaan Suomeen sijoittuvien BECCU- ja BECCS-arvoketjujen osalta siten, että kutakin arvoketjua kohden oletetaan yksi tyypillinen toteutustapa. BECCU-skenaarioissa hiilidioksidin hyötykäyttö oletetaan tapahtuvan päästölähteen välittömässä läheisyydessä, jolloin ei ole tarvetta hiilidioksidin kuljetukselle. Laitoksen yhteyteen oletetaan yhden päivän raaka-ainetarvetta vastaava hiilidioksidin välivarasto. Hiilidioksidi paineistetaan 20 baarin paineeseen hyötykäyttöprosessia ja välivarastoa varten. BECCS-skenaarioiden logistiset tarpeet ovat suuremmat, sillä hiilidioksidi täytyy kuljettaa sopivalle varastointipaikalle. Mallissa hiilidioksidi paineistetaan ylikriittiseksi, minkä jälkeen se joko kuljetetaan putkessa sisämaasta kaivokselle mineralisoitavaksi tai kuljetetaan satamaan, nesteytetään ja kuljetetaan laivalla Pohjanmerelle geologiseen varastointiin.

2.1.4 Uusi sähköntuotanto ja lämmityssektorin sähköistyminen

BECCU-tuotteiden tuotanto, puun polton väheneminen sekä lämmityssektorin sähköistyminen vaativat uutta sähköntuotantoa. Työssä oletetaan karkeasti yksinkertaistaen, että uusi sähköntarve katetaan tuulivoimalla (ks. liite 2), sillä tuulivoimalla on Suomessa arvioitu suuri potentiaali (Nurmio & Pakarinen 2024) ja se on merkittävin uusiutuvan sähkön tuotantomuoto viimeaikaisissa energia- ja ilmastoskenaarioissa (Koljonen ym. 2025a, b). Lisäksi esimerkiksi EU:n kestävyyskriteerit e-kerosiinille edellyttävät uusiutuvan sähkön käyttöä valmistuksessa (ns. RFNBO-tuotteita koskevat kriteerit, Komission delegoitu asetus (EU) 2023/1184). Tässä työssä ei ole tehty energijärjestelmämallinnusta, jolla olisi tarkemmin tutkittu energijärjestelmän sopeutumista skenaarioissa tapahtuviin muutoksiin.

Skenaariolaskelmissa puun polton väheneminen lisää vaihtoehtoisten lämmönlähteiden tarvetta. Lisäinen lämmöntarve lasketaan vertaamalla kussakin skenaariossa lämpö- ja voimalaitosten tuottamaa lämmön määrää vuotta 2024 vastaavaan perustilanteeseen. Näin laskettu lämmöntuotannon lisätarve katetaan skenaariossa sekoituksella sähkökattiloita ja lämpöpumppuja. Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen vuosituotannon osuudet kaukolämmöntuotannosta olivat vuoden 2024 ennakkotietojen mukaan noin 4 % sähkökattiloihin ja noin 16 % lämmöntalteenottoon ja lämpöpumppuihin perustuvaa tuotantoa. Tämä noin 1:4 tuotantomäärien suhde vastaa likimain myös Energiateollisuuden jäsenkyselyyn perustuvaa arviota näiden tuotantomuotojen keskinäisestä suhteesta vuoteen 2030 asti. (Energiateollisuus 2025)

2.1.5 Tarkasteltavat hakkuutasot

Maankäyttösektorin kytkennän tarkastelemiseksi työssä tarkastellaan kahta hakkuutasoa. Mallinnuksessa käytettävä suurempi hakkuukertymä on 74 milj. m³. Se viittaa mallinnuksen ajankohtana tiedossa olleeseen vuoden 2024 hakkuukertymään runkopuulle². Tämä on linjassa myös vuoden 2025 hakkuukertymän kanssa, jonka on raportoitu olevan noin 74 milj. m³ (Luonnonvarakeskus 2026a). Lisäksi käytetään vuoden 2024 tilaston mukaisesti yhteensä noin 7,7 milj. m³ hakkuutähteitä, kantoja, kierrätyspuuta ja tuontipuuta. Alempi hakkuukertymä 64 milj. m³ runkopuuta vastaa Ilmastopaneelin aiempia suosituksia Suomen ilmastolain mukaisen hiilineutraaliustavoitteen sekä EU:n maankäyttösektorin kansallisten velvoitteiden kanssa paremmin linjassa olevasta hakkuumäärästä (Suomen ilmastopaneeli 2025).

Alemman hakkuutason skenaarioissa oletetaan yksinkertaistaen, että kaikki puuvirrat pienenevät samassa suhteessa kuin hakkuut. Skenaarioissa ei siten oleteta muutoksia puun käyttökohteisiin, vaikka tällaisia muutoksia voisi todellisuudessa seurata alemman hakkuutason myötä.

2.1.6 Tarkasteltavat skenaariot

Mallinnukseen valituissa skenaarioissa varioidaan hakkuutasoa sekä käytettäviä teknologioita. Mallinnetut skenaariot esitetään Taulukko. Perustilana mallinnetaan puunkäyttö nykytilassa vuonna 2024. Skenaariot kuvaavat tilannetta vuonna 2040.

Nykyteknologioilla viitataan nykyisiin metsäteollisuuden ja lämmöntuotannon prosesseihin. Tech-skenaarioissa otetaan käyttöön korkeamman jalostusarvon teknologioita metsäteollisuudessa: ligniiniä erotetaan akkumateriaalien sekä liimojen valmistukseen ja kuoresta tehdään tanniinituotteita. Lisäksi oletetaan, että puun suora poltto lämpökattiloissa vähenee, kun lämmöntuotantoa sähköistetään lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden avulla. BECCU- ja BECCS-skenaarioissa yli 0,1 Mt pistelähteistä 90 % hyötysuhteella talteenotettu bioperäinen hiilidioksidi joko hyödynnetään tuotteisiin tai varastoidaan pysyvästi.

Skenaariolaskenta toteutetaan vaihe vaiheelta, jotta voidaan osoittaa eri muutosten vaikutukset tuloksiin, vaikka yksittäinen skenaario ei välttämättä olisi esimerkiksi talousvaikutusten kannalta toivottava kehityssuunta (esimerkiksi alempi hakkuutaso ilman korkeamman arvonlisän tuotteita tai BECCUS-ratkaisuja). Tulokset esitetään varioimalla saatavilla olevan bioperäisen hiilidioksidin käyttöastetta: hiilidioksidia otetaan hyötykäyttöön tai varastoidaan 20 %, 50 % tai 100 % saatavilla olevasta kokonaismäärästä. Näin skenaarioiden avulla voidaan hahmottaa eri käyttöasteisiin liittyviä suuruusluokkia sekä taloudellisia, energia- ja ilmastovaikutuksia eri teknologiavaihtoehdoilla.

Sähkön ja lämmön kysyntään Suomessa ei oleteta muita muutoksia kuin tässä mallinnetuista skenaarioista aiheutuvat muutokset. Työssä ei siis huomioida esimerkiksi muiden sektorien lisääntyvää sähkönkulutusta. Samoin metsäteollisuuden rakenteeseen tai kysyntään ei oleteta muita muutoksia kuin skenaarioissa mallinnetut muutokset.

² Luonnonvarakeskus (2026a) korjasi huhtikuussa 2026 vuoden 2024 hakkuukertymäksi 74,8 milj. m³.

Taulukko 2: Mallinnuksessa tarkastellut skenaariot.

Skenaario	Hakkuukertymä (runkopuuta)	Ligniinin käyttö	Sahojen ja sellutehtaiden kuoren käyttö	Energia-puusta valmistetun metsähakkeen energiakäytön osuus	Meesauunien maakaasun ja öljyn korvaus	BECCU (e-kerosiini, e-bensiini, polyolit)	BECCS (geologinen varastointi / mineralisointi)
v2024-74Mm3 (Perustila)	74 milj. m ³	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	0	0
v2024-64Mm3	64 milj. m ³	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	0	0
BECCU-74Mm3	74 milj. m ³	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista	0
BECCU-64Mm3	64 milj. m ³	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista	0
BECCS-74Mm3	74 milj. m ³	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	0	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista
BECCS-64Mm3	64 milj. m ³	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	Nykyteknologia	0	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista
Tech-BECCU-74Mm3	74 milj. m ³	6,5 % mustalipeän kuiva-aineesta materiaali-tuotteiksi	100 % tanniini-uuttoon (pl. kaasutettu kuori)	60 % (40 % sellunkeittoon)	Korvattu sivutuotepuulla	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista	
Tech-BECCU-64Mm3	64 milj. m ³	6,5 % mustalipeän kuiva-aineesta materiaali-tuotteiksi	100 % tanniini-uuttoon (pl. kaasutettu kuori)	60 % (40 % sellunkeittoon)	Korvattu sivutuotepuulla	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista	
Tech-BECCS-74Mm3	74 milj. m ³	6,5 % mustalipeän kuiva-aineesta materiaali-tuotteiksi	100 % tanniini-uuttoon (pl. kaasutettu kuori)	60 % (40 % sellunkeittoon)	Korvattu sivutuotepuulla	0	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista
Tech-BECCS-64Mm3	64 milj. m ³	6,5 % mustalipeän kuiva-aineesta materiaali-tuotteiksi	100 % tanniini-uuttoon (pl. kaasutettu kuori)	60 % (40 % sellunkeittoon)	Korvattu sivutuotepuulla	0	90 % yli 0,1 Mt bioCO ₂ /a laitoksista

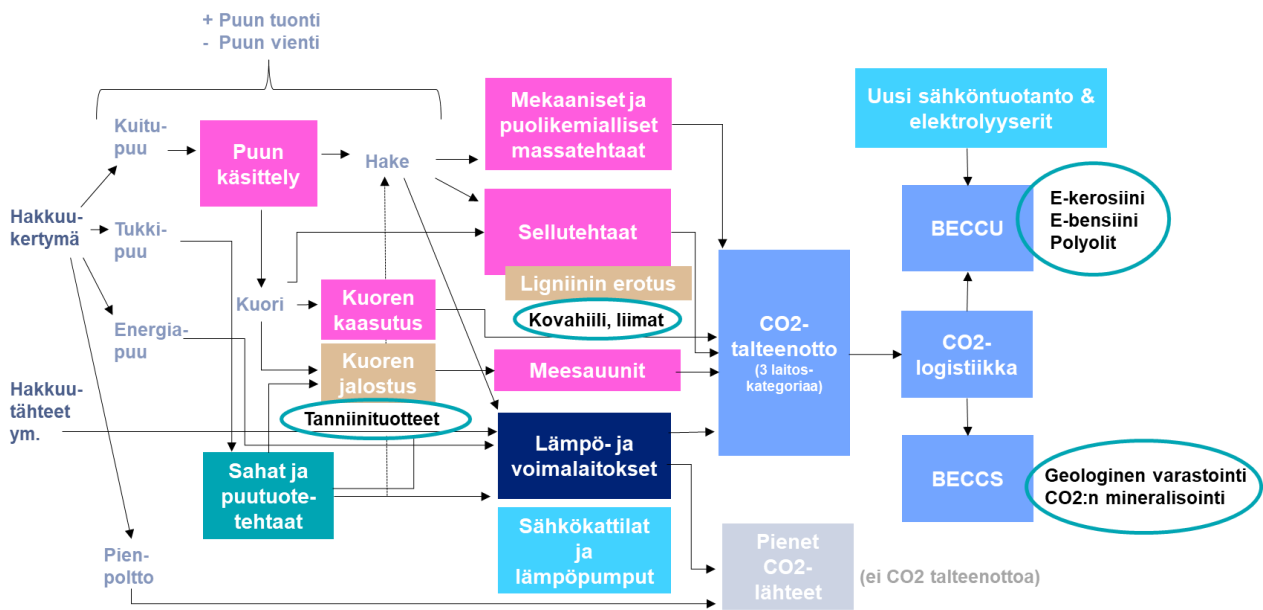
2.1.7 Tilastopohjainen puunkäyttömalli

Työssä mallinnetaan tilastoihin perustuen Suomen puunkäyttö alkaen hakkuista saha- ja massateollisuuden puun käyttöön ja lopulta energiakäyttöön teollisuudessa, kaukolämmön tuotannossa sekä pienpoltossa. Myös puun tuonti ja vienti huomioidaan. Malli on toteutettu MS Excel -ohjelmalla. Mallissa puuta käyttäviä teollisuudenaloja tarkastellaan Suomessa kokonaisuuksina, ei yksittäisinä laitoksina. Ajallisesti malli kuvaa yhden vuoden materiaali- ja energiavirtoja. Malli on rakennettu hankkeen aikana ilman edeltäviä versioita, pohjautuen ensisijaisesti Luonnonvarakeskuksen kokoamiin Suomen virallisiin tilastoihin (Luonnonvarakeskus 2024a–d).

Mallin kytkennät sekä materiaali- ja energiavirrat esitetään yksinkertaistetusti kuvassa 6. Tarkempi kuva tasemallista esitetään erikseen julkaistussa lisämateriaalissa (ks. luku 2.1). Mallin yksityiskohtainen energia- ja materiaalivirtalaskenta kuvataan liitteessä 2.

Mallinnetut puuvirrat alkavat hakkuukertymästä, joka jakautuu kuitu-, tukki- ja energiapuuksi sekä pienpolttoon. Näiden puuvirtojen hakkuukertymän mukaisten määrien lisäksi huomioidaan myös puun tuonti ja vienti. Hakkuukertymän lisäksi kerätyt hakkuutähteet sisältyvät malliin, sen sijaan briketit ja pelletit jätetään pois yksinkertaistamisen vuoksi. Kierrätyspuun poltto sisällytetään lämpö- ja voimalaitosten polttoainevirtoihin, mutta jätteenpolttolaitokset rajataan pois tarkastelusta.

Puuvirrat kytkeytyvät mallissa käyttötarkoituksen mukaan seuraavasti: kuitupuu käytetään massatehtailla (sellunkeitto, mekaaninen ja puolikemiallinen massanvalmistus), tukkipuu käytetään sahoilla ja puutuote-tehtailla ja energiapuu käytetään lämpö- ja voimalaitoksilla. Pienpoltton puu käytetään erikseen talojen ja maatilojen lämmityksessä. Liitteessä 2 esitellään erikseen kunkin puun käyttötarkoituksen mukaiset syötteet ja lopputuotteet sekä ristiinkytkennät sivuvirtojen osalta. Lisäksi annetaan lisätietoja mallinnuksen oletuksista liittyen sähköntuotantoon, sekä hiilidioksidin talteenotosta.



Kuva 6: Yksinkertaistettu kuvaus tasemallissa esitetyistä materiaali- ja energiavirroista sekä kytkennöistä. Varsinainen malli on esitetty erikseen julkaistussa lisämateriaalissa (ks. luku 2.1). Metsäteollisuuden korkeamman jalostusarvon tuotteista tarkasteluun valittiin ligniini- ja kuorituotteet, koska niillä on suora kytkentä bioperäisen hiilidioksidin saatavuuteen.

2.1.8 Keskeisimmät lähtötiedot

Mallin lähtötiedot on koottu kattavasti Ilmastopaneelin sivuilla erikseen julkaistuu lisämateriaaliin (ks. luku 2.1). Lähtötiedot sisältävät tilastotietoa Suomen puuvirtojen ja puupohjaisten tuotevirtojen suuruuksista, kiinteillä puupolttoaineilla tuotetun energian määrästä, materiaalien ominaisuuksista (kuten tiheys, irtotiheys, energiasisältö, päästökerroin), teollisuuslaitosten bioperäisistä hiilidioksidipäästöistä, uusien tarkasteltavien tuotteiden investointi- ja tuotantokustannuksista, hinnoista ja prosessiparametreista sekä nykyisen puuvirtoihin liittyvän teollisuuden vuotuisista investoinneista ja arvonlisäyksestä. Keskeisimpiä oletuksia on kuitenkin koottu alle.

Investointien ja arvonlisien osalta tarkasteltavat tuoteryhmät ovat: nykyinen metsäteollisuus; nykyinen metsätalous ja puunkorjuu; nykyinen bioenergia, kiinteät puupolttoaineet; kuoren jalostus; ligniinituotteet; sähkökattilat; lämpöpumput; uusi sähköntuotanto tuulivoimalla; CO₂-talteenotto; CO₂-kuljetus (BECCU ja BECCS); CO₂-mineralisointi; elektrolyysit; e-kerosiini; ja polykarbonaattipolyolit. Tuoteryhmiin sisällytetään päätuotteen lisäksi saman ryhmän sivutuotteet. Uusien teknologioiden edellyttämien investointien ja arvonlisien vertaamiseksi nykyisiin puuta käyttäviin teollisuudenaloihin tarvitaan myös toimialakohtaista tilastotietoa kansantalouden vuositilinpäädystä (Tilastokeskus 2026a). Nykyteollisuuden arvonlisän arvioinnin tarkemmat tiedot esitetään liitteessä 4.

Tuoteryhmäkohtaisten arvonlisäysten ja investointien laskemiseksi tarvitaan sekä prosessikohtaisia lähtötietoja (kuten saannot ja kustannusosuudet) että useampaa tuoteryhmää koskevia yleisiä lähtötietoja (kuten hintatiedot ja investointiparametrit). Laskennassa käytettävät uusien mallinnettujen prosessien tuotteiden hinnat ja vastaavat katteet esitetään taulukossa 3. Kateprosentin määrittely vaihtelee tuotteittain: joissakin tapauksissa tietolähteen perusteella määritetään kate ja hinta lasketaan katteen ja kustannusten perusteella, kun taas toisissa kate lasketaan tietolähteen mukaisen hinnan ja mallinnettujen kustannusten perusteella.

Uusiin teknologioihin kohdistuvien investointien pääomakustannusten laskemisessa käytetään yleisinä lähtötietoina taulukossa 4 esitettyjä arvoja. Näiden lisäksi teknologiakohtaiset investointikustannukset esitetään lisämateriaalissa (ks. luku 2.1).

Energian hinnat oletetaan laskennassa karkeasti yksinkertaistaen samoiksi sekä tuottajille että kuluttajille, ja vakioiksi ajan yli. Skenaarioissa käytettävät hinnat esitetään taulukossa 5. Sähkön hinnan vaihtelun vaikutusta tuloksiin arvioidaan herkkyystarkasteluissa (luku 3.1.4).

Taulukko 3: Uuden investoitavan teollisuuden päätuotteiden hinnat ja vastaavat kateprosentit.

Tuote	Hinta [€/t]	Kate [%]	Lisätiedot
BECCS-hiilidioksidipoiston hinta, geologinen varastointi	225	27,0	Arvio, €/t varastoitua bio-CO ₂ :ia. EU ETS WAM -hinta v.2040: 160–290 €/t (Euroopan komissio 2024a). BECCS, vapaaehtoiset päästökaupparamarkkinat: 220 USD/t (Cdr.fyi 2026)
Geologisen varastoinnin hinta	81	27,0	Arvio. Varastointikustannus 5–147 USD/tCO ₂ , josta keskiarvo 76 USD/tCO ₂ eli n. 64 €/tCO ₂ (1 USD ~0,84 EUR). Jos kalleimmat varastomuodostumat vältetään, on offshore-varastojen kustannusväli 5–80 USD/tCO ₂ . (Hatta ym. 2025) Geologisen varastoinnin arvonlisäys kohdistuu ulkomaille. Kuljetusketjun arvonlisäys jaetaan Suomen ja ulkomaiden välillä.
BECCS-hiilidioksidipoiston hinta, CO ₂ :n mineralisointi	277	8,8	Arvio, €/t varastoitua bio-CO ₂ :ia. CO ₂ :n mineralisointi, vapaaehtoiset päästökaupparamarkkinat: 330 USD/t. (Cdr.fyi 2026)
E-kerosiinin hinta	4 078	10,0	Perustapauksen laskennan tulos kustannusten ja 10 % katteen perusteella. CO ₂ :sta valmistetun synteettisen lentopolttoaineen keskimääräisen tuotantokustannuksen arvioita: 7695 €/t (6820–8590 €/t) (EASA 2025; Weiss ym. 2024) RFNBO-kerosiinille: 2400–9600 €/t (Weiss ym. 2024).
Polykarbonaattipolyolien hinta	4 551	10,0	Laskennan tulos kustannusten ja 10 % katteen perusteella. Hinnan arvioidaan olevan välillä 1700–6000 €/t (Nevander ym. 2022).
Ligniinivälituotteen hinta kovahiilisovelluksissa	1 144	200,0	Laskennan tulos kustannusten ja 200 % katteen (Österberg ym. 2024) perusteella. Kovahiilituotteiden osuus ligniinivälituotteiden myynnistä 25 %.
Ligniinivälituotteen hinta liimasovelluksissa	604	58,0	Arvio 500–1000 €/t välituotteelle. Österberg ym. (2024) mukaan myyntihinta suoraan myytävälle puhdistetulle ligniinille 604 €/t (15 % marginaalilla). Liimat tuotteiden osuus ligniinivälituotteiden myynnistä 75 %.
Tanniinivälituotteen hinta (kuoren jalostus)	1 500	16,2	Arvio 1000–2000 €/t välituotteelle. Hintoja kerännyt mm. Niiranen (2025), viitaten: 1,6 €/kg (Wijeyekoon ym. 2021); 1,44 €/kg (Ajao ym. 2021); 0,7–1,5 €/kg (Arbenz & Avérous 2015).

Taulukko 4: Pääomakustannusten yleiset lähtötiedot

Lähtötieto	Luku-arvo	Yksikkö	Lisätieto tai perustelu
Painotettu keskimääräinen pääomakustannus, WACC	8,0 %	%	Oletus. Hiilidioksiditalous-raportissa (Arasto ym. 2024) käytettiin 8–10 %; sellutehtaan referenssimallissa (Kangas ym. 2014) käytettiin 7,5 %.
Investoinnin pitoaika	20	v	Oletus tapauksille, joille ei ole erityistä muuta perustetta. Poikkeuksina mm. elektrolyysarit 10 v ja tuulivoima 30 v.
Käyttöaika tai huipunkäyttöaika	8 000	h/v	Oletus tapauksille, joille ei ole erityistä muuta perustetta. Poikkeuksina mm. sellutehtailla 8400 h/v, elektrolyysereillä 7500 h/v, sähkökattiloilla 3500 h/v ja lämpöpumpuilla 6000 h/v.

Taulukko 5: Laskennassa käytetyt energian hinnat.

Lähtötieto	Luku-arvo	Yksikkö	Lisätieto tai perustelu	Lähdeviitteet
Sähkön hinta	50	€/MWh	Vastaa työssä arvioitua maatuulivoiman kustannuksia ja n. 10 % katetta. Oletuksena, että CCUS toteutuu, kun kohtuuhintaista sähköä on saatavilla. Nykyisten PPA-sopimushintojen arvioitu olevan välillä n. 35–55 €/MWh (BloombergNEF 2022, kuvio 1).	Projektiryhmän arvio
Höyryn arvo	35	€/MWh	Vastaa ENVIMATscen-mallin käyttämää hintaa 36,1 €/MWh	Projektiryhmän arvio
Kaukolämmön hinta	70	€/MWh	ENVIMATscen-mallin käyttämä hinta 60,6 €/MWh, lämmityksen oletettu sähköistyvän, hinta riippuu siis sähkön hinnasta.	Projektiryhmän arvio

2.1.9 Mallin rajoitukset ja epävarmuudet

Mallinnuksen tavoitteena on ymmärtää bioperäiseen hiilidioksiidiin pohjautuviin CCUS-ratkaisuihin liittyviä suuruusluokkia, mahdollisuuksia ja rajoitteita Suomessa. Skenaarioiden arvioimiseksi käytetyn metodin keskeinen rajoitus on mallin tilastopohjaisuus ja yksinkertaistukset massa- ja energiavirroissa. Työssä ei siis käytetä varsinaista järjestelmämallinnusta puuta jalostavien laitosten osalta eikä energiajärjestelmämallinnusta, joilla skenaarioiden edellyttämiä muutoksia sähkön- ja lämmöntuotantoon tutkittaisiin tarkemmin. Tämän vuoksi malli ei kuvaa kaikilta osin todellisia energia- tai massataseita jalostus- tai energialaitoksilla. Malli ei myöskään kuvaa energiajärjestelmän dynaamisia ominaisuuksia, kuten tuotannon, kysynnän ja hintojen ajallista vaihtelevuutta, vaan esittää staattisen tilannekuvan.

Mallissa ei arvioida investointien kannattavuutta yksittäisen toimijan tai teollisuuslaitoksen näkökulmasta. Malli ei myöskään kuvaa esimerkiksi puupohjaisten raaka-aineiden kuljetusmatkoja tai logistiikan kannattavuutta. Käytännössä esimerkiksi investointeihin käytössä oleva pääoma, työvoiman saatavuus sekä monet logistiset tekijät voisivat rajoittaa skenaarioiden toteutumista. Työssä oletetaan, että rahoitus tarvittaviin investointeihin löytyy. Työssä tehdään oletus, että kysyntä tässä tarkastelluille uusille tuotteille syntyy EU:n tai kansallisen sääntelyn avulla (esim. jakeluvelvoitteet, päästökauppa,

sitovat tavoitteet) ja että tuotteista ollaan silloin valmiita maksamaan tässä oletettuja tuotantokustannuksia ja katteita vastaavat hinnat.

Mallin tilastopohjaisuus tarkoittaa myös, että yksittäisten laitosten tai prosessien erityispiirteitä ei huomioida tarkasti. Esimerkiksi WACC:lle (painotettu keskimääräinen pääomakustannus) ja laitosten pitoajoille tulisi käyttää laitoskohtaisia arvoja, jos laskentaa haluttaisiin tarkentaa (kustannukset, verot ja hinnat erikseen). Mallinnuksessa käytetään karkeasti yksinkertaistaen vain yhtä hintaa sähkölle ja lämmölle. Toisaalta sähkön hinnan pitäminen vakiona voidaan nähdä perusteltuna siksi, että pitkillä sähkön ostosopimuksilla uusiutuvan sähkön tuottaja saa varmuuden tarvittavista tuloista hankkeen rahoittamiseksi. Skenaarioiden teknologiset ja taloudelliset oletukset perustuvat kirjallisuuteen ja asiantuntija-arvioihin, mutta sisältävät suuriakin epävarmuuksia teknologioiden ja hintojen tulevasta kehityksestä (esimerkiksi elektrolyyserien tehokkuus, ligniini-, tanniini- ja BECCU-tuotteiden hinnat, jne.).

Hakkuutason vaihtuessa puun eri käyttötarkoitusten suhteet pidetään mallinnuksessa ennallaan. Todellisuudessa puunkäytön tai hakkuutason muutokset voivat kohdistua epätasaisesti eri käyttötapoihin, riippuen muun muassa todellisesta kysynnästä ja tuotannon kannattavuudesta. Esimerkiksi hakkuutason madaltuessa vaikutus voisi todellisuudessa kohdistua enemmän tai vähemmän energiasektorille ja eri tavoin kuitu- ja tukkipuun käyttöihin kuin mitä vuoden 2024 tilastoitujen käyttömäärien perusteella työssä arvioidaan.

Mallinnetut BECCUS-skenaariot esittävät eri hiilidioksidin käyttöasteen skenaarioita eivätkä välttämättä pyri kuvaamaan realistisia tulevaisuuspolkuja. Todellisuudessa BECCS- ja BECCU-teknologiat todennäköisesti esiintyvät rinnakkain, vaikka niitä on tässä tarkasteltu erillisissä skenaarioissa. Raportissa esitetyn karkean mallinnuksen on arvioitu menetelmällisesti ja tämän hankkeen resurssien puitteissa sopivan hankkeen tavoitteen saavuttamiseen. Tilastopohjainen mallinnus mahdollistaa myös mallin läpinäkyvyyden ja tehtyjen oletusten avoimuuden.

2.2 ARVONLISÄYSTARKASTELU

Raportissa arvioidaan tarkasteltujen arvoketjujen tuottama arvonlisäys. Arvonlisäyksestä puhuttaessa tarkoitetaan useimmiten bruttoarvonlisäystä. Se on kansantalouden tilinpidon käsite, joka kuvaa tuotannossa vuoden aikana syntyvää arvoa. Markkinatuotannossa se lasketaan vähentämällä myyntituloista käytettyjen välituotepanosten arvo. Yrityksen näkökulmasta vastaava käsite on jalostusarvo eli tuottojen ja tuotannosta syntyvien kustannusten erotus, kuitenkin niin, ettei työvoimakustannuksia määritelmän mukaisesti oteta huomioon.

Kun bruttoarvonlisäyksestä vähennetään pääoman kuluminen, saadaan nettoarvonlisäys, joka kuvaa tuotannontekijöiden (pääoma ja työvoima) sekä valtion (verokertymä) saamaa tuloa. Siten markkinataloudessa arvonlisäys kuvaa myös tuotantoon sitoutuvien tuotannontekijöiden määrää ja taloudellista aktiviteettia. Jos tuotteiden hinnoittelussa voidaan asettaa korkeita katteita, tämä yhteys arvonlisäyksen ja taloudellisen aktiviteetin välillä hämärtyy. Puhuttaessa korkean lisäarvon tuotteista hinnoittelu mahdollistaa korkean arvonlisäyksen käytettyjä tuotantopanoksia kohti, jolloin pääoman tuotto on korkealla tasolla ja työstä voidaan maksaa korkeaa palkkaa.

Tässä työssä arvonlisäys arvioitiin käyttäen suoraan määritelmää vähentämällä tuotantoprosessin myyntituloista välituotepanoskustannukset yhtälön 1 mukaisesti:

$$\text{Arvonlisäys} = \text{myyntitulot} - \text{tuotantokustannukset} + \text{työvoimakustannukset} \quad (1)$$

Keskeisten välituotteiden käyttö kuvattiin tuotekohtaisesti. Lisäksi osa tuotantokustannuksista kuvattiin karkeammin muuttuvina ja vaihtuvina käyttökustannuksina (OPEX), kuitenkin niin, että niistä poistettiin työvoimakustannusten osuus. Näin laskettu arvonlisäys kuvaa tuotannossa syntyvän arvonlisän määrää. Investointivaiheeseen liittyvää arvonlisää ei täsmällisesti arvioitu, mutta se on kytköksissä tarvittavien investointien suuruuteen.

Myyntitulojen kannalta keskeisessä asemassa ovat tuotteiden hinnat. Osalle tuotteista valittiin hinta kirjallisuuteen perustuen ja osalle kustannuksiin perustuen. Kustannuksiin perustuva minimihinta arvioitiin kuitenkin kaikille tuotteille, jolloin laskennassa käytetty hinta pystyttiin kytkemään kustannuksiin kateprosentin avulla, yhtälön 2 mukaisesti:

$$Kate - \% = \frac{päätuotehinta}{tuotantokustannukset + pääomakustannukset - sivutuotteiden myyntitulot} - 100\% \quad (2)$$

Kateprosentin avulla pystyttiin varmistamaan hintojen mielekäs taso kustannuksiin nähden. Kustannuksiin perustuva hinnoittelu vaatii tuotantokustannusten lisäksi tuotannon pääomakustannusten arvioinnin. Pääomakustannusten arviointi on hyödyllistä kahdella tavalla: sen avulla arvonlisän arviointi on luotettavampaa, koska hinnat saadaan kytkettyä kustannuksiin, ja laskennassa tarvittavaa investointitietoa voidaan hyödyntää investointitarpeiden ja investointivaiheen arvonlisän arvioinnissa.

Vaikka uusien tuotteiden tuotantoprosessit tunnettaisiinkin, eivät tieteellisestä kirjallisuudesta löytyvät prosessikuvaukset välttämättä täysin vastaa niitä vakiintuvia tuotantoprosesseja, joilla lopulta tuotteita teollisesti valmistetaan. Tämä on huomioitava yhtenä epävarmuuden lähteenä. Uusien tuotteiden tapauksessa myös tuotteiden hintatasosta tehtävät arviot ovat epävarmuuden lähde. Tuotteen hinta on keskeisin tuotannon kannattavuuteen ja tuotetusta yksiköstä syntyvään arvonlisäykseen vaikuttava tekijä. Tässä työssä hinta-arviot perustettiin kustannuksiin ja erilaisiin tietolähteisiin. Arvonlisäystulokset on laskettu myös niin, että tuotteille oletetaan nollakate, eli niiden hinta vastaa tuotannon käyttö- ja pääomakustannuksia.

Uusien tuotteiden ja arvoketjujen arvonlisäpotentiaalin arviointiin liittyy siis monia epävarmuustekijöitä. Tuotantoprosessia ja tuotteiden hintoja ei tyypillisesti tunneta ja niitä joudutaan arvioimaan tieteellisen kirjallisuuden, tapaustutkimusten ja oletusten pohjalta. Vaikka tässäkin työssä esitetyt arviot ovat karkeita, ne antavat silti kuvaa tarkasteltujen arvoketjujen arvonlisäpotentiaalin suuruusluokista.

MITÄ ARVONLISÄTARKASTELUSTA VOI TULKITA JA MITÄ EI?

Arvonlisäys kuvastaa tuotantoprosessissa luotua arvoa. Se siis muodostaa kansantalouden taloudellisen hyvinvoinnin perustan. Siinä mielessä arvonlisäyksen suuri määrä on hyvä asia. Toisaalta arvonlisäyksen luominen sitoo tuotannontekijöitä eli työvoimaa ja pääomia. Koska tuotannontekijöitä, etenkin työvoimaa, on kansantaloudessa rajallisesti, tuotannontekijöiden käyttö yhdessä arvoketjussa on pois toisesta arvoketjusta. Taloudellisen hyvinvoinnin kannalta onkin tärkeää, että tuotannontekijät kohdistuvat tehokkaasti. Lähtökohtaisesti markkinamekanismi ohjaa tähän: jos arvoketju on kannattava, se voi maksaa hyvää palkkaa ja tarjoaa korkeaa tuottoa pääomalle. Korkeat palkat ja tuotot houkuttelevat tuotannontekijät tuotantoon, jonka synnyttämä arvonlisäys on käytettyä panosta kohti korkealla tasolla.

Arvoketjukohtaisessa tarkastelussa olemme olettaneet, että investoinnit tuotantoprosesseihin tuottavat riittävästi houkutelakseen pääomia. Työvoimakustannuksissa ei ole pystytty erittelemään palkkatasoa, mutta keskeinen oletus on, että tuotantoprosessi pystyy maksamaan kilpailukykyistä palkkaa houkutelakseen tarvitsemansa työvoiman. Näiden oletusten vallitessa pystymme karkeasti arvioimaan tuotantoprosessien ja arvoketjujen synnyttämän arvonlisäyksen tason.

ENVIMATscen-malli (ks. luku 2.3) laajentaa tarkastelun arvoketjuista koko kansantalouteen. Erityisesti se huomioi edellä mainitun tuotannontekijöiden rajallisuuden ja siten kansantaloudessa ilmenevät syrjäytysvaikutukset tai rajoitteet, kuten investointien rahoittamisen, työvoiman kohdentumisen ja saatavuuden. Siinä missä arvoketjukohtainen tarkastelu arvioi tutkittujen arvoketjujen arvonluonnin potentiaalia tuotantoon osallistuvilla toimialoilla, ENVIMATscen-tarkastelu arvioi arvoketjujen kansantaloudellisia vaikutuksia. Kansantaloudelliset vaikutukset ovatkin väistämättä pienempiä, koska tarkasteltujen arvoketjujen käyttämät tuotannontekijät ovat pois muilta arvoketjuilta ja toimialoilta.

Arvonlisätarkastelussa on myös hyvä huomata se, että tarvittavat pääomat eli investoinnit ovat suuria. Siltä osin kuin pääomat tulevat ulkomailta, myös pääomatulot kotiutetaan näihin maihin. Siten vaikka arvoketjujen arvonlisäykset ovat korkeita ja ne kasvattavat Suomen kansantuotetta, ne eivät välttämättä samassa määrin lisää kansantuloa, joka on keskeinen käsite kuvaamaan kansalaisten taloudellista hyvinvointia. Pääomamarkkinat ovat globaalit ja sama ilmiö toimii myös toiseen suuntaan, kun suomalaiset omistavat ulkomaisia yrityksiä. Pääomatuloja liikkuu siis molempiin suuntiin. Tarkasteltu investointishokki on kuitenkin niin merkittävä, että siinä ulkomaisen pääoman rooli voi korostua ja siksi arvonlisäysten yhteys taloudelliseen hyvinvointiin voi olla yliarvio.

2.3 KANSANTALOUSVAIKUTUSTEN ARVIOINTI ENVIMATSCEN-MALLILLA

2.3.1 ENVIMATscen-mallin peruseriaatteet

Skenaarioiden vaikutuksia koko kansantalouden tasolla arvioitiin Suomen talouden ympäristölaajennetulla pitkän ajan ENVIMATscen-simulointimallilla (Heikkinen ym. 2026). ENVIMATscen on kokonaistaloudellinen malli, jossa tulevat huomioiduksi talouden kytkennät, rajoitteet ja erilaiset rebound- eli heijastevaikutukset. Malli ratkaisee mallinnuksen päätevuodelle kansantalouden kiertokulun tasapainon niin, että tuotteiden tarjonta ja kysyntä sekä investoinnit ja säästäminen ovat tasapainossa, ja taloudessa vallitsee luonnollinen työttömyys huomioiden täystyöllisyys (ns. NAIRU-työttömyys). Malli kuvaa kotimaisen tarjonnan ja käytön lisäksi ulkomaankaupan virtoja.

Toimialojen tuotantovolyymi päätevuonna määräytyy mallinnuksen lopputuloksena. Malli on kysyntälähtöinen eli toimialojen tuotokset sopeutuvat kysynnän muutoksiin huomioiden kuitenkin tietyt talouden rajoitukset. Kysyntä muodostuu toimialojen panoskäytöstä sekä loppukäytöstä, johon kuuluvat kotimainen kulutus ja investoinnit sekä vientikysyntä. Toimialojen tuotokset ratkaistaan yksityiskohtaisen panos-tuotosmallin (Seppälä ym. 2011, Savolainen ym. 2024) avulla. Panos-tuotosmalli kuvaa talouden kytkeytyneisyyden: kansantalous jaetaan toimialoihin ja niiden tarjoamiin tuoteryhmiin, jotka toimivat tuotantopanoksina toisille toimialoille tai käytetään lopputuotteina kulutuksessa tai muussa loppukäytössä. Perinteiseen staattiseen panos-tuotosmalliin verrattuna ENVIMATscen pystyy huomioimaan talouden dynamiikkaa ja erilaisia rajoitteita, kuten talouden investointitarpeet ja eri sektoreiden käytävissä olevat tulot, väestöennusteen mukaisen työvoiman tarjonnan sekä tuotteiden suhteellisissa hinnoissa tapahtuvien muutosten vaikutuksia kotitalouksien kysyntään sekä vientikysyntään.

Talouden ydinmallin ohella ENVIMATscen sisältää yksityiskohtaiset kuvaukset sähkön ja lämmön tuotannosta sekä toimialoittaisesta energiankulutuksesta energialähteittäin. Mallinnuksen päätevuodelle voidaan syöttää haluttuja energiajärjestelmän muutoksia (esim. tuuli-, aurinko- ja ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä, sähkö- ja lämpölaitosten polttoainejakauma, asuinrakennusten lämmityksen ja liikenteen energialähdejakaumat, energiankäytön tehostuminen sekä toimialojen polttoainekäytössä tapahtuvat muutokset). ENVIMATscen-malli sisältää massa- ja paperiteollisuutta kuvaavan satelliittimallin, joka tarkentaa toimialan panoskäytön rakennetta sekä energiantuotantoa ja -käyttöä perustuen siihen, millainen päätevuoden lopputuotejakauma (paperit, kartonki, vientisellu) toimialalle oletetaan. Lisäksi mukana on metsämalli, jossa talouden ydinmallissa ratkeava puun euromääräinen kysyntä muunnetaan ensin hakkuumääräksi, ja edelleen kokonaispoistumaksi.

ENVIMATscen-mallilla voidaan tuottaa erilaisia pitkän ajan kehityskulkuja, ja arvioida tuotantotoiminnan ja kulutuksen talous- ja ympäristövaikutuksia. Malli laskee suuren joukon erilaisia taloudellisia ja ympäristövaikutuksiin liittyviä indikaattoreita mahdollistaen sekä tuotanto- että kulutusperusteisen tarkastelun. Tuotantoperusteinen näkökulma sisältää toiminnan suorat vaikutukset, kun taas kulutusperusteisessa tarkastelussa huomioidaan koko arvoketjun elinkaariset vaikutukset sisältäen sekä kotimaisen tuotannon että tuonnin. Mallin ympäristölaajennuksilla voidaan tuottaa tietoa kasvihuonekaasupäästöistä (ml. LULUCF), maankäytöstä ja siihen kytkeytyvästä luontokadosta, sekä happamoittavista päästöistä, pienhiukkasista ja niihin liittyvistä ilmansaastekustannuksista. Ympäristökuormitusten yksityiskohtainen laskenta on kuvattu raportissa Savolainen ym. (2024).

2.3.2 Skenaarioiden arviointiperiaatteet

Luvussa 2.1 kuvatus tilastopohjaisen puunkäyttömallin ja luvussa 2.2. kuvatus arvonlisälaskennan tietoja hyödynnetään ENVIMATscen-mallinnuksen lähtötietoina, ja skenaarioiden mallinnuksessa pyritään käyttämään mahdollisimman yhteneväisiä oletuksia.

Keskeisimmät ENVIMATscen-malliin syötetyt tiedot ja oletukset ovat:

- kokonaishakkuutasot (milj. m³)
- talteenotetun hiilidioksidin määrät (milj. tonnia, Mt), investointikustannukset sekä prosessissa tarvittavat panokset (sähkö, lämpö, kemikaalit, muut) ja niiden hintaoletukset
- BECCS-prosessin häviöt, geologisen varastoinnin ja mineralisoinnin osuudet, varastoidun hiilidioksidin arvo, investointikustannukset sekä prosessissa tarvittavat panokset (sähkö, lämpö, kuljetus- ja varastointi, muut) ja niiden hintaoletukset
- BECCU-prosessin häviöt, jalostettavien e-kerosiin, e-bensiinin ja polyolikarbonaattien määrät (Mt) ja arvo, investointikustannukset, jalostusprosessissa tarvittavat panokset (vety, sähkö, lämpö, muut) ja niiden hintaoletukset, vedyn tuotannossa tarvittavat panokset (sähkö, muut) ja elektrolyysin investointikustannukset
- jalostettavien ligniini- ja kuorituotteiden määrät (Mt) ja arvo, investointikustannukset sekä prosessissa tarvittavat panokset (sähkö, lämpö, kemikaalit, muut) ja niiden hintaoletukset
- metsäteollisuuden tarjoamien paperin, kartongin ja massan tarjonnan jakauma
- energijärjestelmän muutokset: puun energiakäyttö ja sähköistyminen (GWh), tuulivoiman tuotannon kasvu lisääntyvän sähkönkulutuksen mukaisesti (GWh).

Hiilidioksidin talteenoton oletettiin tapahtuvan mallissa massa- ja paperiteollisuuden sekä energiahuollon toimialoilla samassa suhteessa kuin nykyiset laitokset jakautuvat kyseisten toimialojen kesken. Ligniini- ja kuorituotteiden jalostaminen oletettiin tapahtuvan massa- ja paperiteollisuuden toimialalla. E-polttoaineiden, polyolikarbonaattien ja vedyn valmistus mallinnettiin tapahtuvan kemianteollisuudessa. Mallinnuksessa huomioitiin uusien tarjottavien tuotteiden myötä toimialojen tarjonnan rakenteessa sekä panoskäytössä tapahtuvat muutokset. Hakkuutason ratkaisu on yleensä ENVIMATscen-mallissa endogeeninen eli taso määräytyy mallinnuksen lopputuloksena muodostuvan puun kysynnän mukaisesti. Tässä työssä mallinnettavat skenaariot pyrittiin saamaan mahdollisimman yhteneväisiksi tilastopohjaisen puunkäyttömallin kanssa, joten malliratkaisun logiikkaa muutettiin niin, että malli etsii iteratiivisesti metsäteollisuuden viennin volyymin (miljoonaa euroa), joka tuottaa halutun hakkuutason (milj. m³).

ENVIMATscen-malli tuottaa pysäytyskuvan vuodelle 2035. Kaikkien ENVIMATscen-mallilla tuotettujen skenaarioiden taustalla on tietyt perusoletukset talouden kehitysurasta, väestökehityksestä ja energijärjestelmässä tapahtuvista muutoksista vuoteen 2035. Bruttokansantuotteen (BKT) perusrakenteen kehitys pohjautuu Valtiovarainministeriön pitkän ajan kasvuarvioon (Valtiovarainministeriö 2024). Väestökehityksen arvio perustuu Tilastokeskuksen vuoden 2021 väestöennusteeseen (Tilastokeskus 2026b). Työikäinen väestö supistuu väestön ikääntymisen vuoksi, mutta työvoimaosuuksiin oletetaan hienoista kasvua. Skenaarioissa oletetaan luonnollinen työttömyys huomioiden täystyöllisyys, eli kokonaistyöllisyydessä ei tapahdu muutoksia. Täystyöllisyys on yleisesti käytetty oletus pitkän aikavälin talouskasvun tarkasteluissa. Energijärjestelmässä oletetaan tapahtuvan merkittäviä muutoksia vuoteen 2035 KEITO-WEM-skenaarioon pohjautuen (mm. muutokset liikenteen ja rakennusten lämmityksen energialähdejakaumassa). Nämä oletukset pysyvät kaikissa skenaarioissa samoina. ENVIMATscen-mallin tuloksista tarkastellaan bruttokansantuotetta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Taustaoletusten pysyessä samoina skenaarioiden välillä havaitut erot heijastavat mallinnettujen toimenpiteiden vaikutusta valittuihin indikaattoreihin.

Laskentamenetelmiin ja mallinnukseen liittyy aina epävarmuuksia. Lähtötietoihin liittyviä epävarmuuksia ovat esimerkiksi uusien tuotteiden ja niiden valmistusprosessissa tarvittavien panosten hinnat. Muita epävarmuuden lähteitä voivat olla puutteet ja virheet mallin lähtöaineistossa, parametreissa sekä itse mallin rakenteessa. Malli huomioi erilaisia talouden rajoitteita ja heijastevaikutuksia, mutta on kuitenkin käyttäytymisoletuksiltaan yksinkertainen. On tärkeää huomioida, että ENVIMATscen-malli eroaa systeemirajaukseltaan tilastopohjaisesta puunkäyttömallista ja erillisestä arvonlisälaskennasta, ja ENVIMATscen-mallissa skenaarioiden taustalla olevat perusoletukset kuvaavat vuotta 2035. ENVIMATscen sisältää massa- ja paperiteollisuuden toimintaa tarkentavan satelliittimallin, mutta se ei kuvaa metsäteollisuuden prosesseja samalla yksityiskohtaisuuden tasolla kuin tilastopohjainen puunkäyttömalli. Toisaalta ENVIMATscen mahdollistaa skenaarioiden laaja-alaisten vaikutusten arvioinnin huomioiden koko kansantalouden toiminnan ja talouden kytkenät. Näin erilaiset mallinnustavat täydentävät tarkastelussa toisiaan.

2.4 TUOTEKOHTAISTEN ILMASTOVAIKUTUSTEN ARVIOINTI

Työssä lasketaan kymmenen vuoden keskiarvo eri skenaarioiden tuotteiden aiheuttamille ilmastovaikutuksille käyttäen elinkaaripohjaista lähestymistapaa. Kullekin skenaariolle arvioidaan joka vuodelle aiheutetut ilmastovaikutukset, jotka lasketaan yhteen kymmenen vuoden tarkastelujakson osalta, alkaen vuodesta 2035. Tämän jälkeen kokonaisilmastovaikutus muutetaan vuosivaikutukseksi jakamalla summa kymmenellä. Kyseistä keskiarvoa käytetään, koska samalla hakkuutasolla puutuotteiden nielu (hiilitaseen muutos, jossa tuotteiden hiilivarasto kasvaa) muuttuu vuosittain käytetyn arviointiyhtälön takia, vaikka puutuotteet ja niiden määrät pysyvät samana koko tarkastelujakson aikana. Puun käytön ilmastovaikutukset kuvaavat vuosien 2035–2045 tilannetta.

Kunkin vuoden puun käyttöskenaarioiden ilmastovaikutus lasketaan seuraavalla yhtälöllä (3) (ks. esim. Seppälä ym. 2019):

$$\begin{aligned} \text{Ilmastovaikutus} & & (3) \\ &= \text{puutuotteiden hiilitasemuutos} \\ &+ \text{puutuotteiden ja energiapuun käytön korvaushyödyt} \\ &+ \text{hakkuiden aiheuttama hiilitasemuutos metsässä} \end{aligned}$$

Kaikkien kolmen tekijän arvioinnissa lähtökohdan muodostavat hakatun runkopuun määrät vuodessa.

2.4.1 Runkopuun käyttö eri kohteissa

Ainespuun ja energiapuun materiaalivirrat jakaantuvat 74 ja 64 miljoonan kuutiometrin runkopuun vuosihakkuutilanteissa taulukon 6 mukaisesti.

Taulukko 6: Puuvirrat ja niiden käyttö 74 ja 64 miljoonan kuutiometrin runkopuun vuosihakkuilla, vienti ja tuonti huomioiden.

	Mm ³	Mm ³
Runkopuumäärät (vuodessa)	74	64
– puutuoteteollisuuteen (tukki)	28,2	24,4
– selluteollisuuteen (kuitupuu)	35,5	30,7
– energiantuotanto (energiapuu)	5,6 (Tech: 3,4)	4,9 (Tech: 2,9)
Tukkipuusta		
– puutuotteisiin	11,8	10,2
– sellutuotantoon	7,9	6,8
– energiantuotantoon	2,7 (Tech: 0)	2,3 (Tech: 0)
– sivutuotepuun poltto voima- ja lämpölaitoksilla	4,0	3,5

2.4.2 Puutuotteiden hiilitaseen muutos

YK:n ilmastopimuksen mukaisessa kasvihuonekaasuinventaariossa kaikki metsästä otettu puu käsitellään välittömänä päästönä. Todellisuudessa kuitenkin ihmisen käyttöön siirtyneen puun hiili ei vapaudu heti ilmakehään, vaan iso osa siitä varastoituu puutuotteisiin eripituisiksi ajoiksi. Tämän takia kasvihuonekaasuinventaariossa tehdään puutuotteita koskeva korjaus, jolla arvioidaan ihmisen käyttöön otettujen puuvirtojen hiilivarastojen muutosta. Jos jonakin vuonna puutuotteiden hiilivarasto kasvaa, se toimii hiilinieluna. Jos taas varastosta hajoaa enemmän hiiltä kuin sinne kertyy, puutuotevarasto toimii päästölähteenä.

Varaston muutosta arvioidaan tässä yhteydessä IPCC:n laskentaohjeiden (IPCC 2019) mukaisilla niin sanotun tuotantomenetelmän ("product in use") mukaisella yhtälöllä, jota käytetään Suomen kasvihuonekaasuinventaarion tulosten raportoinnissa. Menetelmän lähtötietoina ovat puutuotteiden hajoamisnopeudet, joita kuvataan hajoamis-yhtälössä tuotteiden puoliutumisaikojen avulla. Nämä puoliutumisaikat yhdessä hajoamisnopeutta kuvaavan yhtälön kanssa tuottavat kulloisenkin tuotteista vapautuvan hiilimäärän.

Tuotteiden hiilivaraston muutoksen arviointi tarvitsee myös tiedon hiilivaraston alkutilasta sekä kunakin vuonna varastoon kertyvästä hiilimäärästä. Koska työssä verrataan eri puunkäyttöskenaarioiden ilmastovaikutuksia toisiinsa, hiilivaraston alkutilanteena on eri skenaarioissa nolla. Varastoon tuleva hiilimäärä lasketaan hajoamis-yhtälön ja eri skenaarioiden puuvirtojen ja niistä valmistettujen tuotteiden hajoamisnopeuksien avulla.

Laskelmissa käytetään IPCC:n oletuskertoimia puutuotteiden puoliutumisajoille. Sahatavaran puoliutumisaika on 35 vuotta ja puupaneelien 25 vuotta. Vanerituotteiden osuus rakennustuotteiden puuvirrasta on vain noin 11 %, minkä takia keskimääräiselle tukkipuusta valmistetuille tuotteille puoliutumisaikana laskelmissa käytetään 33,9 vuotta. Sellutuotteiden puoliutumisaika on 2 vuotta.

Hiilidioksidin talteenotosta valmistettujen tuotteiden (muiden kuin polttoaineiden) hajoamisen puoliutumisaikana käytetään kymmentä vuotta. Niiden ajatellaan korvaavan polykarbonaattipolyoleista

valmistettuja muovituotteita. Biopohjaisesta hiilidioksidista valmistettujen polttoaineiden ei oleteta saavan puutuotteiden hiilitasehyötyjä, koska ne oletetaan käytettävän vuoden sisällä valmistuksesta.

Puusta erotetusta ligniinistä valmistettujen liimatuotteiden puoliutumisaikojen oletetaan olevan sama kuin sahatavaran (35 vuotta). Ligniinistä tehtyjen akkumateriaalien raaka-aineen hiilestä oletetaan häviävän 67 % hiiltämisen häviönä ensimmäisen vuoden aikana, ja lopun varsinaisen akkumateriaalin puoliutumisaikojen on oletettu olevan 15 vuotta. Talteen otetusta ligniinistä oletetaan päätyvän akkumateriaaliksi (kovahiilituotteeksi) 25 % ja liimoiksi 75 %.

Puusta erotetusta tanniinista valmistettujen tuotteiden puoliutumisaikana käytetään kymmentä vuotta.

2.4.3 Puutuotteiden korvaushyödyt

Puutuotteiden korvaus- eli substituutiohyödyt kunakin vuonna saadaan kertomalla puuvirrat (hiilenä) vastaavilla keskimääräisillä tuotteiden substituutiokertoimilla ja laskemalla yksittäisten tuotteiden korvaushyödyt yhteen muuttamalla tulokset lopuksi hiilidioksiditonneiksi. Substituutiokerroin kuvaa, kuinka monta tonnia fossiilisperäistä hiiltä yksi käytetty biopohjainen hiilitonni korvaa puutuotteen syrjäyttäessä markkinoilla suuripäästöisempiä tuotteita, eli se ilmaistaan yksiköllä t C / t C. Metsäteollisuustuotteiden substituutiokertoimet arvioidaan vakiintuneella yhtälöllä (Sathre ja O'Connor 2010), jossa on huomioitu sekä puutuotteiden että niillä korvattavien tuotteiden elinkaariset fossiiliset päästöt.

Puuvirrat (milj. m³) muutetaan hiileksi olettamalla, että niissä on vettä 50 % ja hiilisisältö puun kuiva-aineessa on 45 %. Hiilimäärä muutetaan hiilidioksidiksi kertomalla hiilen ja hiilidioksidin atomipainojen suhteella eli luvulla 44/12.

Nykyisten kaltaisten metsäteollisuuden puutuotteiden keskimääräiset substituutiokertoimet tukkipuulle ja sellupuulle perustuvat Hurmekosken ym. (2020) esittämiin arvioon eri tuotteille, joista on laskettu keskimääräiset puutuoteteollisuuden ja sellutehtaan tuotteiden korvauskertoimet vuoden 2017 tuotantomäärien suhteessa. Substituutiokertoimet ovat:

- puutuoteteollisuuden tuotteet 0,94 t C / t C
- sellutehtaiden tuotteet 0,11 t C / t C

Todellisuudessa puutuotteiden korvaushyötyjen kirjo on todella suuri ja niiden kertoimien arviointiin liittyy suurta epävarmuutta, koska ei tiedetä mitä puutuotteet tarkkaan ottaen korvaavat markkinoilla. Edellä esitetyt korvauskertoimien arviot ovat pikemmin yli- kuin aliarvioita jo sen takia, että nykyisten kaltaisten puutuotteiden korvaushyötykertoimet ovat ennemminkin laskemassa kuin kasvamassa. Tämä johtuu siitä, että kilpailevat materiaalit (kuten betoni ja teräs) kehittyvät ajan myöden vähäpäästöisemmiksi tuotteiksi.

Uusien BECCU-tuotteiden osalta korvaushyödyt arvioidaan ilman substituutiokertoimien arviota. Niiden korvaushyötyjen arvioinnin lähtökohtana on, että bioperäisestä hiilidioksidista valmistettujen polttoaineiden ja muovituotteiden valmistuksen yhteiset päästöt vastaavat eri skenaarioissa kyseisten tuotteiden valmistuksessa käytetyn lisäsähkön aiheuttamaa päästöä. Lisäsähkön päästönä huomioidaan kasvavan tuulivoimatuotannon elinkaarinen fossiilinen päästö (12 g CO₂/kWh) (IEA 2024).

BECCU-tuotteiden korvaushyödyt saadaan kertomalla eri BECCU-tuotteiden vuosittaiset valmistusmäärät (Mt/v) niillä korvattavien tuotteiden elinkaarisilla päästöillä (t CO₂-ekv./Mt) ja laskemalla tulokset yhteen. Tästä vähennetään lopuksi niiden valmistuksessa käytetyn sähkön elinkaariset päästöt. Tuulivoimalla tuotetun sähkön päästökertoimen (12 gCO₂/kWh) voidaan ajatella sisältävän

myös tuulivoimatuotannon maankäyttövaikutuksista aiheutuvat päästöt, noin 1,4–2,1 g CO₂/kWh (Vuori ym. 2026), sillä tuulivoiman elinkaariset fossiiliset päästöt vähenevät tulevaisuudessa voimaloiden tuotantoon käytettävän energian ja materiaalien päästöjen vähentyessä. E-kerosiinilla korvataan fossiilisen kerosiinin valmistuksen elinkaarista päästöä kertoimella 4,07 MtCO₂-ekv./Mt. E-bensiinillä korvataan fossiilisen bensiinin elinkaarista päästöä kertoimella 3,92 MtCO₂-ekv./Mt. Näiden polttoaineiden kertoimet on johdettu RED-direktiivistä (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2018) ja Tilastokeskuksen polttoaineluokitustiedoista (Tilastokeskus 2024a). Pitkäikäisillä BECCU-tuotteilla korvataan polykarbonaattipolyolin tuotannon elinkaarista päästöä kertoimella 2,9 Mt CO₂-ekv./Mt (ISOPA 2021).

Ligniinistä valmistettujen tuotteiden korvaushyöty saadaan kertomalla valmistusmäärä (Mt) kertoimella 2,6 Mt CO₂-ekv./Mt. Luku vastaa suoraan synteettisen ei-puupohjaisen liiman elinkaarista päästöä (Sika 2023), eikä siis tässä yhteydessä ligniinipohjaisen liiman valmistukselle ole arvioitu päästöjä ollenkaan, mikä yliarvioi selvästi ligniinistä valmistettujen liimojen korvaushyötyjä. Vastaavasti ligniinistä valmistetun akkumateriaalin on oletettu korvaavan samassa suhteessa suoraan grafiittia, jonka elinkaarinen päästökerroin 3,6 Mt CO₂-ekv./Mt.

Tanniinituotteiden korvaushyötyjen on arvioitu olevan nolla.

2.4.4 Puun energiatuotannon korvaushyödyt

Kaukolämpö- ja voimalaitosten puupolttoaineen korvaushyöty on nykyisin 0,70 t C / t C (Hurmekoski ym. 2020, Seppälä ym. 2022). Laskennan alussa vuonna 2035 korvauskertoimen oletetaan olevan 0,5 t C/t, minkä jälkeen sen oletetaan pienenevän lineaarisesti arvoon 0,32 t C / t C tarkastelujakson (10 vuotta) aikana. Tämä perustuu oletukseen, että energiantuotannon puhdistuessa polttoon perustumattomat ratkaisut lisääntyvät ja puupolttoaineiden todellinen korvausvaikutus fossiilisiin polttoaineisiin nähden pienenee.

Oletuksena on, että 80 % sahatavaratuotteisiin sitoutuneesta puusta poltetaan tuotteiden elinkaaren lopussa voima- ja lämpölaitoksissa, eli siinä vaiheessa, kun tuotteet puoliutumisaikayhtälön kautta vapauttavat hiilidioksidin ilmakehään. Sellutuotteiden osalta arvioidaan, että tulevaisuudessa noin puolet vapautuvasta hiilestä päätyy energiantuotantoon. Tuotteiden elinkaaren lopussa vapautuvat hiilivirrat, jotka päätyvät polttoon, arvioidaan edellä mainitun IPCC:n puutuotteille tarkoitetun hiilitasemallin avulla (IPCC 2019).

Puutuotetehtaiden ja sellutehtaiden oman energiantuotannon korvaushyötyjen oletetaan olevan nolla.

2.4.5 Metsien hiilinielun muutokset

Ilmastopaneeli on arvioinut, että hakkuiden kasvattaminen yhdellä miljoonalla kuutiometrillä pienentää metsien hiilinielua 1,86 Mt CO₂-ekv (Seppälä ym. 2025), kun hakkuutason muutos on tarkastelujakson aikana pysyvä. Vastaavan vaikutuksen oletetaan toteutuvan myös silloin, kun hakkuut vähenevät. Tässä yhteydessä käytetään kuitenkin hieman maltillisempaa nielunmenetyskerrointa (1,7 Mt CO₂/Mm³), joka on johdettu korjatun Mela-mallinnuksen tuloksista (Luonnonvarakeskus 2026b), kun hakkuutasojen ero on kestänyt 10–20 vuotta.

2.4.6 Ilmastovaikutusten toteutuminen Suomessa ja ulkomailla

Arvioitujen ilmastovaikutusten jakautuminen Suomen ja muiden maiden kesken arvioidaan kertomalla eri komponenttien ilmastovaikutusarviot taulukossa 7 esitetyillä jakaumaoletuksilla ja laskemalla tulot yhteen Suomen ja ulkomaiden osalta.

Taulukko 7: Oletukset ilmastovaikutusten jakautumisesta Suomen ja ulkomaiden kesken.

	Suomi	Ulkomaat
Nykyiset tuotteet_S	10 %	90 %
Nykyiset tuotteet_N	100 %	0 %
Energiantuotanto_S		
Tukkipuun sivuvirrat (suora)	100 %	0 %
Tukkipuutuotteet, (elinkaaren loppu)	10 %	90 %
Sellutuotteet (elinkaaren loppu)	10 %	90 %
Energiapuu	100 %	0 %
CCU-tuotteet_S	10 %	90 %
CCU-tuotteet_N	100 %	0 %
CCS	100 %	0 %
Uudet tuotteet_S	10 %	90 %
Uudet tuotteet_N	100 %	0 %
Metsä	100 %	0 %

3 TULOKSET

Mallinnuksen tuloksena raportoidaan skenaarioille taulukossa 8 esitettyjä tunnuslukuja. Tulokset esitetään 20, 50 ja 100 % hiilidioksidin käyttöasteella. ENVIMATscen-mallin tulokset esitetään 100 % käyttöasteella. Tuloskuviin on valittu kunkin tuloksen kannalta oleellisia skenaariota.

Taulukko 8: Skenaarioista raportoitavia tuloksia.

Skenaarioiden tunnuslukuja vuositasolla
Tilastopohjainen puunkäyttömalli: <ul style="list-style-type: none">• Bioperäisen hiilidioksidin saatavuus (MtCO₂)• BECCU- ja BECCS-potentiaali (MtCO₂)• Tuotettujen BECCU-tuotteiden määrä• Tarvittavan vedyn määrä• Vuotuinen sähkönkulutus skenaariossa (TWh)• Kumulatiiviset investoinnit (milj. €)• Vuosittainen arvonlisäys (milj. €)
ENVIMATscen-tulokset: <ul style="list-style-type: none">• Bruttokansantuote (mrd. €)• Työllisten jakautuminen toimialoittain (htv ja %)• Suomen kasvihuonekaasupäästöt (pl. maankäyttösektorin nielut ja teknologiset nielut) (Mt CO₂-ekv.)
Tuotekohtaiset ilmastovaikutustarkastelut: <ul style="list-style-type: none">• Tuotteiden kasvihuonekaasupäästöt• Päästöhyötyjen jakautuminen Suomen ja ulkomaiden kesken (Mt CO₂-ekv.)• Suomen kokonaispäästöjen kehitys tässä tarkasteltujen skenaarioiden ja KEITO WAM -skenaarioiden yhdistelmänä

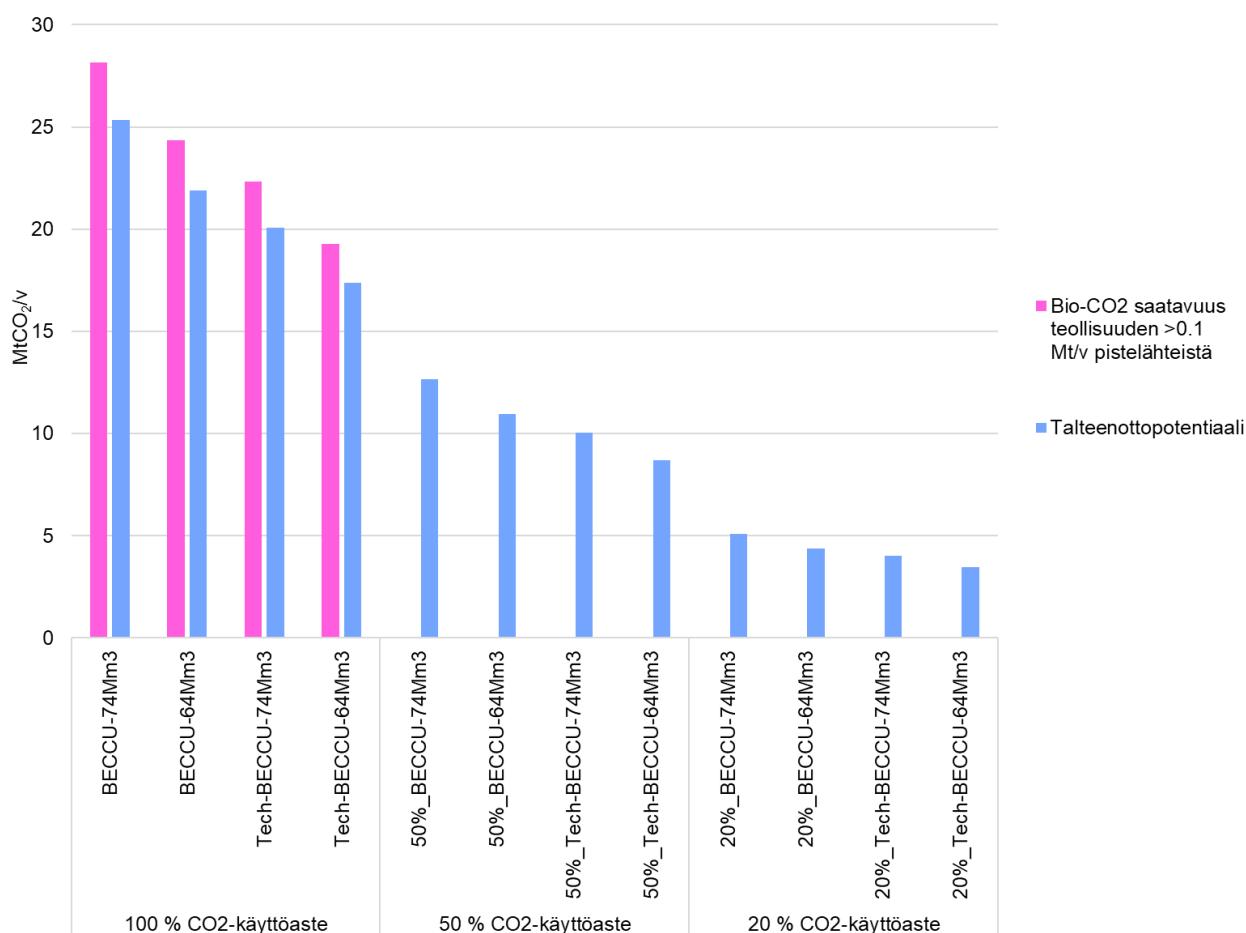
3.1 TILASTOPOHJAISEN PUUNKÄYTTÖMALLIN TULOKSIA

3.1.1 Hiilidioksidin saatavuus ja BECCU-tuotteiden määrät

Kuva 7 esittää bioperäisen hiilidioksidin maksimisaatavuutta Suomessa eri skenaarioissa. Bioperäisen hiilidioksidin määrään skenaarioissa vaikuttaa oletettu hakkuukertymä, eli käyttöön ja lopulta polttoon päätyvän puun määrä. Lisäksi skenaarioissa käytössä olevat teknologiat vaikuttavat hiilidioksidipäästöihin ligniinin ja kuoren hyötykäytön sekä lämmöntuotannon sähköistymisratkaisujen vähentäessä puun polttoa. Bioperäisen hiilidioksidin saatavuuden yli 0,1 Mt pistelähteistä Suomessa on nykytilanteessa arvioitu olevan noin 28 Mt vuodessa (v2024-74Mm³ skenaario).

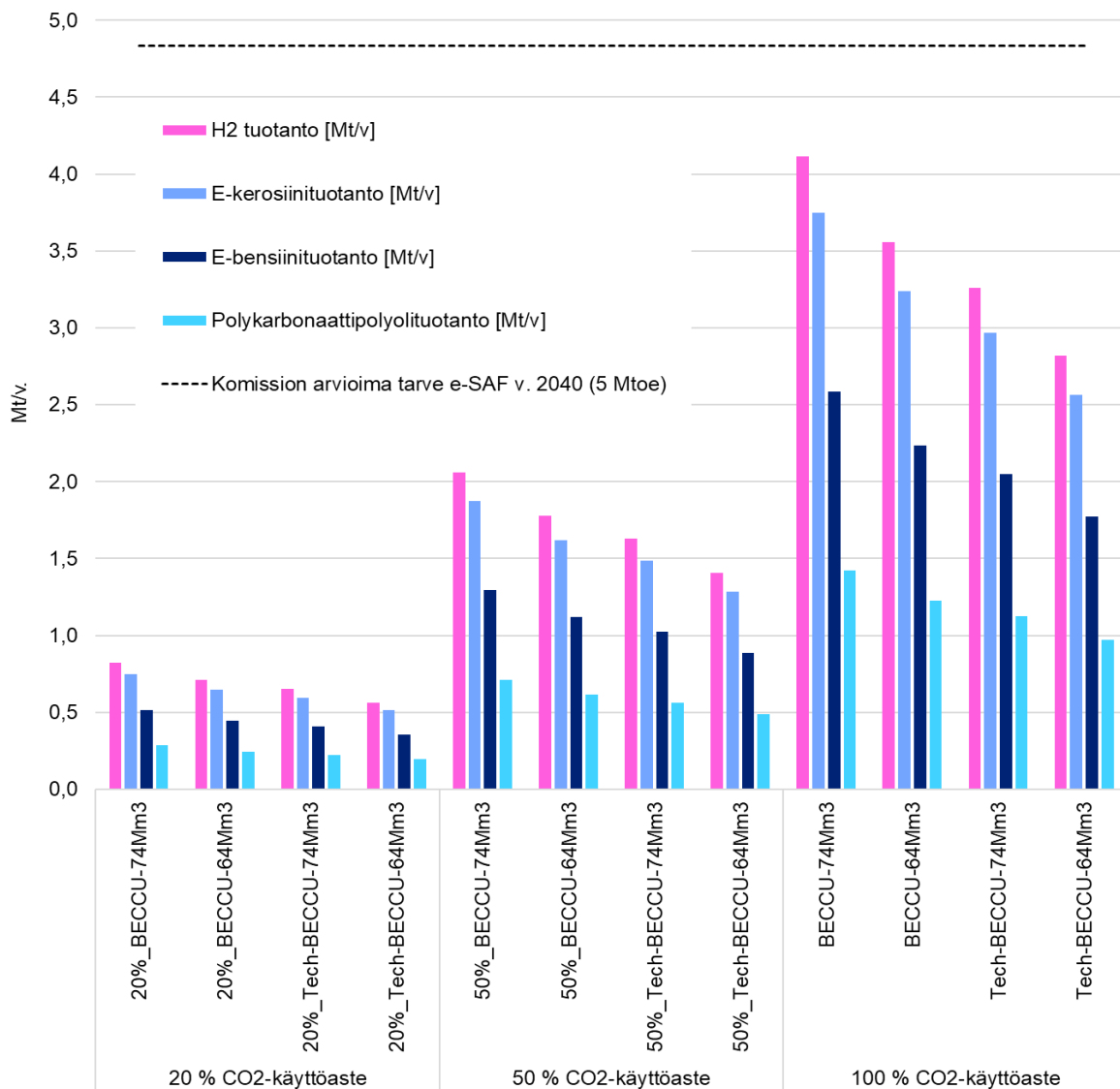
Suuremman hakkuukertymän skenaarioihin verrattuna pienemmän hakkuukertymän skenaarioissa bioperäisen hiilidioksidin saatavuus vähenee yhteensä 3,8 Mt (nykytilaskenaariot) ja 3 Mt (Tech-skenaariot), kun tarkastellaan 100 % bioperäisen hiilidioksidin käyttöastetta. Metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden ja lämmöntuotannon uusien teknologioiden käyttöönoton vaikutus hiilidioksidin saatavuuteen on merkittävämpi: Tech-skenaarioissa talteenotetun hiilidioksidin määrä laskee noin 5–6 Mt verrattuna nykyteknologioita kuvaaviin skenaarioihin. Alemman hakkuutason ja uudet teknologiat yhdistävässä skenaariossa (Tech-BECCU-64Mm³ ja Tech-BECCS-64Mm³) bioperäisen hiilidioksidin saatavuus tippuu jo merkittävästi, 19 miljoonaan tonniin vuodessa, nykyiseen 28 Mt verrattuna. Hiilidioksidin saatavuus säilyy kuitenkin korkeana kaikissa skenaarioissa.

Yli 0,1 Mt pistelähteistä saatavilla olevasta bioperäisestä hiilidioksidista voidaan talteenottaa enimmillään noin 17–25 Mt tässä oletetulla 90 % talteenoton hyötysuhteella. Tätä voidaan pitää teollisen mittakaavan BECCU:n maksimipotentiaalina Suomessa. BECCS:n maksimipotentiaali olisi lähes vastaava, huomioiden lisäksi 2 %:n kuljetushäviöt. Bioperäisen hiilidioksidin 50 %:n käyttöaste vastaa noin 8–12 Mt hiilidioksidin talteenottoa ja 20 %:n käyttöaste noin 3–5 Mt talteenottoa.



Kuva 7: Bioperäisen hiilidioksidin saatavuus sekä talteenottopotentiaali 100 %, 50 % ja 20 % hiilidioksidin käyttöasteella. Yksinkertaistuksena kuvassa BECCU-skenaariot esittävät myös BECCS-potentiaalia (todellinen BECCS-arvo 2 % alhaisempi hiilidioksidin kuljetushäviöiden takia). Hiilidioksidin saatavuus muuttuu hakkuutason muuttuessa (74 tai 64 Mm³) ja kun otetaan käyttöön korkeamman jalostusasteen teknologiat (Tech-skenaariot).

Jos oletetaan, että kaikki 100 % käyttöasteen skenaarioissa talteenotettu bioperäinen hiilidioksidi jalostetaan tuotteiksi BECCU-skenaarioissa, ovat tuotettavien vedyn, synteettisten polttoaineiden sekä muovituotteiden määrät useita miljoonia tonneja vuodessa (kuva 8). Mallinnuksessa tehdyillä oletuksilla ja tuotejakaumilla esimerkiksi synteettistä lentopolttoainetta (e-kerosiini, eli e-SAF) voitaisiin enimmillään tuottaa 2,6–3,8 Mt vuodessa, joka vastaa noin 2,7–3,9 Mtoe vuodessa. Jos tätä lukua verrataan Euroopan komission vuoden 2040 ilmastotavoitteen vaikutusarvioinnissa (Euroopan komissio 2024a) esitettyyn synteettisten polttoaineiden kysyntään (noin 5 Mtoe), se vastaisi noin 53–78 % EU:n synteettisten lentopolttoaineiden tarpeesta vuonna 2040. Maksimipotentiaalia rajoittavat kuitenkin sekä tuotannon sähkönkulutus että vaadittavat investoinnit, kuten raportin luvut 3.1.2 ja 3.1.3 osoittavat. Realistisemmalla hiilidioksidin 20 % käyttöasteella voitaisiin tuottaa noin 11–15 % ja 50 % käyttöasteella noin 27–39 % EU:n vuoden 2040 e-kerosiinitarpeesta. Suomella on siis mahdollisuus tuottaa merkittävä osa EU:n synteettisten lentopolttoaineiden tarpeesta vuonna 2040.



Kuva 8: Vedyn ja BECCU-tuotteiden määrät bioperäisen hiilidioksidin hyötykäyttöön keskittyvissä skenaarioissa hiilidioksidin eri käyttöasteilla. Oletuksena on, että 80 % talteenotetusta hiilidioksidista käytetään polttoaineisiin ja 20 % muoveihin. Kuvaan on merkitty mustalla katkoviivalla Euroopan komission arvioimaa 5 Mtoe e-kerosiinin kulutusta vastaava määrä megatonneina.

EU:ssa tuotettiin vuonna 2024 muoveja noin 55 Mt (PlasticsEurope 2025). Suomessa muoveja tuotetaan Tilastokeskuksen mukaan vuosittain noin 559 kt (Tilastokeskus 2024b). Borealisen Porvoon krakkerin vuosikapasiteetti on 430 kt eteeniä ja 263 kt propeenä (Borealis 2024). Polyolien tuotanto tässä tarkastelluissa skenaarioissa on 0,195–1,4 Mt vuodessa. Suomella olisi siis mahdollisuus tuottaa myös merkittävä määrä BECCU-muovia verrattuna tällä hetkellä tuotettavaan fossiilisten muovien määrään.

Lisäksi hiilidioksidin hyötykäyttöön liittyvissä BECCU-skenaarioissa syntyy elektrolyysereillä tuotetun vedyn sivutuotteena suuria määriä lämpöä, skenaariosta riippuen 4–29 terawattituntia vuodessa. Tätä voidaan verrata esimerkiksi kaukolämmön lämpötilakorjattuun kulutukseen Suomessa, joka oli vuonna 2025 noin 35 terawattituntia vuodessa (Energiateollisuus 2026a). Osa elektrolyyserien sivutuotelämmöstä voi olla mahdollista hyödyntää kaukolämpönä tai tehtaiden höyrynä lämpöpumppujen avulla, laitosten sijainnista riippuen. Sivutuotelämmön hyötykäyttömahdollisuuksia ei kuitenkaan ole erikseen arvioitu tässä tutkimuksessa, mutta sen on ajateltu toimivan lämmönlähteenä lämpöpumpuille. Sivutuotelämmön hyötykäyttö edelleen vähentäisi biomassan polton tarvetta.

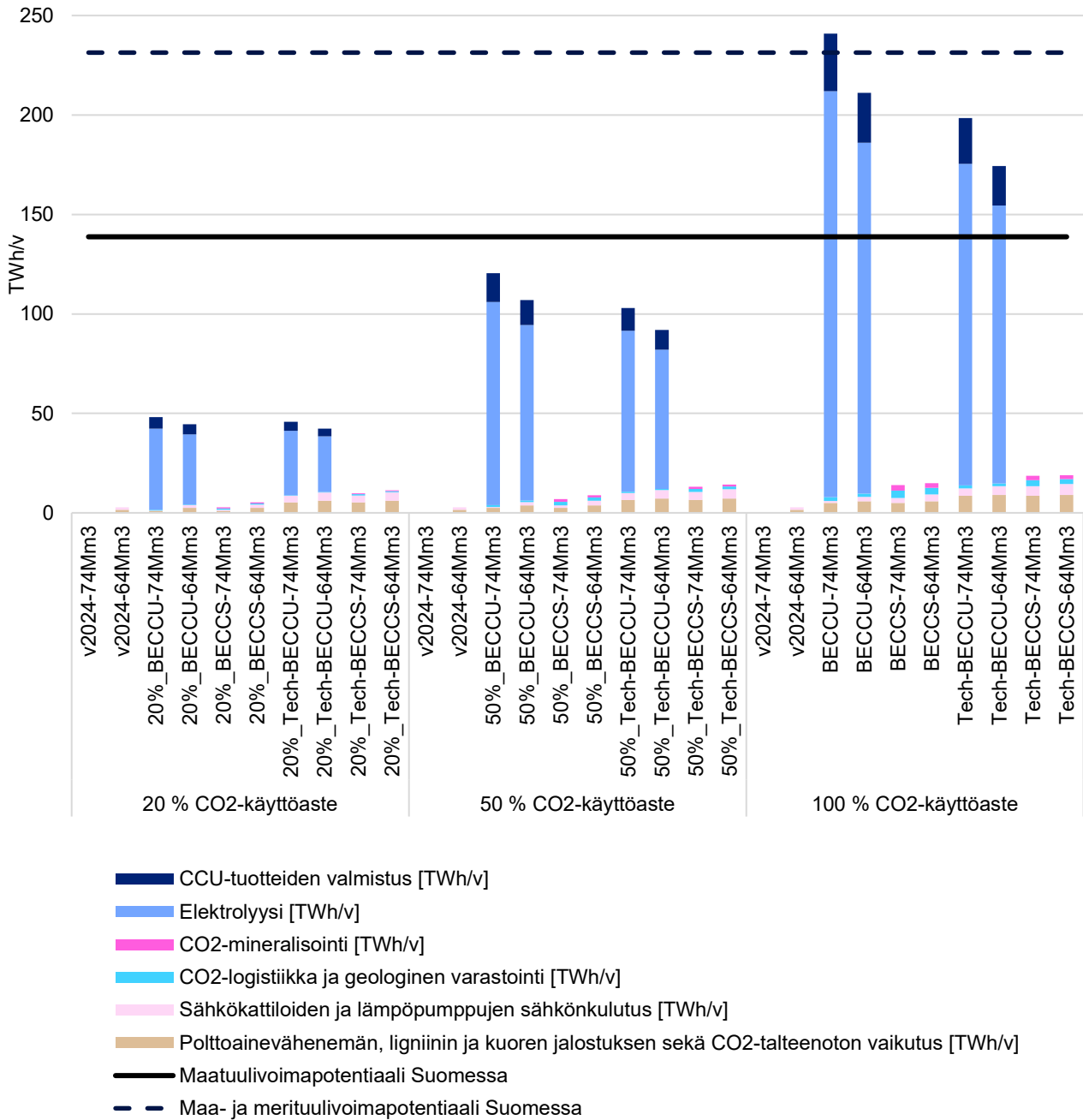
3.1.2 Lisääntynyt sähköntuotannon tarve

BECCU-tuotteiden valmistukseen tarvitaan vetyä, jota tuotetaan uusiutuvasta sähköstä elektrolyysereillä. Tarvittavan vetymäärän tuottaminen vaatisi merkittäviä määriä uusiutuvaa sähköä (kuva 9). Jos kaikki hiilidioksidin 100 % käyttöasteen skenaarioissa talteenotettu bioperäinen hiilidioksidi (19–28 Mt) halutaan jalostaa tuotteiksi, sähkön tarve pelkästään BECCU-ratkaisuille olisi noin 160–230 TWh vuodessa. Suomen sähkön kokonaiskulutus vuonna 2025 oli 85 TWh (Tilastokeskus 2026c). Kokonaissähkön kulutus siis vähintään kolminkertaistuisi, jos bioperäinen hiilidioksidi haluttaisiin kokonaisuudessaan käyttää BECCU-tuotteisiin. Tulosta voidaan verrata tuulivoiman maksimituotantopotentiaaliin Suomessa, jonka on arvioitu olevan noin 231 TWh, sisältäen myös merituulivoiman (perustuen maksimikapasiteetti-arvioihin Nurmio & Pakarinen 2024 julkaisussa).

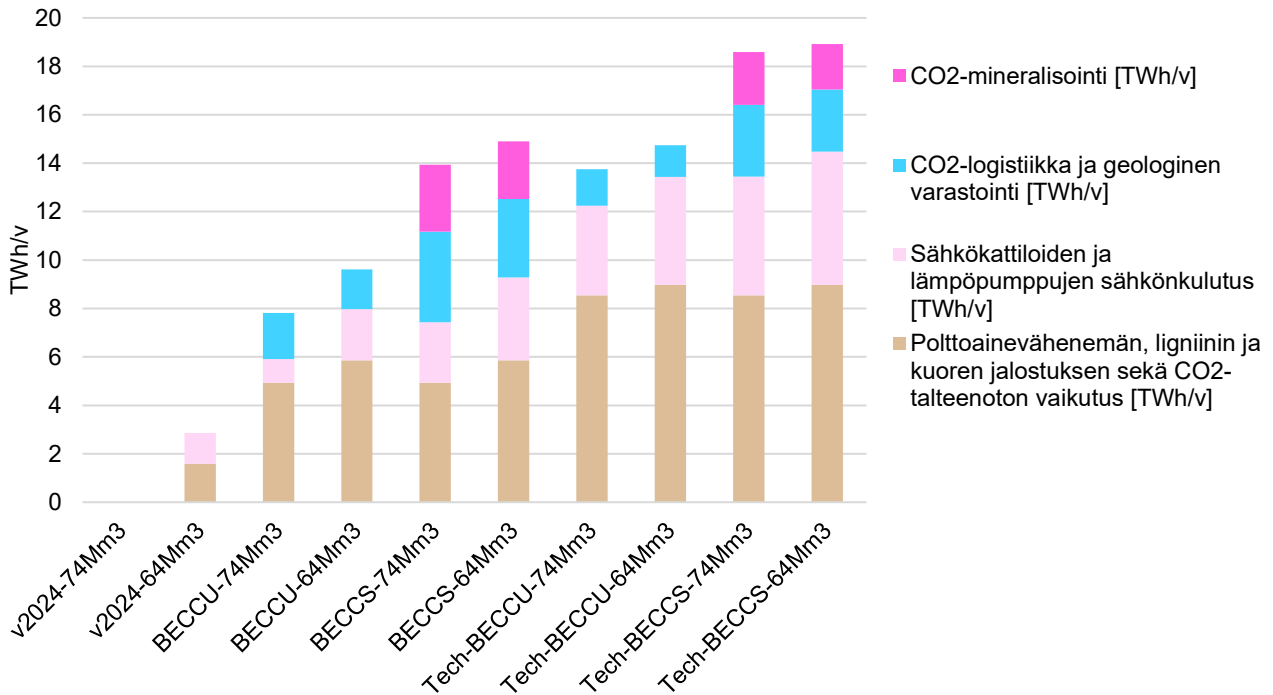
On siis todennäköistä, että koko talteen otettavissa olevaa hiilidioksidimäärää ei voida jalostaa BECCU-tuotteiksi Suomessa, sillä sähkön kysyntää lisäävät myös teollisuuden ja liikenteen sähköistyminen sekä datakeskukset. Jos hiilidioksidia kuitenkin talteenotettaisiin tässä mittakaavassa, osa bioperäisestä hiilidioksidista voitaisiin esimerkiksi myydä keski-Eurooppaan ja osa varastoida pysyvästi.

Hiilidioksidin 50 % käyttöasteen skenaarioissa vaadittaisiin 91–120 TWh, ja 20 % käyttöasteen skenaarioissa 42–48 TWh lisää sähköntuotantoa BECCU-tuotteiden jalostamiseksi.

Puun polton vähenemisestä ja hiilidioksidin talteenotosta johtuva sähköntuotantotarpeen lisäys vaihtelee enintään välillä 3–14 TWh vuodessa (kuva 10). Tech-skenaarioissa puun poltto vähenee metsäteollisuuden korkeamman jalostusarvon tuotteiden valmistuksen seurauksena ja lisäksi suora puun poltto lämmityssektorilla on korvattu sähkökattiloilla. Suoran puun polton vähenemisen seurauksena sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen aiheuttamaa sähkönkulutuksen lisäystä lämmityssektorilla, enimmillään noin 5,5 TWh, voidaan pitää hyvin kohtuullisena, sillä sähkökattiloiden sähkönkulutus lämmitykseen Suomessa on ollut 2,8 TWh jo vuonna 2025 (Fingrid 2026, Energiateollisuus 2026a). BECCU-skenaarioissa osa tai kaikki tästä tarpeesta olisi mahdollista korvata myös elektrolyyserien hukkalämmöllä, mitä ei tässä työssä ole tarkemmin analysoitu. Tämän lisäksi tulisi kuitenkin kattaa enintään noin 9 TWh vaje metsäteollisuudesta ulos myytävän sähkön tuotannossa. Esimerkiksi Fingridin vetyskenaariossa kaukolämmöntuotannon sähkön tarve kasvaa 16 TWh vuoteen 2040 mennessä (Fingrid 2025).



Kuva 9: BECCU- ja BECCS-ratkaisujen sekä puun ja sivutuotevirtojen polton vähentämisen vaatima sähköntuotannon lisätarve tarkastelluissa skenaarioissa. Vertailukohtana on tuuli- ja aurinkovoimapotentiali Suomessa.



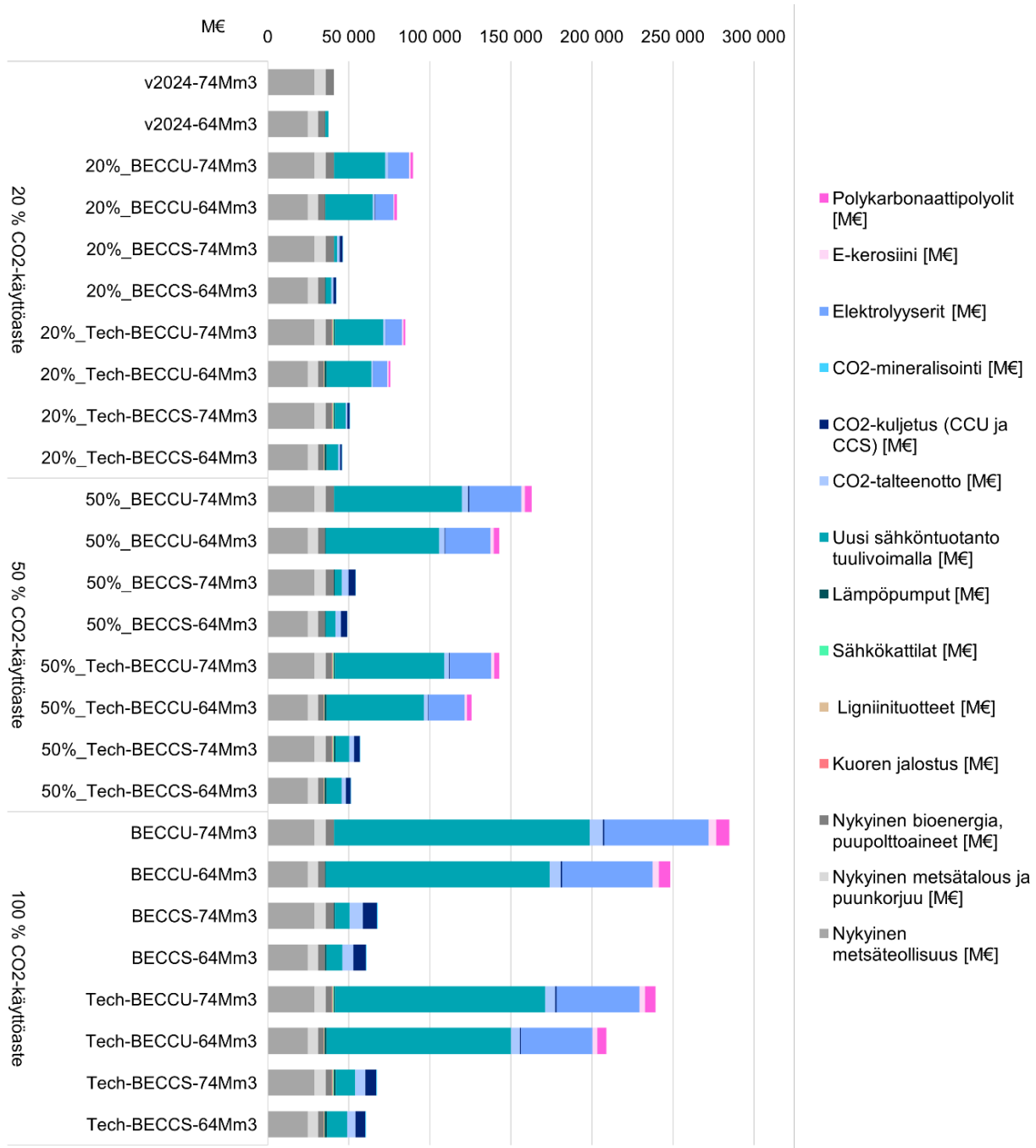
Kuva 10: Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin sekä puun ja sivutuotevirtojen polton vähentämisen luoma sähköntuotannon lisätarve enimmillään, kun 100 % hiilidioksidista hyödynnetään.

3.1.3 Investoinnit ja arvonlisäys

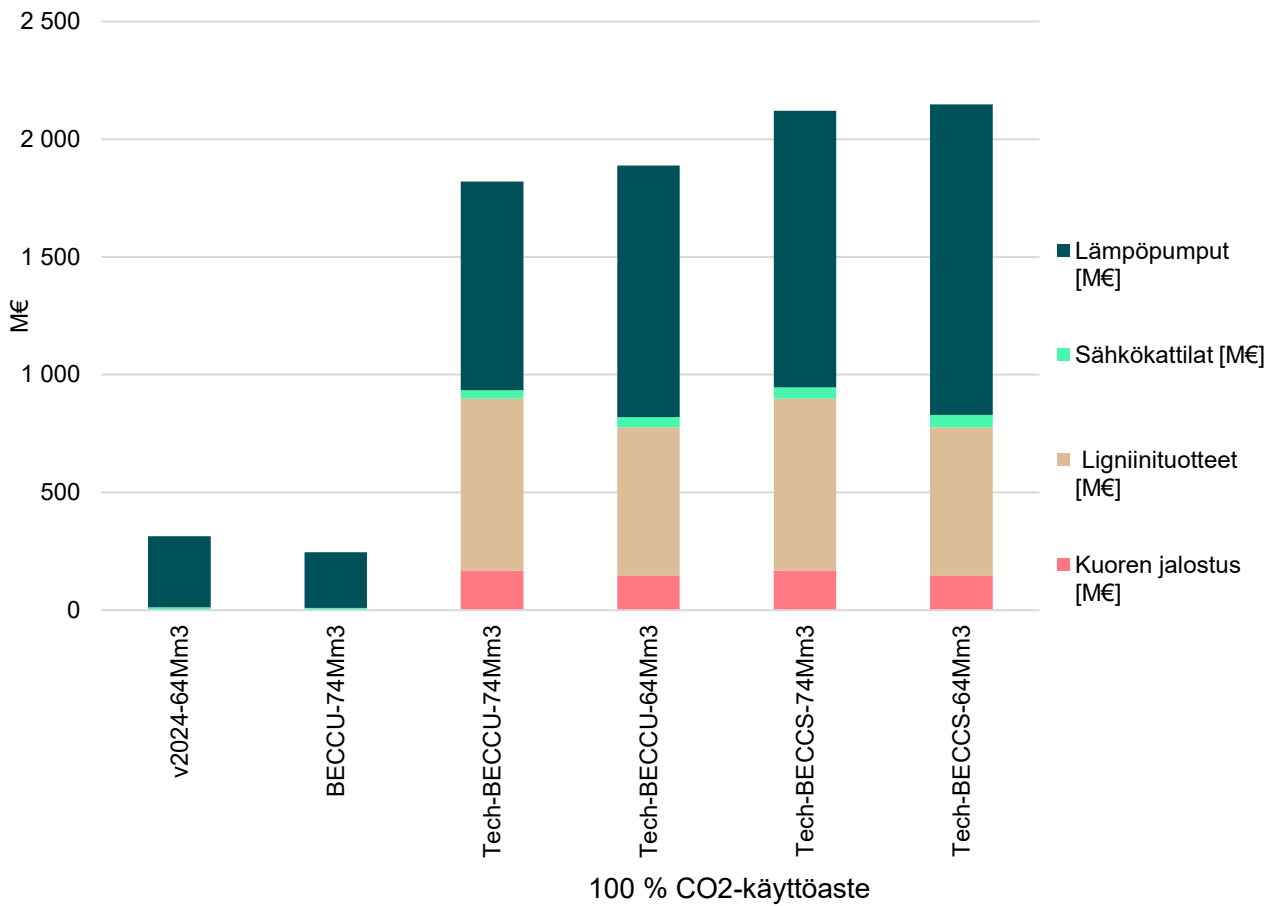
Edellä esitettyjen skenaarioiden toteutuminen vaatii merkittäviä investointeja uusiutuvan sähkön tuotantoon, elektrolyysereihin, ja BECCUS-prosesseihin (kuva 11). Lisäksi tarvitaan maltillisempia investointeja metsäteollisuuden uusien tuotteiden tuottamiseen sekä sähkökattiloihin ja lämpöpumppuihin (kuva 12). Uusiin teknologioihin ja sähköistymiseen tarvittavaa investointimäärää on tässä suhteutettu metsäteollisuuden ja bioenergian nykyisen tuotannon ylläpitämiseksi vuosittain tehtäviin investointeihin (laskettu vuosien 2021–2023 keskiarvona, ks. tarkempi kuvaus liitteessä 4). Kuva 11 esittää tarvittavat investoinnit kumulatiivisesti 15 vuoden ajalle. Tuloksesta nähdään siis 15 vuotta nykyisen tason investointeja nykyteollisuuden kapasiteetin ylläpitämiseksi ja skenaarioiden mukaiset investoinnit uusiin teknologioihin vuoteen 2040 mennessä.

Merkittävimmät investoinnit kohdistuvat BECCU-skenaarioihin ja uusiutuvan sähkön tuotannon lisäämiseen (tässä tuulivoima) sekä vedyn tuotantoon tarvittaviin elektrolyysereihin. Skenaarioissa on laskennan yksinkertaistamiseksi oletettu tuulivoimatuoantanto maatuulivoimaksi, mutta kuten kuva 9 osoittaa, hiilidioksidin 100 % käyttöasteen skenaarioissa tarvittaisiin merkittäviä investointeja myös merituulivoimaan. Tällöin, riippuen merituulivoiman kustannusten kehityksestä, investoinnit (ja toisaalta myös arvonlisäys) nousisivat entisestään. Lisäksi investointeja tarvittaisiin sähkön jakeluinfraan, kuten kantaverkon sekä paikallisten jakeluverkkojen vahvistamiseen, mitä ei tässä tutkimuksessa ole huomioitu. BECCS-skenaarioiden investointitarpeet ovat huomattavasti BECCU-skenaarioita maltillisemmat, ja vastaavasti myös arvonlisäys jää pienemmäksi.

Kuva 12 esittää hiilidioksidin 100 % käyttöasteen skenaarioiden investointeja muihin kuin BECCU-ratkaisuihin, eli metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteisiin sekä lämmön tuotannon sähköistymiseen. Metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden vaatimat investoinnit näyttävät maltillisina, myös verrattaessa nykyteollisuutta ylläpitäviin investointeihin.

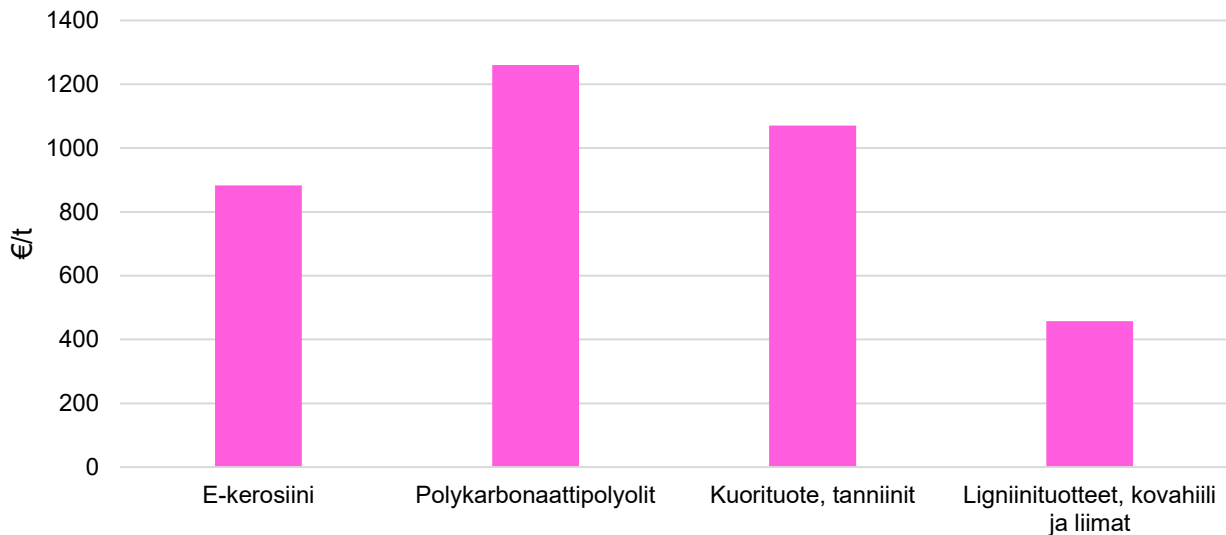


Kuva 11: Kumulatiiviset investoinnit eri hiilidioksidin käyttöasteilla tuoteryhmittäin 2026–2040. Erityisesti BECCU-skenaariot vaativat merkittäviä investointeja.



Kuva 12: Kumulatiiviset investoinnit sähköistymiseen sekä metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteisiin näyttäytyvät maltillisina. Kuvasta puuttuu eriteltynä lämmityksen sähköistymisen aiheuttaman sähkön lisätarpeen investoinnit (sisältyvät kuvan 10 tuulivoimainvestointeihin).

Tuotteista saatavaan arvonlisäykseen vaikuttaa tuotteesta saatava hinta, tuotteen tuotantokustannukset ja skenaarion määräämä tuotannon volyyymi. Tulokset ovat hyvin riippuvaisia näistä oletuksista. Kuva 13 esittää tuotteista saatavat arvonlisäykset per tonnia tuotetta, tässä oletetuilla hinnoilla. E-bensiinin arvonlisäystä ei tässä esitetä erikseen, sillä se on käsitelty e-kerosiinin sivutuotteena. Myös ligniinituotteet, kovahiili ja liimat, on laskennassa käsitelty yhdessä, ja kuvassa näkyy niiden oletetuilla tuotantomäärillä painotettu arvonlisäys.



Kuva 13: Arvonlisäys per tonnia tuotetta, kun tuotteista saadaan taulukossa 3 oletetut hinnat.

Kuva 14 esittää tarkasteltujen skenaarioiden arvonlisäykset taulukossa 3 oletetuilla tuotehinnoilla. Vertailuna on arvioitu nykyisen metsäteollisuuden ja bioenergiantuotannon arvonlisäystä toimialakohtaisen kansantalouden vuositilipidon perusteella. Yhtä lukuun ottamatta kaikissa skenaarioissa kokonaisarvonlisäys on nykytilaa suurempi, kun metsäteollisuudessa otetaan käyttöön BECCUS-tekniikoita ja tuotetaan korkeamman jalostusasteen tuotteita. Tämä pätee myös matalammalla hakkuutasolla. Ainoa skenaario, joka tuottaa nykyistä alhaisemman arvonlisän yhdistää matalamman hakkuutason ja hiilidioksidin 20 % käyttöasteen pelkästään BECCS-ratkaisujen kanssa (20%_BECCS-64Mm³).

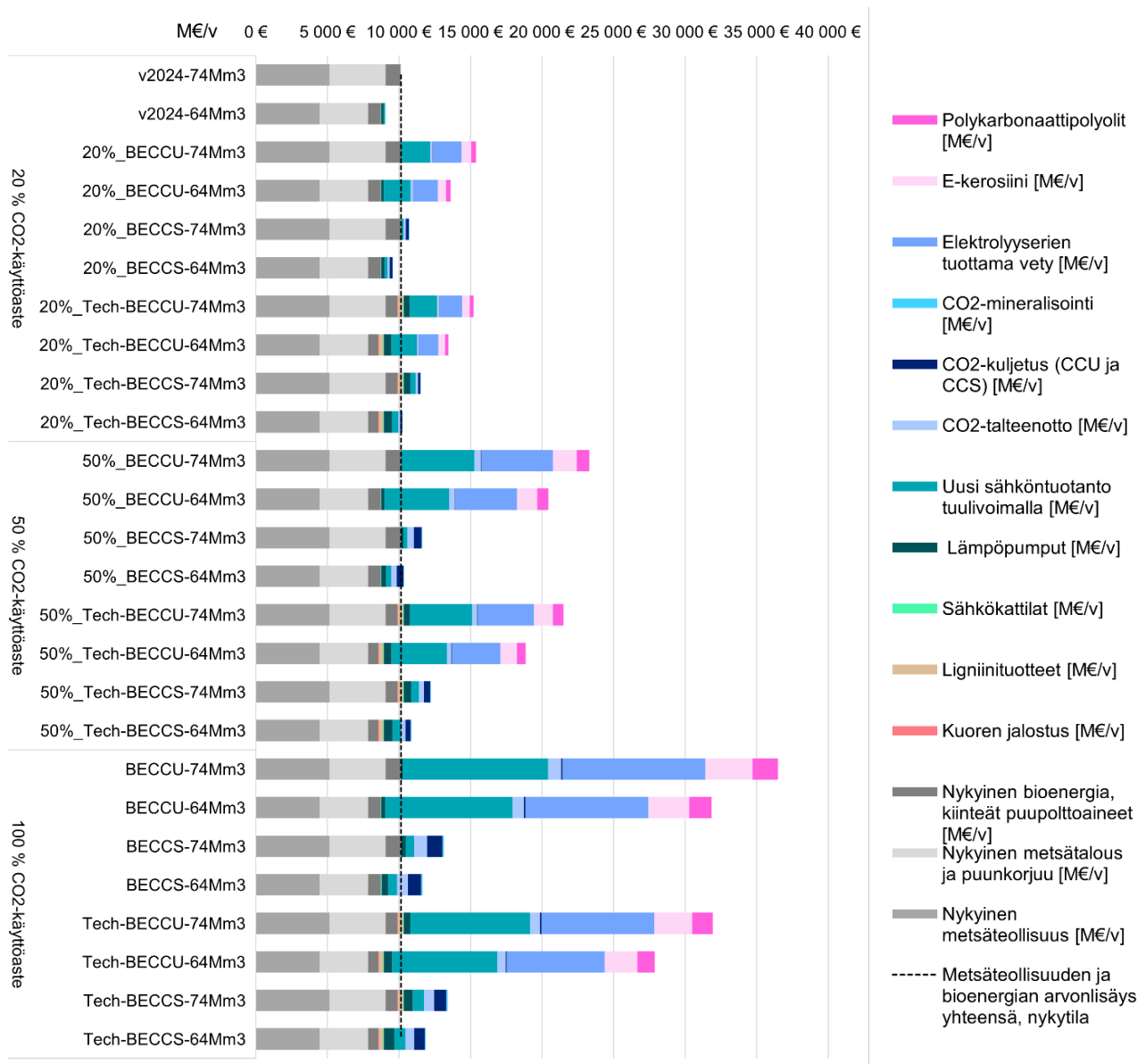
Maltillisilla investoinneilla saavutettava metsäteollisuuden korkeamman jalostusarvon tuotteiden arvonlisäys on skenaariosta riippuen noin 350–400 M€ vuosittain. BECCUS-ratkaisujen arvonlisäys on 280–1 200 M€ 20 % hiilidioksidin käyttöasteella, 710–3 050 M€ 50 % käyttöasteella ja 1 420–6 100 M€ 100 % käyttöasteella vuosittain riippuen skenaariosta. Uusiutuvan sähkön lisätuotannon arvonlisäys on 120–8 900 M€/v ja elektrolyyssillä tuotettavan vedyn arvonlisäys BECCU-skenaarioissa on 1 360–9 970 M€/v. Arvonlisäys on merkittävä BECCU-skenaarioissa, joissa tuotetaan suuria määriä BECCU-polttoaineita ja -muoveja. Kuten aiemmin on todettu, 100 % CO₂-käyttöasteen BECCUS-skenaarioiden arvonlisäyksen toteutumista rajoittaa sähkön saatavuus Suomessa. Lisäksi kehitystä rajoittavat vaaditut investoinnit.

Tech-BECCU-skenaarioiden arvonlisäys jää alhaisemmaksi kuin BECCU-skenaarioiden, koska hyödynnetty hiilidioksidimäärä on pienempi ligniinin ja tanniinituotteiden tuotannon takia. Tarkastelussa ei ole huomioitu sitä, että todellisuudessa ligniini- ja tanniinituotteet voivat päätyä elinkaarensa päättyessä polttoon, jolloin hiilidioksidi olisi käytettävissä BECCUS-ratkaisuihin esimerkiksi jätteenpolttosektorilla (osin Suomen ulkopuolella).

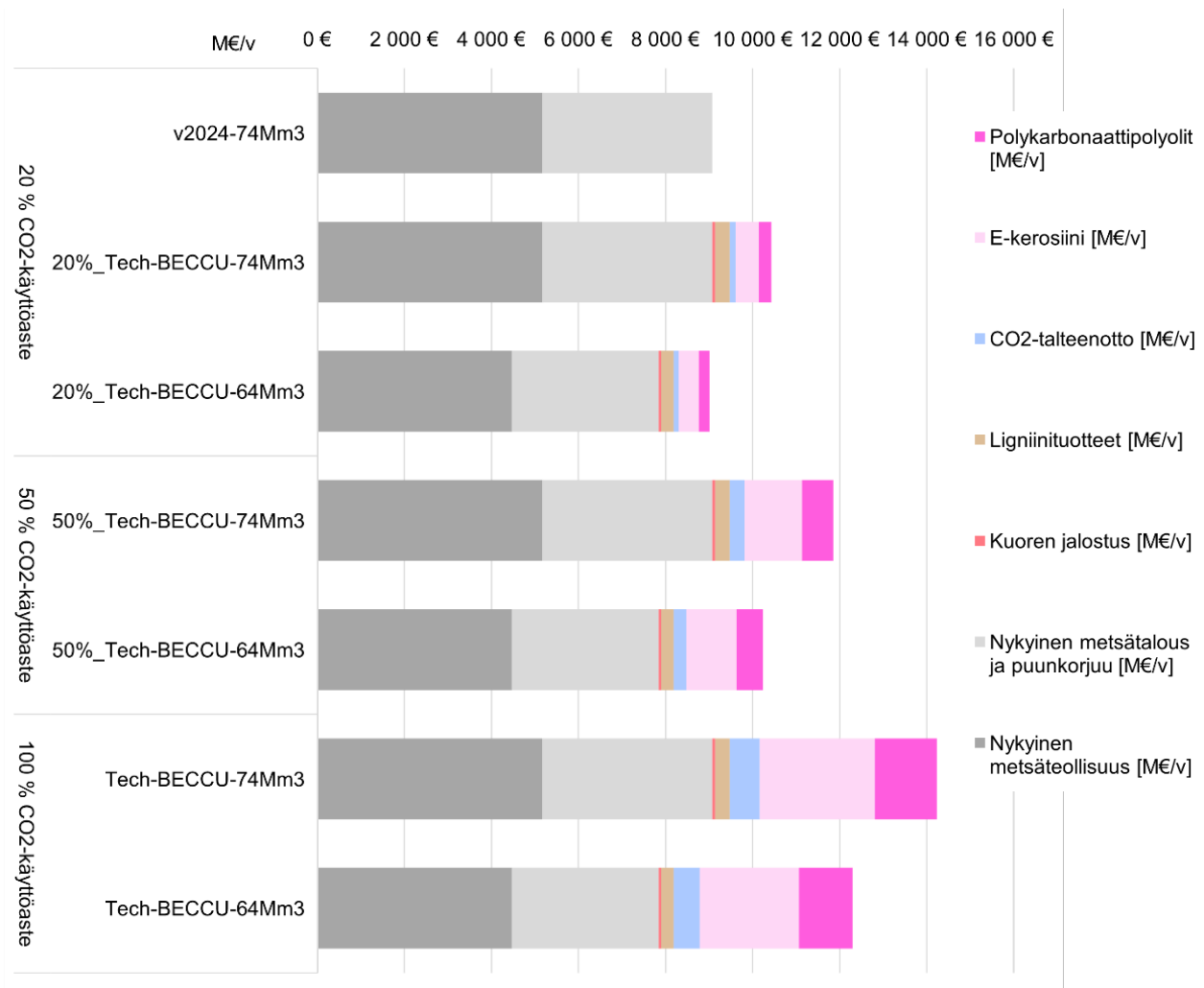
Vaikka BECCUS-ratkaisut ja metsäteollisuuden korkeamman jalostusasteen tuotteet esitetään tässä osana samoja skenaarioita, niiden toteutuminen ei riipu toisistaan. Kunkin teknologian käyttöönoton laajuuden määrittää lopulta sen itsenäinen kannattavuus ja tuotteiden vetovoima. Tämä pätee myös jakoon BECCS- ja BECCU-ratkaisujen välillä. Pylväiden kokonaiskorkeus ei siis tässä indikoi tuotteiden tulevaa kysyntää markkinoilla, eikä kannattavuutta tai skenaarioiden paremmuutta suhteessa toisiinsa.

Skenaariossa v2024-64Mm³, jossa hakkuut alenevat, mutta uusiin arvonlisätuotteisiin ei investoida, nykysteollisuuden arvonlisäyksen arvioidaan vähenevän vastaavassa suhteessa kuin hakkuut alenevat. Tämä vastaa metsäsektorin arvonlisäyksessä noin 13,5 % eli noin 1,4 Mrd.€ laskua.

Kuva 15 esittää arvonlisäyksen kehitystä erityisesti metsäsektorin tuotteille, olettaen että metsäsektori itse jalostaisi myös BECCU-tuotteita. Kuvasta nähdään, että BECCU-tuotteiden arvonlisäys alemmilla ja alkuvaiheessa todennäköisemmillä hiilidioksidin käyttöasteilla on paremmin verrattavissa muihin metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteisiin. Kuvasta on jätetty pois BECCU-tuotteiden vaatiman uuden sähkön ja vedyn tuotannon arvonlisäys.

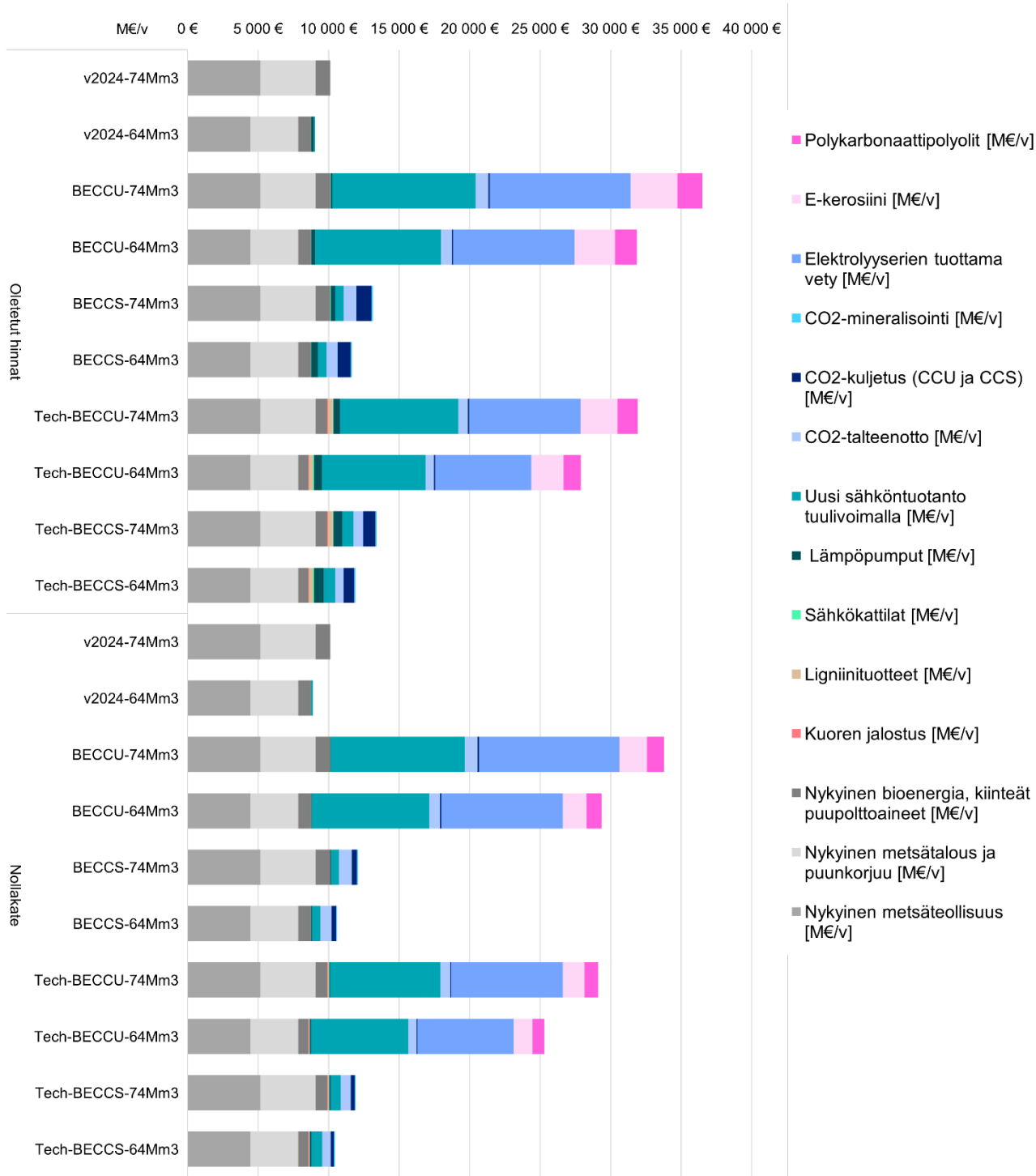


Kuva 14: Arvonlisäys tuoteryhmittäin, kun tuotteille oletetaan taulukon 3 markkinahinnat. Vertailukohtana on metsäteollisuuden ja bioenergiatuotannon nykyinen arvonlisäys. Skenaarioiden saavuttaman arvonlisäyksen suuruuteen vaikuttaa laskentaoletusten lisäksi tuotteen volyymi, esimerkiksi BECCU-tuotteita valmistetaan skenaarioissa suuria määriä verrattuna metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteisiin.



Kuva 15: Talteenotetun hiilidioksidin hyödyntämisen vaikutus metsäsektorin arvonlisäykseen. Vertailukohtana on metsäteollisuuden nykyinen arvonlisäys.

Koska yllä esitetyt arvonlisäykset ovat hyvin riippuvaisia tuotteille oletetuista hinnoista, on arvonlisäys laskettu myös nollakatteella (kuva 16), eli olettaen, että tuotteesta saatava hinta kattaa vain tuotannon kustannukset. Arvonlisäys vähenee erityisesti ligniini- ja tanniinituotteissa, joille on pienemmän volyymin tuotteena oletettu kirjallisuusarvioihin pohjaavat tuotantokustannuksia korkeammat hinnat. BECCU-lopputuotteiden arvonlisäys vähenee hieman, sillä niille edellä oletettu kateprosentti oli 10 %. Samoin uuden sähköntuotannon arvonlisäys alenee vain hieman. Elektrolyyserien tuottaman vedyn arvonlisäys ei vähene, sillä sille ei alun perinkään oletettu katetta, vaan kate kohdistettiin BECCU-lopputuotteille.

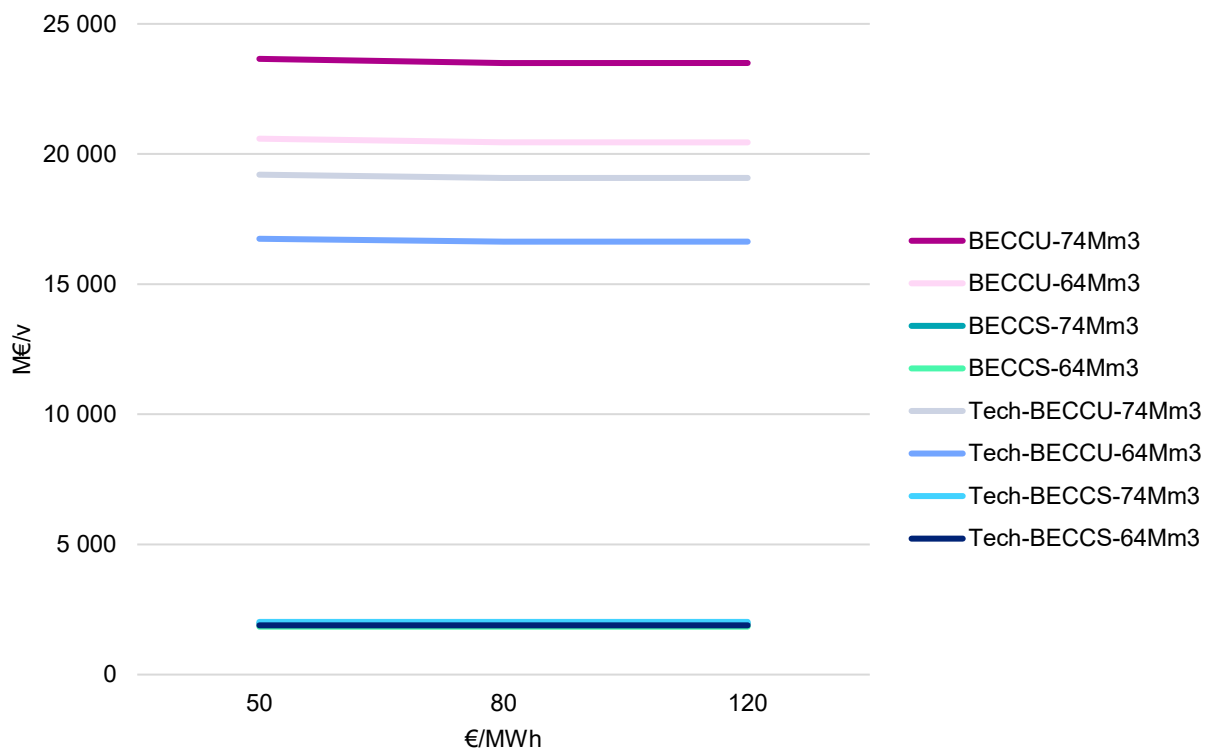


Kuva 16: Hiilidioksidin 100 % käyttöasteen skenaarioiden arvonlisäys tuoteryhmittäin; ylhäällä taulukossa 3 oletetuilla hinnoilla ja alhaalla nollakatteella.

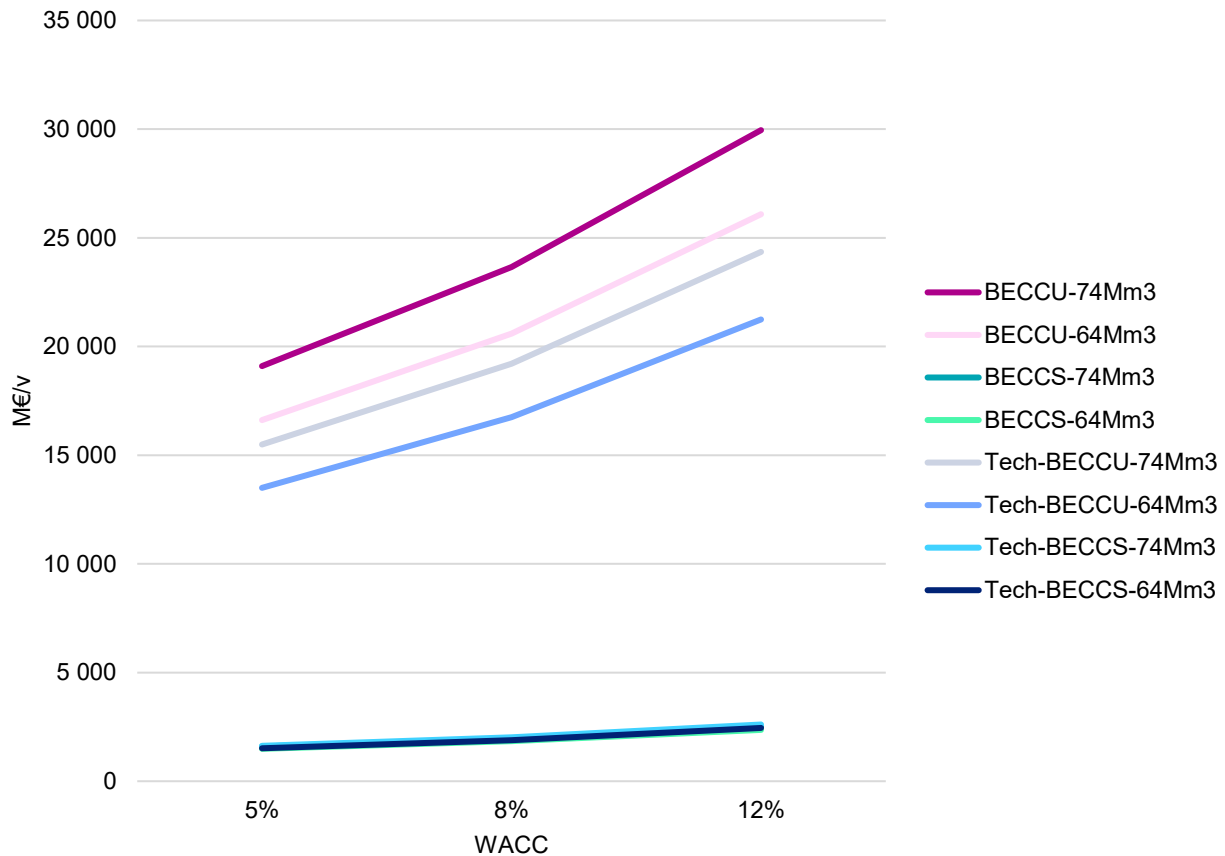
3.1.4 Herkkyystarkastelut

Skenaarioiden herkkyyttä tehdyille laskentaoletuksille on kuvattu sähkön hinnan sekä painotetun keskimääräisen pääomakustannuksen osalta. Herkkyystarkastelut tehtiin nollakateskenaarioille, joissa tuotteiden hinta reagoi tuotantokustannusten muutokseen (toisin kuin skenaarioissa, joissa hinta on oletettu esim. kirjallisuuden pohjalta). Sähkön hinnan vaikutus skenaarioiden arvonlisäykseen on kokonaisuudessaan pieni (kuva 17). Tämä johtuu siitä, että myös tuotantokustannukset muuttuvat sähkön hinnan noustessa, ja toisaalta tuotteesta saatava hinta on tässä tehdyin oletuksin sidottu tuotantokustannuksiin.

Pääomakustannusten muutos sen sijaan vaikuttaa tuloksiin erityisesti pääomaintensiivisten BECCU-skenaarioiden osalta (kuva 18). Kun WACC nousee, niin myös pääomakustannukset nousevat. Tällöin myös sekä tuotteiden hinnat että arvonlisäykset nousevat. Vaikutus on pienempi BECCS-skenaarioihin, joissa vaaditaan merkittävästi pienempiä investointeja.



Kuva 17: Skenaarioiden arvonlisäyksen herkkyys sähkön hinnalle laskettuna nollakate-skenaarioille. (Arvonlisäyksestä on tässä poistettu nyky metsäteollisuuden arvonlisäys.) Oletuksena tässä raportissa oli 50 €/MWh.



Kuva 18: Maksimiskenaarioiden arvonlisäyksen herkkyys oletetulle painotetulle keskimääräiselle pääomakustannukselle, laskettuna nollakateskenaarioille. (Arvonlisäyksestä on tässä poistettu nykymetsäteollisuuden arvonlisäys.) Oletuksena tässä raportissa oli WACC 8 %.

3.2 ENVIMATSCEN-MALLINNUKSEN TULOKSIA

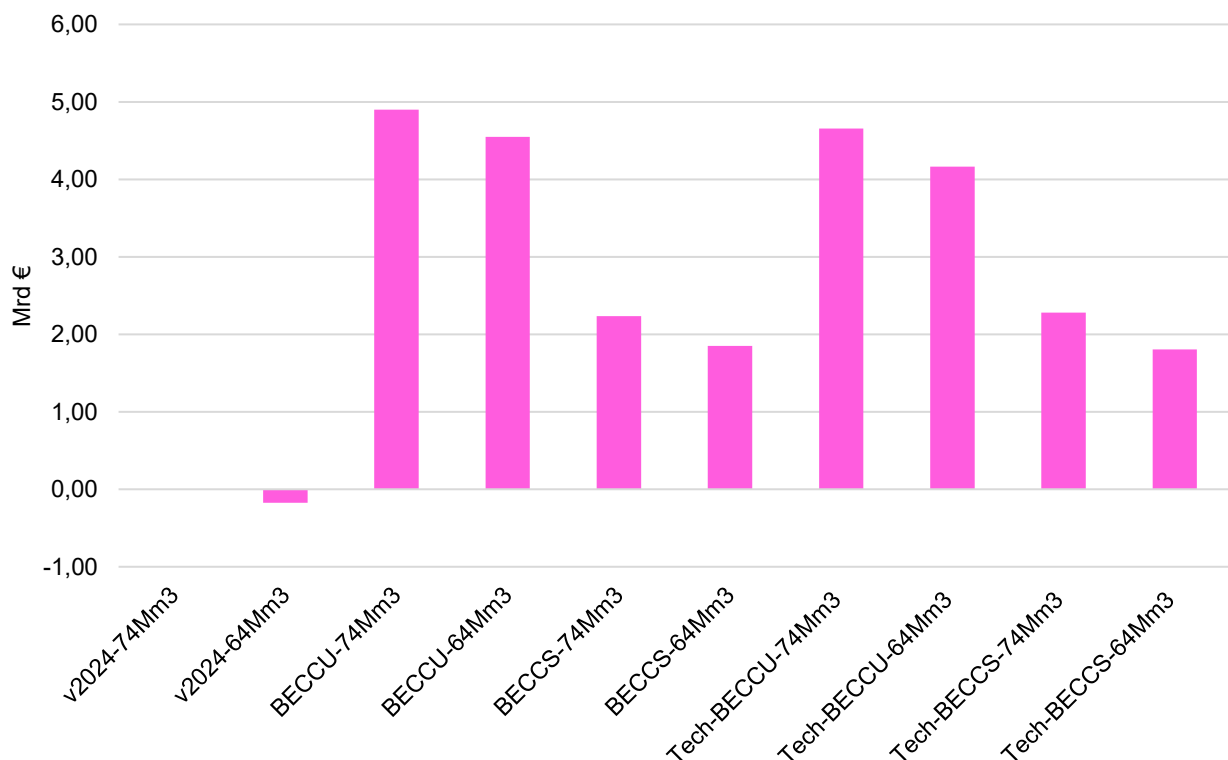
Arvoketjutarkastelua täydennettiin ENVIMATscen-mallilla toteutetulla kokonaistaloudellisella mallinnuksella. Tarkasteltaviksi indikaattoreiksi valittiin bruttokansantuote (BKT), joka on yleisesti käytetty taloudellisen toiminnan tason mittari, työllisyys sekä ympäristövaikutuksista alueperäiset kasvihuonekaasupäästöt. Tulokset kuvaavat maksimiskenaarioita, eli 100 % CO₂-käyttöastetta.

Skenaarioiden vaikutus bruttokansantuotteeseen on esitetty kuvassa 19. BKT markkinahintaan kuvaa yhden vuoden osalta kotimaisten tuotantoyksiköiden tuotannon kokonaisarvon, ja se muodostuu toimialojen arvonlisäysten summasta lisättyinä tuoteveroilla ja vähennettynä tuotetukipalkkioilla. Päähavainto on, että koko kansantalouden tasolla talousvaikutukset jäävät huomattavasti maltillisimmiksi verrattuna edellä arvioituihin arvoketjujen potentiaaliin 100 % CO₂-käyttöasteen arvonlisävaikutuksiin. Skenaarioiden väliset erot ovat suurimmillaankin viiden miljardin luokkaa. Maltillisempia tuloksia selittää mallin huomioimat erilaiset talouden rajoitteet, keskeisimpinä käytettävissä olevan työvoiman määrä sekä pääomarajoite (toimialojen kasvun vaatimat investoinnit täytyy rahoittaa taloudessa syntyvillä tuloilla, ja talouden säästämisen ja investointien on oltava tasapainossa). Kaikissa skenaarioissa oletetaan toteutuvan sama tasapainotyöttömyysaste eli kokonaistyöllisyys säilyy samana. Skenaarioiden toimenpiteistä seuraa erityisesti metsä-, kemia- ja energiateollisuuden tuotannon kasvua, mutta rajallisten resurssien vuoksi se syrjäyttää talouden

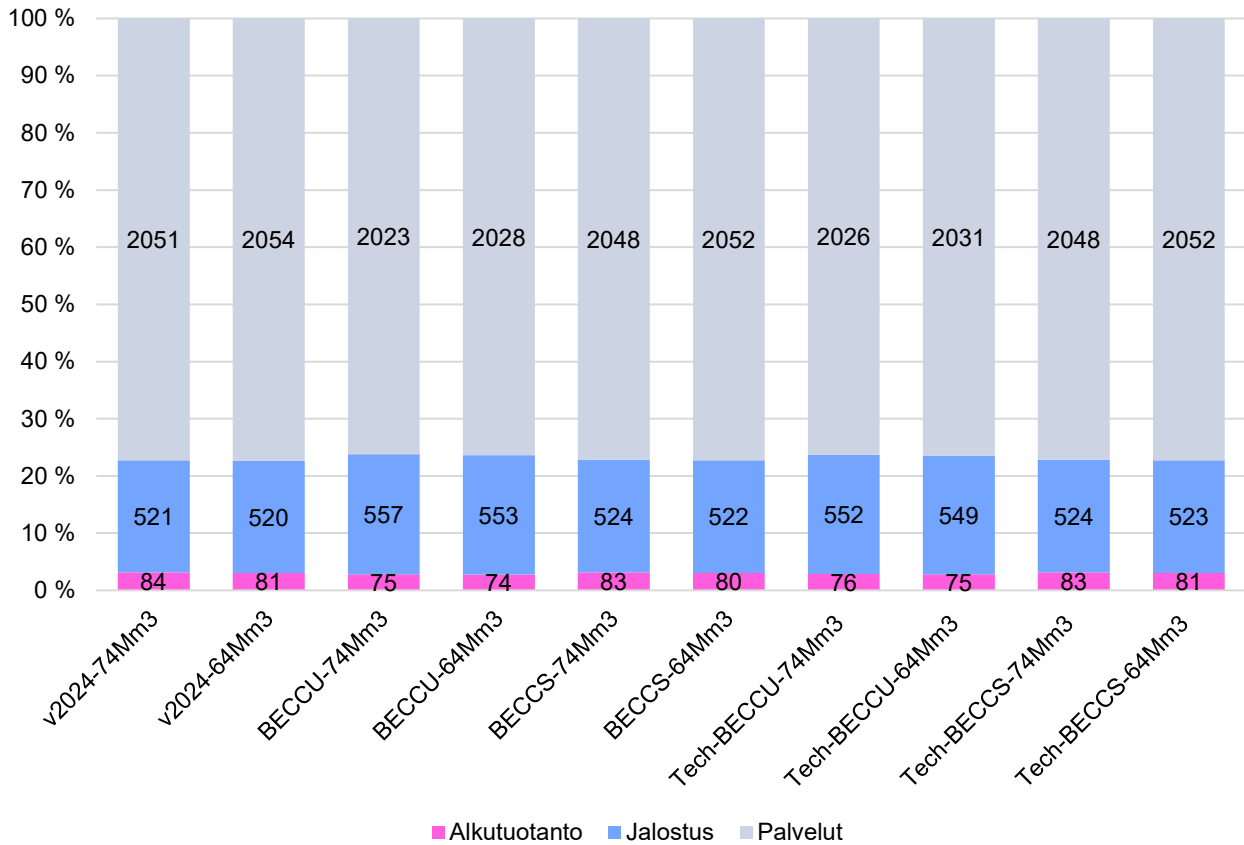
tasapainossa muuta tuotantoa. Kyseessä on kuitenkin korkeamman arvonlisän tuotanto, jolloin nettovaikutus on positiivinen.

Kaikissa BECCU- tai BECCS-prosessin sisältävissä skenaarioissa havaitaan selvästi positiiviset BKT-vaikutukset verrattuna nykyteknologiaa mukaileviin kahteen ensimmäiseen skenaarioon. Korkein BKT saavutetaan BECCU-skenaarioissa, joissa tuotetaan maksimaalinen määrä korkean arvonlisän BECCU-tuotteita. Tech-BECCU-skenaarioissa tuotteisiin hyödynnettävä hiilidioksidin määrä on oletettu mallinnuksessa pienemmäksi, mutta skenaariot sisältävät metsäteollisuuden korkeamman jalostusarvon tuotteiden tuotantoa, ja skenaarioissa saavutetaankin lähes yhtä suuri BKT-vaikutus kuin BECCU-skenaarioissa. Verratessa kahta eri hakkuutasoa, 64 milj. m³ hakkuutason skenaarioissa BKT-vaikutukset jäävät hieman vastaavaa 74 milj. m³ hakkuutason skenaariota alhaisemmaksi, mutta erot ovat suhteellisen pieniä. Suurempi vaikutus tuloksiin on varsinaisilla mallinnetuilla toimenpiteillä, ei hakkuutasolla. Kun verrataan nykyisen hakkuutason skenaariota (v2024-74Mm3), ja skenaariota, jossa on alempi hakkuutaso eikä tehdä investointeja uusiin arvonlisätuotteisiin (v2024-64Mm3), on kansantalouden tasolla BKT-vaikutus noin -0,2 mrd. €. Pelkästään metsäsektoria tarkastellessa arvonlisäyksen lasku on noin 0,9–1,1 mrd. € (liite 5). BKT-vaikutus jää pienemmäksi, sillä talouden uudessa tasapainossa muilla toimialoilla tapahtuu kasvua kokonaistyöllisyyden pysyessä samana.

Kokonaistyöllisyys säilyy kaikissa skenaarioissa samana, mutta työvoima kohdentuu toimialoille eri tavoin (kuva 20). Teollisuuden osuus kasvaa kaikissa BECCU- ja BECCS-skenaarioissa verrattuna nykyteknologian mukaisiin skenaarioihin, kaikista voimakkaimmin BECCU-skenaarioissa, joissa kasvua tapahtuu erityisesti kemianteollisuudessa.

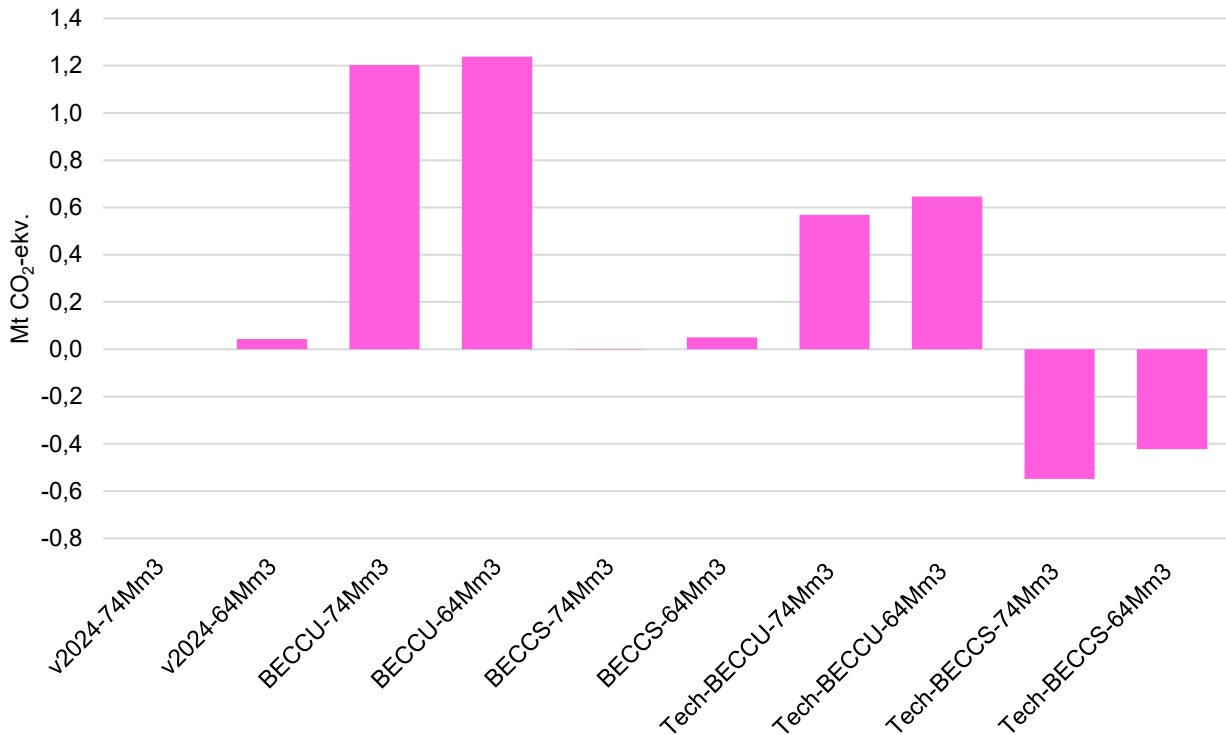


Kuva 19: Maksimiskenaarioiden vaikutus bruttokansantuotteeseen vuoden 2015 hinnoin, skenaario v2024-74Mm3 vertailukohtana.



Kuva 20: Työllisten (htv) kohdentuminen taloudessa (%) eri 100 % CO₂-käyttöasteen skenaarioissa.

BKT:n ja työllisyyden lisäksi ENVIMATscen-mallilla tarkasteltiin, miten mallinnetut toimenpiteet heijastuvat kasviuonekaasupäästöihin koko talouden tasolla (kuva 21). Tarkastelussa ovat Suomen alueperäiset kasviuonekaasupäästöt, jotka kuvaavat Suomen rajojen sisäpuolella ihmisen toiminnasta syntyviä kasviuonekaasupäästöjä. Luvuissa ei ole mukana LULUCF-sektorin päästöjä tai nieluja, BECCU-tuotteiden korvausvaikutuksia eikä BECCS-nieluja, jotka on arvioitu erikseen luvuissa 3.3 ja 3.4.



Kuva 21: Maksimiskenaarioiden vaikutus Suomen alueperäisiin kasvihuonekaasupäästöihin, pl. LULUCF-sektori ja teknologiset nielut (BECCS), skenaario v2024-74Mm3 vertailukohtana.

Skenaarioiden väliset erot kasvihuonekaasupäästöissä heijastavat talouden rakenteessa ja toimialojen tuotantovolyyymeissä tapahtuvia muutoksia. Päästöintensiivisempien toimialojen osuuden kasvu kasvattaa kokonaispäästöjä. Korkeamman talouskasvun BECCU-skenaarioissa myös talouden KHK-päästöt asettuvat korkeammalle tasolle. Näissä skenaarioissa teollisuuden toimialojen osuus kokonaistuotoksesta kasvaa voimakkaimmin. Päästöintensiivisempien toimialojen tuotannon kasvu syrjäyttää vähemmän päästöjä aiheuttavien toimialojen (monet palvelutoimialat) tuotantoa talouden tasapainon ratkaisussa.

Vertailtaessa kahden eri hakkuutasen skenaarioita keskenään havaitaan, että päästöt ovat lähes samaa tasoa. Näiden skenaarioiden väliset erot heijastuvat erityisesti LULUCF-sektorille, jonka luvut eivät ole mukana kuvassa 21. Huomionarvoista on, että Tech-BECCU-skenaarioissa päästöt ovat alhaisemmat verrattuna vastaaviin BECCU-skenaarioihin, joihin ei ole sisällytetty ligniinin ja kuoren materiaalihyödyntämistä. Vastaava havainto koskee BECCS- ja Tech-BECCS-skenaarioiden vertailua.

Ligniinin ja kuoren materiaalihyödyntämisen sisältäviä Tech-skenaarioita puoltaa potentiaali alhaisempiin päästöihin verrattuna BECCU- tai BECCS-skenaarioihin, joissa oletetaan maksimaalinen hiilidioksidin hyödyntäminen tuotteina tai varastoituna hiilidioksidina, BKT-vaikutusten ollessa lähes samat. Lisäksi Tech-skenaarioilla on potentiaalia samaan aikaan saavuttaa resurssien tehokkaampaa käyttöä ja huomioida näin kiertotalousnäkökulmaa. Tarkempi resurssien käytön tarkastelu on rajattu kuitenkin tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

3.3 TUOTEKOHTAISET ILMASTOVAIKUTUKSET

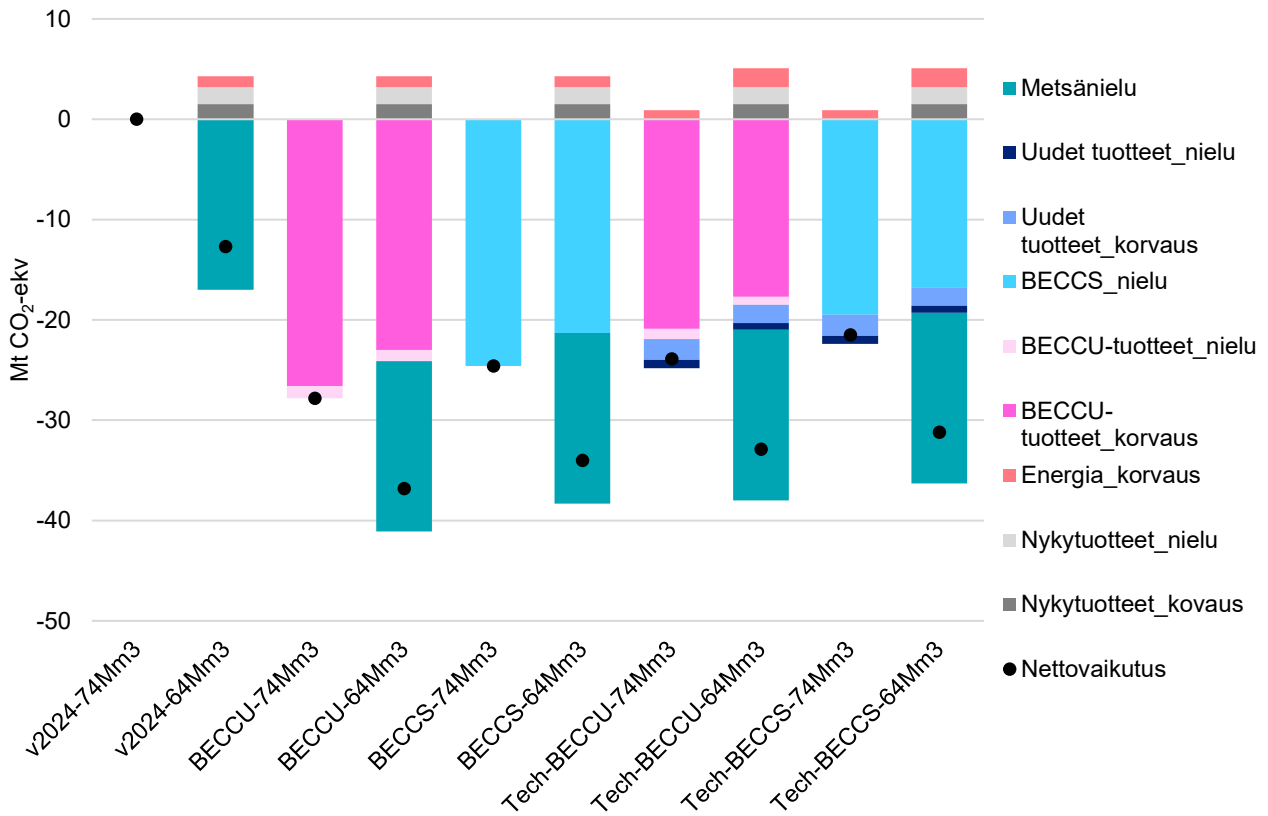
Työssä on tutkittu skenaarioiden ilmastovaikutuksia erityisesti maankäyttösektorin nielun, teknologisen nielun ja korvaushyötyjen osalta (kuva 22). Ilmastovaikutustulokset esitetään maksimiskenaarioille, eli 100 % CO₂-käyttöasteella. Ilmastovaikutuksia aiheutuu nielun muutoksista (metsänielu ja teknologiset nielut eli BECCS), uusien ja olemassa olevien tuotteiden korvaushyötyjen muutoksista, sekä kasvihuonekaasuinventaarilaskennan mukaisista väliaikaisista hiilivarastoista puu- ja BECCU-tuotteille (tuotenielu). Korvaushyödyillä tarkoitetaan sitä ilmastohyötyä, joka tässä tarkasteltujen uusien tuotteiden (ligniini- ja tanniinisovellukset, BECCU-tuotteet, BECCS) avulla saavutetaan, kun niiden ajatellaan korvaavan fossiilisten tuotteiden käyttöä. Koska myös korvaushyödyt huomioidaan, eivät tässä raportoidut ilmastovaikutukset vastaa Suomen päästöinventaariin laskettavia vaikutuksia.

Muutokset skenaarioiden välillä vertautuvat tässä nykytilaskenaarioon (v2024-74Mm³). Esimerkiksi hakkuiden pienentyessä nykyisten metsäteollisuuden tuotteiden nielu ja korvaushyödyt pienenevät, aiheuttaen päästön, koska tuotteita tuotetaan vähemmän. Toisaalta hakkuiden alenemisen seurauksena metsän hiilinielu kasvaa merkittävästi. Merkittävimmät ilmastovaikutukset syntyvät matalamman hakkuutason vaikutuksesta metsänieluun, BECCS:n avulla saavutettavasta teknologisesta nielusta sekä BECCU-tuotteiden korvaushyödyistä. Kaikki tarkastellut skenaariot tuottavat merkittäviä ilmastohyötyjä verrattuna nykytilaan. Parhaisiin ilmastovaikutuksiin päästään matalamman hakkuutason BECCUS-skenaarioissa.

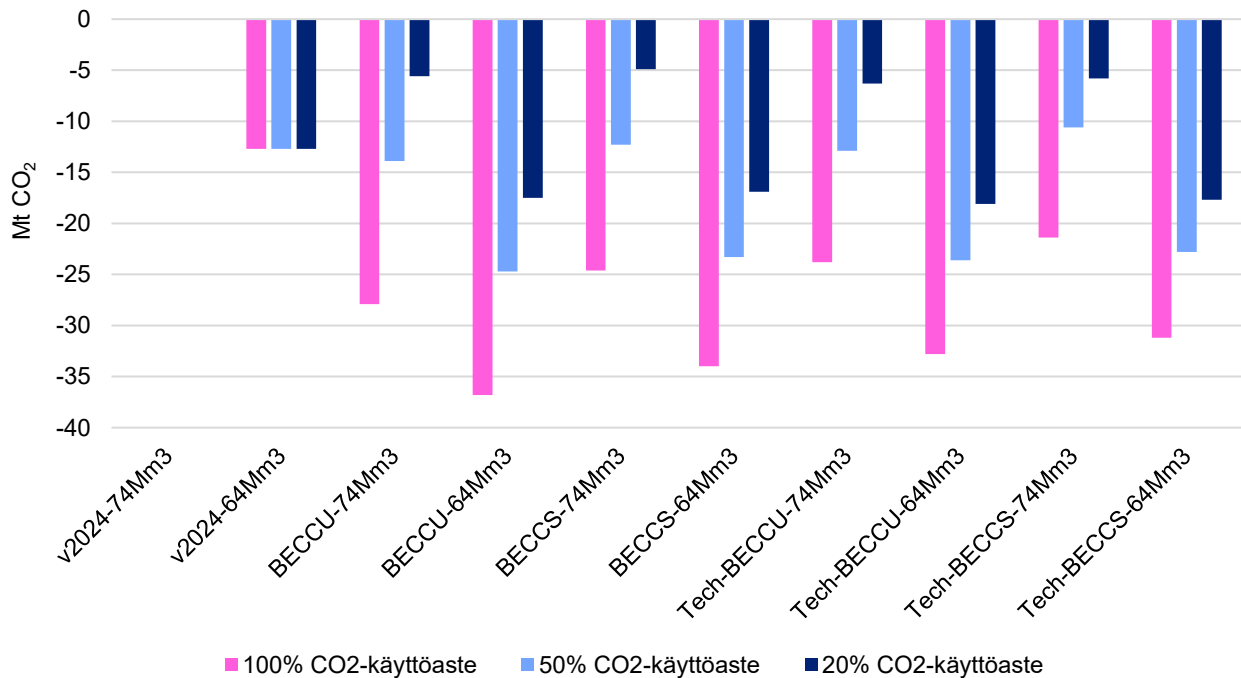
Kuvasta 22 nähdään, että vuotuisella 10 milj. m³:n lisähakkuilla saatavat BECCUS-tuotteiden aiheuttamat ilmastohyödyt eivät pysty kompensoimaan vastaavan hakkuulisäyksen aiheuttamaa nielunmenetystä metsässä. Tämä näkyy kuvassa siten, että matalamman hakkuutason (64 Mm³/v) nettoilmastohyödyt ovat vastaavissa BECCU- ja BECCS-skenaarioissa suurempia kuin korkeammalla hakkuutasolla (74 Mm³/v).

Kuvassa 23 esitetään skenaarioiden tuotteiden potentiaaliset nettoilmastovaikutukset kolmella eri hiilidioksidin käyttöasteella. BECCU- ja BECCS-tuotteilla päästään matalammalla hakkuutasolla korkeampiin ilmastohyötyihin 20 % CO₂-käyttöasteella kuin korkeammalla hakkuutasolla 50 % CO₂-käyttöasteella.

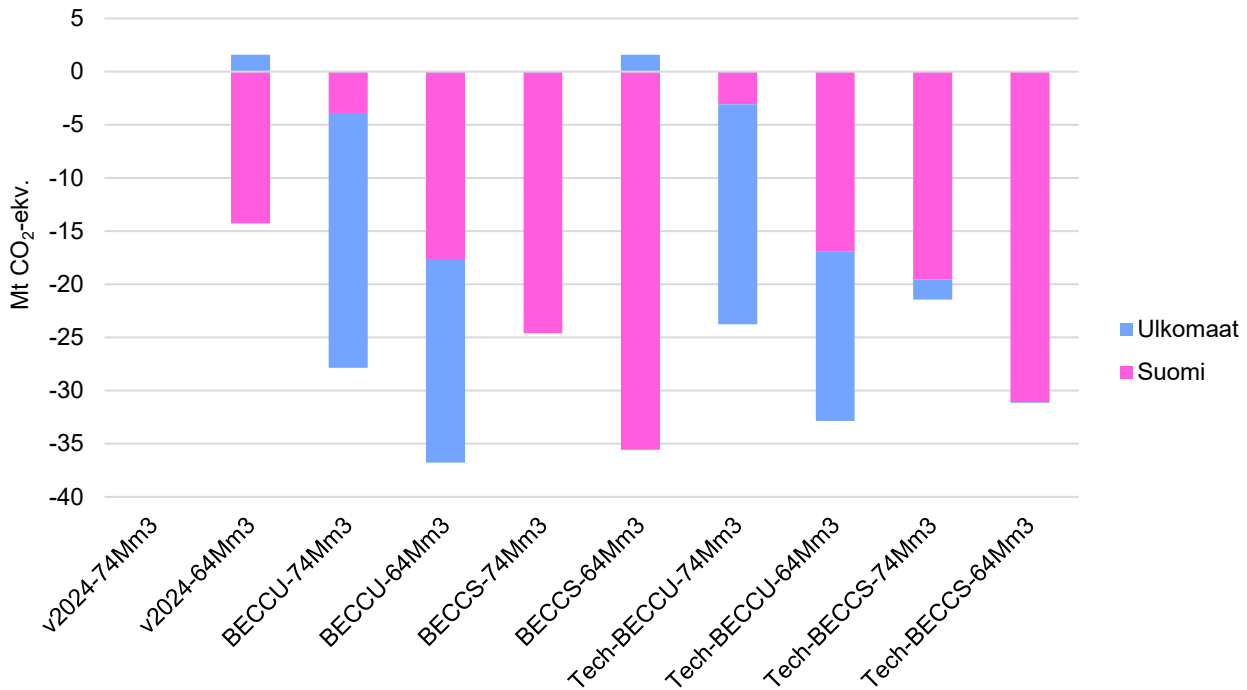
Ilmastovaikutukset kuitenkin kohdentuvat skenaariosta riippuen eri tavoin Suomeen ja ulkomaille (kuva 24). Tämä johtuu siitä, että Tech- ja BECCU-skenaarioissa tuotettuja uusia tuotteita ei välttämättä käytetä Suomessa, vaan osa niistä viedään ulkomaille, jolloin korvaushyödyt toteutuvat Suomen rajojen ulkopuolella. Esimerkiksi Suomessa tuotetut liikennepolttoaineet voivat korvata fossiilisia polttoaineita muissa Euroopan maissa. Sen sijaan puutuotenielu hyödyntävät sellaisenaan Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamista ja EU:n kansallisten velvoitteiden täyttämistä.



Kuva 22: Maksimiskenaarioiden potentiaaliset ilmastovaikutukset ja nettovaikutus, kun vuoden 2024 tilanne (v2024-74Mm3) on vertailukohtana. Alemmilla hiilidioksidin käyttöasteilla ilmastovaikutus muuttuisi erityisesti BECCS:n ja BECCU-korvaushyötyjen osalta. Kuvan ilmastovaikutukset eivät vastaa Suomen päästöinventaarioon laskettavia vaikutuksia, koska mukaan on otettu myös korvaushyödyt.



Kuva 23: Skenaarioiden tuotteiden potentiaaliset nettoilmastovaikutukset kolmella eri hiilidioksidin käyttöasteella.

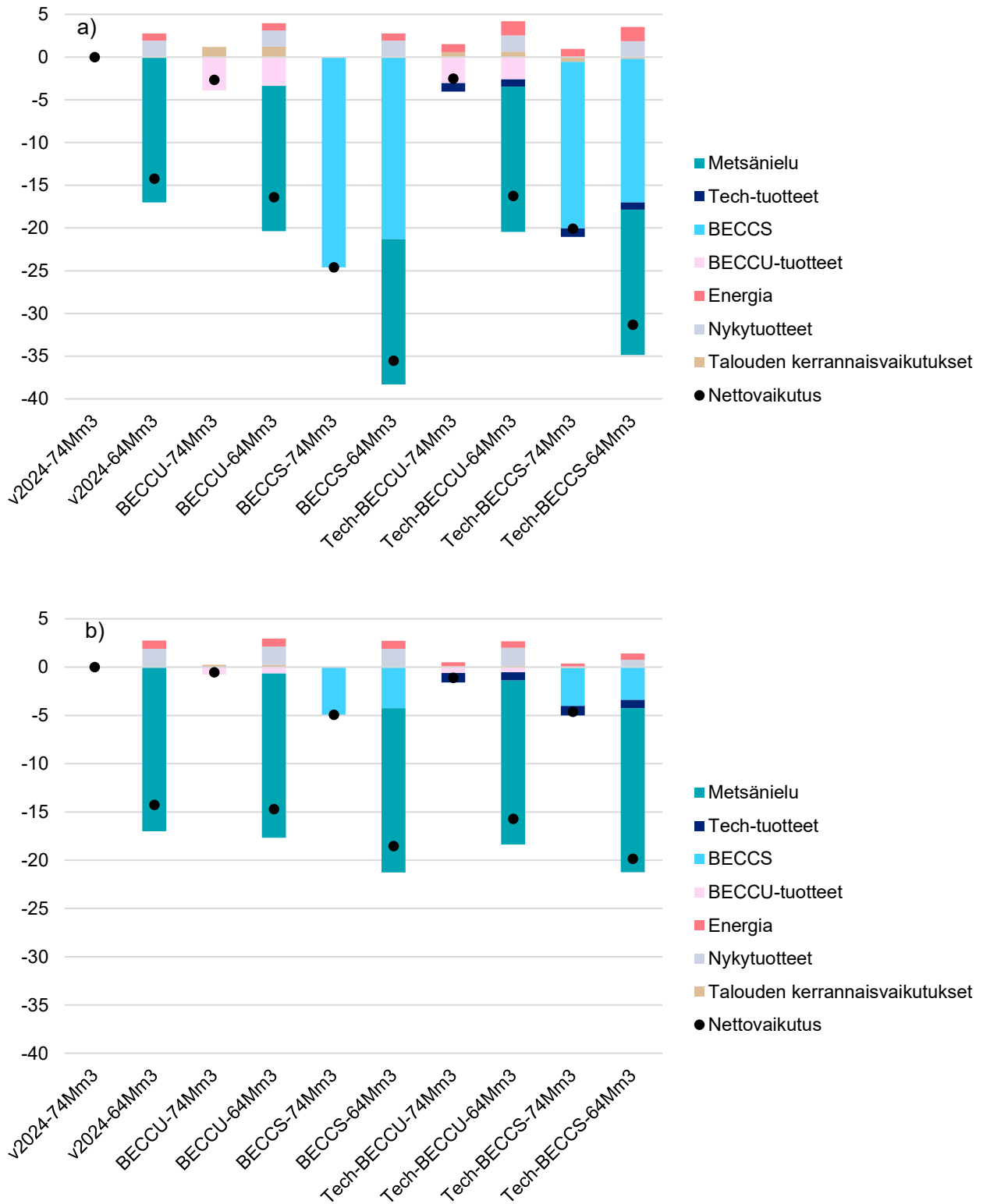


Kuva 24: Arvio ilmastovaikutusten jakautumisesta Suomeen ja ulkomaille eri hiilidioksidin 100 % käyttöasteen skenaarioissa, kun vuoden 2024 tilanne (v2024-74Mm3) on vertailukohtana. Oletuksena on, että tuotetuista tuotteista 90 % viedään Suomen rajojen ulkopuolelle, jolloin korvausvaikutukset toteutuvat muualla kuin Suomessa.

Tässä tehdyin oletuksin (90 % uusista tuotteista viedään Suomen rajojen ulkopuolelle) merkittävimmät ilmastohyödyt Suomessa toteutuvat BECCS-skenaarioissa. BECCS-skenaarioiden avulla voidaan siis varmimmin vastata Suomen ilmastotavoitteisiin sekä kansallisiin EU-velvoitteisiin. BECCU-skenaarioiden ilmastohyödyt toteutuvat tässä suurelta osin Suomen ulkopuolella ja kuvaavat siis Suomen mahdollista kädenjälkipotentiaalia ulkomailla. BECCU-skenaariot palvelevat esimerkiksi EU:n tai globaalien ilmastotavoitteiden saavuttamista.

3.4 SKENAARIOIDEN VAIKUTUKSET SUOMEN ILMASTOTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISEEN JA KANSALLISTEN EU-VELVOITTEIDEN TÄYTTÄMISEEN

Työssä kasvihuonekaasupäästöjä on arvioitu ENVIMATscen-mallilla (luku 3.2) ja tuotekohtaisilla lähestymistavoilla (luku 3.3). Kuvassa 25a esitetään näiden arvioiden tulokset siten, että ne kuvaavat ainoastaan kotimaahan kohdistuvia vaikutuksia. Tuotekohtaisissa arvioissa BECCU:n ja BECCS:n osalta on tarkasteltu 100 % CO₂-käyttöastetta. ENVIMATscen-mallin päästöarviot kuvaavat käytännössä metsä- ja kemianteollisuuden tuotantotoiminnan muutoksista seuraavia koko kansantalouden tason kerrannais- ja syrjäytysvaikutuksia. Tällaisia talouden rakenteellisia ja välillisiä vaikutuksia tuotekohtaiset arviot eivät pysty huomioimaan. Kuvasta 25a ilmenee, että kansantalouden tasolla metsien hiilinielu ja BECCS hallitsevat kotimaan kasvihuonekaasutaseen lopputulosta, ja ENVIMATscen-mallin tulosten vaikutus Suomen kasvihuonekaasupäästöjen lopputulokseen on vähäinen. Kuvassa 25b esitetään vastaavat kotimaiset nettopäästöt eri skenaarioissa tilanteessa, jossa BECCU:n ja BECCS:n CO₂-käyttöaste on 20 %. Skenaarioiden väliset erot säilyvät ilmastovaikutuksiltaan suurina ennen kaikkea metsien hiilinieluerojen takia. Mikäli metsänieluja ei sisällytetä tarkasteluun, skenaarioiden väliset erot ilmastovaikutuksien osalta jäävät vaatimattomiksi.



Kuva 25: (a) ENVIMATscen-mallilla (talouden kerrannais- ja syrjäytysvaikutukset) ja tuotekohtaisella lähestymistavalla (BECCU:n ja BECCS:n osalta 100 % CO₂-käyttöaste) arvioidut kasvihuonekaasupäästövaikutukset (Mt CO₂-ekv.) Suomessa eri skenaarioissa. (b) Sama laskelma kuin kuvassa a, mutta BECCU:n ja BECCS:n osalta 20 % CO₂-käyttöaste. Negatiivinen arvo kertoo päästövähennyksen/nielun lisäyksen vertailuskenaarioon (v2024-74Mm3) nähden. Positiivinen arvo kertoo päästön.

Paras lopputulos kotimaan päästöjen osalta syntyy matalamman hakkuutason skenaarioissa, joissa samaan aikaan maksimoidaan BECCS:n käyttö. Kokonaisuudessaan eri skenaarioiden kotimaan nettotulos on sellaisenaan hyödynnettävissä Suomen ilmastolain mukaisten ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi.

Energia- ja ilmastostrategian yhteydessä (Koljonen ym. 2025a) on arvioitu politiikkaskenaarion (WAM) mukainen Suomen nettopäästötilanne vuonna 2040, joka vastaa tämän työn skenaarioiden ilmastovaikutuksien arviointivuotta. WAM-skenaarioiden nettopäästötilanne vuonna 2040 on asetettu vertailutilanteeksi, kun arvioidaan tämän työn skenaarioiden vaikutuksia Suomen ilmastotavoitteiden ja -velvoitteiden saavuttamiseen. Taulukossa 9 on esitetty eri skenaarioiden vaikutus Suomen ilmastotavoitteiden lopputulokseen 50 % CO₂-käyttöasteella, kun lähtökohtana on politiikkaskenaarion (WAM) mukainen vuoden 2040 nettopäästötilanne (Koljonen ym. 2025a). Alkuperäisessä WAM-skenaariossa vuosihakkuutaso on yli 80 milj. m³, joka on muutettu puutuotenieliuineen tässä analyysissä vastaamaan hakkuutasoa 74 milj. m³. Vuosihakkuun 74 milj. m³ metsien nettopäästöarvio vastaa Luonnonvarakeskuksen MELA-palvelun uusinta arviota vuoden 2040 tilanteesta, mikäli hakkuut ja metsänhoitotoimet jatkuvat viime vuosien toteutuksen mukaisina (Luonnonvarakeskus 2026b). WAM-skenaarioiden mukaisesti on oletettu, että Suomi pystyy tekemään noin -3,7 Mt CO₂-ekv. edestä BECCS-toimia. Vastaava oletus on tehty nykytuotetoimintaa kuvaavassa 64 milj. m³ vuosihakkuuskenaariorissa. Sen sijaan BECCU-skenaarioissa BECCS ei ole ollenkaan mukana.

Taulukko 9: Suomen nettopäästöarviot (Mt CO₂-ekv.) vuonna 2040 eri skenaarioilla hiilidioksidin 50 % käyttöasteella, kun muiden kuin metsäsektorin päästöjen on ajateltu kehittyvän KEITO WAM -skenaarioiden mukaisesti (Koljonen ym. 2025a) ja metsien hiilitasetulos vuosihakkuutasolla 74 Mm³ perustuu Luonnonvarakeskuksen MELA-tulospalvelun arvioon (Luonnonvarakeskus 2026b).

Nettopäästöjen osuus	Nykyt. -74Mm ³	Nykyt. -64Mm ³	BECCU -74Mm ³	BECCU -64Mm ³	BECCS -74Mm ³	BECCS -64Mm ³	Tech-BECCU -74Mm ³	Tech-BECCU -64Mm ³	Tech-BECCS -74Mm ³	Tech-BECCS -64Mm ³
Päästöt	13,5	14,5	12,8	14,0	13,5	14,5	13,5	14,6	14,0	15,0
Teknologiset nielut	-3,7*	-3,7*	0,0	0,0	-12,3	-10,7	0,0	0,0	-9,8	-8,4
Metsät	7,0**	-10,0	7,0	-10,0	7,0	-10,0	7,0	-10,0	7,0	-10,0
Puutuotenieliu	-2,0	-0,3	-2,6	-0,8	-2,0	-0,3	-3,3	-1,4	-2,8	-0,9
Muu maankäyttö -sektori	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
Yhteensä (Mt)	23,4	9,2	25,8	11,8	14,8	2,2	25,8	11,8	17,0	4,3

*KEITO-WAM mukaisesti

**Luonnonvarakeskuksen MELA-tulospalvelun arvio (Luonnonvarakeskus 2026b).

Taulukon 9 perusteella Suomen ilmastotavoitteiden kannalta paras lopputulos saavutetaan skenaarioissa, joissa vuosihakkuutaso 64 milj. m³ yhdistetään BECCS-teknologian käyttöön (tässä 50 % CO₂-käyttöasteella), olettaen että muiden kuin metsäsektorin kehitys noudattaa WAM-skenaariota. Tässäkään yhdistelmässä nettopäästöt eivät vähene nollaan vuoteen 2040 mennessä, eli hiilineutraaliutta ei saavutettaisi edes siihen mennessä. Hiilineutraalius voi kuitenkin olla saavutettavissa, mikäli uudet metsänhoitotoimet ovat selvästi nykykäytäntöä tehokkaampia ja päästövähennyksiä saadaan toteutettua jonkin verran nykyarviota enemmän muilla sektoreilla. Vastaavasti, jos muilla sektoreilla toteutetaan WAM-skenaariota kunniahimoisempia toimia, tavoitteisiin voidaan päästä myös korkeammalla hakkuutasolla tai pienemmällä BECCS-määrällä. On huomattava, että tässä työssä esitettyihin tuotteiden kotimaisiin substituutiovaikutuksiin sekä nieluarvioihin sisältyy epävarmuutta. Tämän vuoksi edellä esitetty arvio kuvaa ensisijaisesti eri tekijöiden suuruusluokkia eikä tarkkaa lopputulosta. Lisäksi ENVIMATscen-mallin ilmastovaikutusarviot kuvaavat kansantalouden päästöjä vuonna 2035, minkä vuoksi ne todennäköisesti yliarvioivat päästövaikutuksia vuodelle 2040. Kansantalouden päästöjen voidaan arvioida vähenevän vuosien 2035 ja 2040 välillä.

Taulukossa 10 on esitetty nykytuotteilla ja uusilla tuoteskenaarioilla saavutettavat nettopäästöt vuonna 2040 kolmella eri CO₂-käyttöasteella. Taulukon 50 % CO₂-käyttöastetta koskeva tulos vastaa taulukossa 9 esitettyä nettopäästötulosta (rivi yhteensä taulukossa). Tulokset osoittavat, että ainoastaan 100 % CO₂-käyttöasteella BECCS yhdistettynä 64 milj. m³:n vuosihakkuihin johtaa käytetyillä oletuksilla hiilinegatiiviseen lopputuloksen vuonna 2040. Tällöin Suomi olisi ilmastolain mukaisesti selvästi hiilinegatiivinen.

Taulukoiden 9 ja 10 arvioissa on lähdetty siitä, että niissä on otettu huomioon Suomessa käytettyjen nykypuutuotteiden arvioidut korvaushyödyt sellaisenaan Suomen ilmastotavoitteiden hyväksi. Kuitenkin nykyisten puutuotteiden korvaushyödyt muodostuvat pitkälti siitä, että ne korvaavat terästä ja betonia. Jos terästeollisuutemme ja sementtiteollisuutemme pystyy vähähiilistymään vuoteen 2040 mennessä, nyt laskemissa käytetyt nykypuutuotteiden korvaushyödyt käytännössä häviävät kotimaasta. Lisäksi puun energiakäytön substituutiohyötyjen voidaan ajatella olevan minimaaliset vuoden 2040 Suomessa. Käytännössä edellä mainittu tarkoittaa sitä, että taulukossa 9 esitetyt rivin ”päästöt” arvot pienenevät kaikissa 64 milj. m³ hakkuutason skenaarioissa noin 1 Mt CO₂-ekv. Sama koskee taulukkoa 10. Vähenneminen johtuu siitä, että korvaushyödyt pienenevät 74 milj. m³ hakkuutason skenaarioissa enemmän kuin 64 milj. m³ skenaarioissa, joissa korvaushyödyt olivat pienemmät alemman hakkuukertymän vuoksi. Tällöin ero skenaarioiden välillä pienenee, eli päästöt ”vähenevät” 64 Mm³-hakkuutason skenaarioissa.

Taulukko 10: Suomen nettopäästöarviot (Mt CO₂-ekv.) vuonna 2040 eri skenaarioilla kolmella eri hiilidioksidin käyttöasteella, kun muiden kuin metsäsektorin päästöjen on ajateltu kehittyvän KEITO WAM -skenaariota mukaisesti (Koljonen ym. 2025a) ja metsien hiilitasetulos vuosihakkuutasolla 74 Mm³ perustuu Luonnonvarakeskuksen MELA-tulospalvelun arvioon (Luonnonvarakeskus 2026b).

CO ₂ -käyttöaste	Nykyt.-74Mm ³	Nykyt.-64Mm ³	BECCU-74Mm ³	BECCU-64Mm ³	BECCS-74Mm ³	BECCS-64Mm ³	Tech-BECCU-74Mm ³	Tech-BECCU-64Mm ³	Tech-BECCS-74Mm ³	Tech-BECCS-64Mm ³
100 %	23,4	9,2	24,4	10,7	2,5	-8,4	24,6	10,8	7,0	-4,2
50 %	23,4	9,2	25,8	11,8	14,8	2,2	25,8	11,8	17,0	4,3
20 %	23,4	9,2	26,6	12,4	22,2	8,6	26,5	12,4	23,1	9,4

BECCS auttaa Suomea kansallisen ilmastolain tavoitteiden saavuttamisessa. Toistaiseksi on kuitenkin epäselvää, millä tavoin BECCS:in ilmastohyödyt tulevat huomioiduiksi jäsenmaiden EU-velvoitteissa. Suomen EU:n ilmastovelvoitteiden täyttämisen näkökulmasta tarkasteltuna BECCS:n ilmastohyödyt eivät välttämättä kerry kansallisten velvoitteiden hyväksi nykyisillä taakanjako- tai maankäyttösektoreilla, mikäli BECCS päätetään liittää osaksi päästökauppaa. BECCU-vientituotteiden substituutiovaikutuksia ei lasketa Suomen kotimaisiksi hyödyiksi, siltä osin kuin tuotteet viedään Suomen ulkopuolelle ja ilmastohyödyt kirjautuvat tuotteiden käyttömaiden inventaarioihin.

Toistaiseksi ei ole myöskään tietoa Suomen kansallisesta osuudesta EU:n vuoden 2040 ilmastotavoitteesta, jossa koko EU tavoittelee 90 % nettopäästövähennystä vuoden 1990 tasoon verrattuna. Tavoitteesta enintään viisi prosenttia on sovittu voitavan kattaa hankkimalla kansainvälisiä päästöyksiköitä. Jäsenmaat voivat siis ostaa yksiköitä velvoitteidensa täyttämiseksi, mutta varmuutta ei ole siitä, miten tuo viisi prosenttia nettopäästövähennystavoitteesta tulee kohdentumaan jäsenmaiden kesken. Edellä esitetyistä syistä on toistaiseksi vaikeaa arvioida työssä tehtyjen skenaarioiden vaikutukset Suomen EU-velvoitteiden täyttämiseen vuonna 2040.

Eri skenaarioiden potentiaalia vahvistaa Suomen EU-velvoitteiden täyttämistä tulevaisuudessa voidaan hahmottaa kuvan 25 avulla. Mitä suurempi negatiivinen nettoluku, sitä suurempi positiivinen vaikutus velvoitteiden täyttämässä. Edellä esitetyn perusteella BECCS:n vaikutusta Suomen vuoden 2030 jälkeisten päästökaupan ulkopuolisten EU-velvoitteiden saavuttamiseen voi varioida pitämällä sen merkityksen kuvan mukaisesti ja toisaalta poistamalla se kuvasta. Esimerkiksi hiilidioksidin 20 % käyttöasteella (kuva 25b) uusien tuotteiden (ml. BECCU) ja BECCS:n positiivinen vaikutus on pieni verrattuna metsämaan nielun vahvistumiseen matalamman hakkuutason seurauksena. Vuoden 2040 maailmassa on lisäksi kyseenlaista, toteutuvatko tässä työssä arvioidut puun kotimaan substituutiovaikutukset ja puun energiahyödyt esitetyssä laajuudessa vuonna 2040. Tämä korostaa metsänielun merkitystä EU-velvoitteiden saavuttamisessa.

4 TULOSTEN TARKASTELUA

Tässä työssä tarkasteltiin vuoteen 2040 ulottuvia skenaarioita, joissa Suomessa voitaisiin luoda taloudellista arvonlisäystä puun materiaalitehokkaamman käytön, metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden sekä bioperäisen hiilidioksidin talteenoton, hyötykäytön ja varastoinnin keinoin. Lisäksi tarkasteltiin, miten bioperäisen hiilidioksidin saatavuus muuttuu, kun metsäteollisuuden sivuvirtoja, kuten osa mustalipeän ligniinistä ja kuori ohjataan polton sijaan korkeamman arvonlisän tuotteisiin ja lämmöntuotantoa sähköistetään. Metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteina tarkasteltiin ligniinin käyttöä akkumateriaaleihin ja liimoiksi sekä puun kuoren sisältämien tanniinien hyötykäyttöä nahan käsittelyyn. BECCUS-ratkaisuina tarkasteltiin BECCU-polttoaineita (e-kerosiini ja e-bensiini) ja -muoveja (polykarbonaattipolyolit) sekä hiilidioksidin pysyvää varastointia geologisiin muodostelmiin tai kaivosjätteisiin mineralisoimalla.

Tarkasteltujen skenaarioiden perusteella on mahdollista löytää tulevaisuuspolkuja, joissa metsäteollisuuden resurssitehokkuus paranee ja arvonlisäys ja kansantalousvaikutukset samanaikaisesti kasvavat, positiivisin ilmastovaikutuksin.

4.1 ARVONLISÄYSTÄ METSÄTEOLLISUUDEN KORKEAMMAN JALOSTUSARVON TUOTTEISTA

Metsäteollisuuden uusista korkeamman jalostusarvon tuotteista, kuten kuoren tanniineista ja ligniinisovelluksista, voidaan saada merkittävää arvonlisäystä, tarkastellusta skenaariosta riippuen noin 350–400 M€ vuodessa. Verrattuna BECCU- ja BECCS-ratkaisuihin liikkeelle voidaan päästä nopeasti ja suhteellisen maltillisilla investoinneilla. Metsäteollisuuden uusien tuotteiden arvonlisäystä on arvioitu aiemmin myös selkeästi laajemmalla tuotevalikoimalla. Tällöin potentiaalisesti arvonlisäykseksi on arvioitu noin 7 mrd. €, kun esimerkiksi osa markkinasellusta ohjattiin jatkojalostukseen (Österberg ym. 2024). Tässä raportissa tarkastelu rajattiin kuitenkin ainoastaan poltosta pois ohjattavien metsäteollisuuden virtojen (ligniini ja kuori) arvonlisäysmahdollisuuksiin.

Mustalipeästä saatavasta ligniinistä voidaan jatkojalostaa kovahiiltä esimerkiksi akkumateriaaleihin. Kraft-ligniinin tärkeimmät korkean arvonlisän sovellukset liittyvät energian varastointiin, erityisesti litium- ja natriumioniakkujen kovahiilianodeihin sekä funktionaalisiin hiilimateriaaleihin, kuten huokoisiin hiiliin, sähköä johtaviin partikkeleihin ja hallitusti suunniteltuihin mikrorakenteisiin (Pauls ym. 2026). Tutkimusten perusteella ligniinistä valmistetut hiilimateriaalit voivat saavuttaa litiumioniakkujen anodimateriaaleilta vaaditun kilpailukykyisen sähkökemiallisen suorituskyvyn (Wang ym. 2025, Aidoo & Fatehi 2026). Tämä tukee niiden jatkokehitystä kestävinä ja fossiilivapaina materiaaliratkaisuina, jotka voivat samalla vähentää riippuvuutta grafiitista ja muista kriittisistä raaka-aineista.

Pisimmälle kehittynyt ligniinin kaupallinen sovellus on fossiilisen fenolin korvaaminen fenolihartseissa ja puuliimoissa, joita käytetään esimerkiksi vanerissa, OSB- ja LVL-tuotteissa sekä kyllästetyssä paperissa. Tämä on vahva reitti erityisesti siksi, että ligniinillä on jo valmiiksi aromaattinen ja fenolinen rakenne, joka sopii hyvin hartsikemiaan. Ligniiniä hyödynnetään myös polymeeriseoksissa, biomuoveissa, komposiiteissa, pinnoitteissa, polyuretaaneissa, epoksijärjestelmissä, polyoleissa ja erikoishartseissa, joissa se voi kasvattaa materiaalien biopohjaisuutta ja parantaa samalla esimerkiksi jäykkyyttä, UV-kestävyyttä, lämpötilankestoa ja kemiallista kestävyyttä. (Henn ym. 2022, Correa Guillen ym. 2026)

Ligniini onkin metsäteollisuuden keskeinen sivuvirta (noin 4 Mt vuodessa), jonka materiaalihyödyntäminen esimerkiksi akkumateriaaleissa, liimoissa ja pinnoitteissa voisi kasvattaa biomassan arvonmuodostusta ilman lisähakkuita (Österberg ym. 2024). Vaikka Suomen osuus

maailman teknisestä ligniinistä on arviolta vain noin 5–8 %, maalla on poikkeuksellisen vahva asema korkean arvon ligniinisolvellusten kehittäjänä. Suomen vahvuuksia ovat ligniinin hyvä saatavuus, ligniinin talteenottoa helpottava integroitunut metsäteollisuus sekä vahva tutkimus-, kehitys- ja innovaatioympäristö, jossa yritykset, tutkimuslaitokset ja yliopistot toimivat tiiviissä yhteistyössä. Tämän ansiosta Suomella on realistinen mahdollisuus nousta ligniinin korkean jalostusarvon materiaalien ja kemikaalien kansainväliseksi edelläkävijäksi. Strategisesti ligniinin hyödyntäminen tukee siirtymää poltosta materiaalikäyttöön, vähentää riippuvuutta fossiilisista raaka-aineista sekä vahvistaa kiertotaloutta ja ilmastotavoitteiden saavuttamista. Edelläkävijyyden saavuttaminen edellyttää kuitenkin arvoketjujen pidentämistä Suomessa sekä uusia investointeja jalostukseen, sovelluskehitykseen ja kaupallistamiseen.

Havupuun kuoresta saatavilla tanniineilla voidaan korvata karsinogeenisiä kromiyhdisteitä nahankäsittelyssä. Havupuun kuoresta peräisin olevat tanniinit eroavat kaupallisista kasvitanneineista useilla keskeisillä tavoilla, jotka liittyvät raaka-aineeseen, saantoon, kemialliseen koostumukseen, teolliseen kypsyyteen, suorituskykyyn sekä kestävyteen ja taloudelliseen kilpailukykyyn. Tanniinit saadaan metsäteollisuuden sivuvirroista, ja koska kuori erotellaan prosessissa jo valmiiksi, kyseessä on edullinen ja helposti saatavilla oleva raaka-aine, jonka hyödyntäminen ei edellytä erillistä biomassan korjuuta. Kaupalliset kasviperäiset tanniinit puolestaan uutetaan yleensä esimerkiksi quebracho- ja kastanjapuusta tai mimoosan kuoresta (Niiranen ym. 2026), jolloin ne perustuvat useammin ensisijaisiin biomassaresursseihin. Tästä syystä havupuun tanniineihin liittyy vahva kiertotalouden ja sivuvirtojen hyödyntämisen näkökulma. Nykytilanteessa havupuun tanniinit voivat olla kilpailukykyisiä trooppisiin tanniineihin verrattuna, mutta eivät vielä kromiin nähden pelkän hinnan perusteella. Siksi niiden liiketoimintapotentiaali perustuu ennen kaikkea arvoperusteiseen hinnoitteluun, jossa korostuvat kestävyysedut ja sääntelyn synnyttämä markkinapaine, pikemminkin kuin kustannuskilpailu kromipohjaisten ratkaisujen kanssa.

4.2 BIOPERÄISEN HIILIDIOKSIDIN SAATAVUUS SUOMESSA SÄILYY HYVÄNÄ

Tarkastelun perusteella bioperäisen hiilidioksidin saatavuus Suomessa säilyy nykyisellä metsäteollisuuden rakenteella hyvänä, yli 15 Mt vuodessa, vaikka hakkuutaso laskisi ja puun polttoa vähennettäisiin sekä metsäteollisuudessa että lämmöntuotannossa (Tech-CCS-64Mm3- ja Tech-CCU-64Mm3-skenaariot). Talteenotetun hiilidioksidin määrä vaihteli skenaarioissa 3–25 Mt:n välillä riippuen hiilidioksidin käyttöasteesta (20, 50 tai 100 %).

Saatavilla olevasta hiilidioksidimäärästä on kaikissa skenaarioissa mahdollista valmistaa merkittäviä määriä BECCU-tuotteita, joiden ympärille voitaisiin rakentaa kokonaan uusi teollisuudenala. Suomessa olisi esimerkiksi mahdollista valmistaa merkittävä osuus EU:n edellyttämästä e-kerosiinimäärästä. Skenaarioissa, joissa hiilidioksidia hyödynnetään 20 % voitaisiin valmistaa 11 % Euroopan komission ennakoimasta vuoden 2040 e-kerosiinin kulutuksesta.

Skenaarioissa, joissa hiilidioksidin käyttöaste oli 100 % BECCS:n maksimipotentiaali Suomessa vaihteli 17–25 Mt:n välillä. Esimerkiksi KEITO-WAM-mallinnuksissa Suomen BECCS-tarpeeksi arvioitiin noin 13 Mt vuoteen 2050 mennessä (Koljonen ym. 2025a). Nykytilassa tämä tarkoittaisi, että noin puolet saatavilla olevasta hiilidioksidista tulisi varastoida, mutta skenaariossa, jossa uusia teknologioita otettaisiin käyttöön ja hakkuita vähennettäisiin (Tech-BECCS-64Mm3), jopa 76 % hiilidioksidista tulisi varastoida. Toisaalta KEITO-WAM-skenaarion suuri BECCS-tarve johtui osittain siitä, että skenaariossa oletettiin hyvin korkea, yli 80 milj. m³ vuotuinen hakkuutaso.

Vaikka BECCU- ja BECCS-teknologioita tarkasteltiin tässä työssä erillisissä skenaarioissa, niitä on mahdollista edistää samanaikaisesti, koska arvoketjut ovat osittain yhteisiä. BECCU:n kohdalla

bioperäisen hiilidioksidin jalostaminen tuotteiksi edellyttää vuoteen 2040 mennessä huomattavia investointeja suhteessa metsäteollisuuden nykyisiin investointitasoihin. Tämä koskee erityisesti uusiutuvan sähkön ja vedyn tuotantoa. Esimerkiksi skenaario, jossa hiilidioksidin käyttöaste on 20 % ja tuotteiksi jalostetaan 3–5 Mt bioperäistä hiilidioksidia, edellyttäisi noin 40–49 Mrd. € kokonaisinvestointeja. Lisäksi vuosituotanto vaatisi noin 42–48 TWh uusiutuvaa sähköä. BECCS:iä voitaisiin puolestaan edistää maltillisemmilla investoinneilla: tässä tarkastellut 20 % käyttöasteskenaariot olisivat toteutettavissa 5–12 Mrd. € kokonaisinvestoinneilla.

Tässä työssä tarkastelu rajattiin teollisiin bioperäisen hiilidioksidin lähteisiin, minkä vuoksi pienemmän mittakaavan ratkaisuja ei huomioitu. Tällaisia voisivat alueellisesti olla esimerkiksi hiilidioksidin talteenotto biokaasulaitoksista ja mineralisointi betonituotteisiin (ks. esim. Carbonaide 2026). Pienemmän mittakaavan alueelliset ratkaisut voidaan kuitenkin nähdä tärkeänä osana hiilidioksiditalouden käynnistämistä Suomessa. Tulevaisuudessa myös biokaasulaitosten bioperäiseen hiilidioksidin liittyvä talteenottopotentiaali voi kasvaa.

4.3 HIILIDIOKSIDIN HYÖTYKÄYTÖN RAJOITTEENA UUSIUTUVAN SÄHKÖN SAATAVUUS

Hiilidioksidin hyötykäytön eli BECCU:n toteutumista rajoittaa erityisesti uusiutuvan sähkön saatavuus. Tarkastellulla aikajänteellä sähkönkulutus kasvaa myös muilla sektoreilla, mikä voi edelleen kaventaa BECCU-mahdollisuuksia. Hiilidioksidin 20 % käyttöasteen skenaariossa sähkönkulutus kasvaisi 42–48 TWh, 50 % käyttöasteen skenaarioissa 92–120 TWh ja 100 % käyttöasteen skenaarioissa 174–241 TWh. Vertailun vuoksi Suomen sähkön kokonaiskulutus oli vuonna 2025 noin 85 TWh (Energiateollisuus 2026b).

Fingrid arvioi vuonna 2025 kunnianhimoisimmassa vetyskenaariossaan, että vedyn tuotanto edellyttäisi vuosittain noin 106 TWh sähköä ja että sähkön kokonaiskulutus Suomessa nousisi 268 TWh:iin vuoteen 2040 mennessä (Fingrid 2025). Kuvan 9 perusteella tämä vastaa tässä tarkastelussa suunnitteen hiilidioksidin 50 % käyttöasteen skenaarioiden sähkönkulutusta. Gasgridin ja Fingridin uusimmassa selvityksessä kunnianhimoisen vetyskenaarioiden sähkön lisätarve puolestaan on 71 TWh (Gasgrid & Fingrid 2026). Pitkän aikavälin ilmastosuunnitelman taustaselvityksen KEITO FIN -skenaariossa, jossa CCU-tuotanto oli korkeimmillaan, sähkön kokonaiskulutus Suomessa oli vuoteen 2040 mennessä 160 TWh ja noin 2 Mt hiilidioksidia jalostettiin CCU-tuotteiksi (Koljonen ym. 2025b).

Uusiutuvan sähkön lisätarvetta voidaan havainnollistaa tarkastelemalla tuulivoimatuotannon kasvua Suomessa viime vuosina. Vuonna 2025 Suomessa tuotettiin tuulivoimalla sähköä 22 TWh (Energiateollisuus 2026c). Jos tuulivoimatuotanto kasvaisi lineaarisesti viimeisten kolmen vuoden trendin mukaisesti, lisätuotanto olisi vuonna 2040 noin 50 TWh. Jos kasvu seuraisi viimeisten viiden vuoden trendiä, lisätuotanto olisi noin 25 TWh vuonna 2040. (VTT:n arvio). Tuulisähkön tuotannon tulisi siten kasvaa Suomessa viime vuosia nopeammin, jotta BECCU-skenaariot voisivat toteutua. Hiilidioksidin 50 % ja 100 % käyttöasteen skenaarioissa tuotannon tulisi lisäksi kasvaa lähelle arvioita Suomen maksimituulivoimapotentialista, joka on maatuulen osalta 139 TWh ja maa- ja merituulen osalta 231 TWh (Nurmio & Pakarinen 2024).

Tarkastelun perusteella lämmöntuotannon sähköistyminen vaikuttaa Suomessa sekä todennäköiseltä että mahdolliselta, ja kehitys on jo laajasti käynnissä. Laitosten sijainnista riippuen BECCU-tuotteiden sivutuotelämmön hyötykäyttömahdollisuudet voivat olla merkittäviä ja ne voivat parantaa tuotannon kilpailukykyä, mutta niitä ei tässä työssä tarkasteltu erikseen. Myöskään sähköistymiseen liittyviä huoltovarmuusnäkökohtia ei arvioitu tässä työssä, vaikka ne ovat kokonaisuuden kannalta tärkeitä. Tarkastelu perustuu tilastopohjaiseen taselaskentaan, eikä siinä siten huomioitu esimerkiksi

energiajärjestelmän todellista toimintaa, vaihtelevan sähköntuotannon aiheuttamaa joustotarvetta ja hintavaihteluita, energiavarastoja tai jakeluverkko-yhteyksien vahvistamistarpeita. Näitä näkökulmia sekä energiajärjestelmästä mahdollisesti aiheutuvia rajoitteita tulisi jatkossa tarkastella erikseen esimerkiksi tuntitason energiajärjestelmämalleilla (kuten VTT:n Backbone-malli³).

4.4 HIILIDIOKSIDITALOUDEN MAHDOLLISUUDET LUODA ARVONLISÄYSTÄ

Metsäteollisuuden uusien, korkeamman arvonlisän tuotteiden ja BECCUS-tekniologioiden käyttöönotto tuotti lähes kaikissa⁴ tässä tarkastelluissa skenaarioissa Suomelle taloudellista arvonlisäystä nykytilaan verrattuna, kun hiilidioksidia otettiin talteen ja hyötykäytettiin tai varastoitettiin vähintään 3,4 Mt. Tämä vastaa noin yhden suuren metsätuotetehtaan päästöjä. Skenaarioiden tuottama arvonlisäys vaihteli: Suurimmillaan se oli hiilidioksidin 100 % käyttöasteella 26 miljardia euroa vuodessa (Tech-BECCU-74Mm3) ja pienimmillään 20 % käyttöasteella sekä matalammalla hakkuutasolla noin 140 miljoonaa euroa vuodessa (20%_Tech-BECCS-64Mm3). Suurin arvonlisäys saavutettiin BECCU-skenaarioissa, joissa arvonlisäystä toi erityisesti uusiutuvan sähkön ja vedyn tuotanto sekä BECCU-tuotteet. BECCS-skenaarioissa arvonlisäys jäi alemmalle tasolle, enimmillään noin 3 mrd. €, koska myös investoinnit olivat pienempiä. Lisäksi hiilidioksidin varastoinnille oletettiin alhaisempi arvo kuin siitä valmistetuille tuotteille. Osa BECCS:n arvonlisäyksestä kohdistuu ulkomaille, koska geologinen varastointi tapahtuu Suomen rajojen ulkopuolella. Tässä vaihtoehtona tarkasteltu hiilidioksidin mineralisointi kaivosjätteisiin voisi luoda kotimaisen, keskiluokan mittakaavan ratkaisun hiilidioksidin pysyvään varastointiin, ja on toistaiseksi pilotointiasteella.

Arvonlisäystuloksia tulkittaessa on kuitenkin huomioitava, että raportissa esitetyt tulokset ovat herkkiä tehdyille oletuksille, kuten tuotteista saataville hinnoille ja pääomakustannuksille. Esimerkiksi nollakatteella lasketuissa skenaarioissa vuosittainen arvonlisäys aleni skenaariosta riippuen 7–12 %.

ENVIMATscen-mallinnuksen avulla arvioitiin hiilidioksidin 100 % käyttöasteen kansantalouselämyksiä. Maksimiskenaarioissa vaikutukset koko kansantalouden tasolla jäivät selvästi maltillisimmiksi kuin potentiaaliset tuotekohtaiset arvonlisävaikutukset: ne olivat noin 2–5 mrd. € vuodessa parempia nykytilaan nähden. Kaikissa BECCUS-ratkaisuja sisältävissä skenaarioissa havaittiin kuitenkin selvästi positiiviset bruttokansantuotevaikutukset verrattuna nykyteknologiaa mukaileviin skenaarioihin. Ligniinin ja kuoren materiaalihyödyntämisen sisältävissä Tech-BECCU-skenaariossa saavutettiin lähes samat bruttokansantuotevaikutukset kuin BECCU-skenaariossa, jossa oletettiin hiilidioksidin maksimaalinen hyödyntäminen tuotteiksi, samalla kun alueperäiset kasvihuonekaasupäästöt jäivät alhaisemmiksi. Alemmalla hakkuutasolla oli vain hyvin pieni negatiivinen vaikutus bruttokansantuotteeseen. Näin ollen sekä arvonlisäys- että kansantalouselämykset paranivat myös matalammalla hakkuutasolla molemmilla tässä käytetyillä tarkastelutavoilla.

Raportin arviot arvonlisäyksen kehityksestä eroavat toisistaan merkittävästi sen mukaan, tarkastellaanko yksittäisiä arvoketjuja vai koko kansantaloutta (ENVIMATscen). Arvonlisäyslaskennassa maksimiskenaarioiden arvonlisäys oli jopa kymmeniä miljardeja euroja vuodessa, kun taas ENVIMATscen-mallin mukaiset kansantalouselämykset olivat vain joitakin miljardeja euroja vuodessa. Tuotekohtaisen arvonlisäyksen tulokset kuvaavat siten toimialakohtaisia enimmäispotentiaaleja eivätkä huomioi kansantaloudessa ilmeneviä syrjäytysvaikutuksia tai rajoitteita, kuten investointien rahoitusta

³ <https://gitlab.vtt.fi/backbone/backbone/>

⁴ Ainoana poikkeuksena oli skenaario, jossa hakkuita alennettiin ja 20 % saatavilla olevasta bioperäisen hiilidioksidin määrästä varastointiin pysyvästi, mutta muita uusia teknologioita ei otettu käyttöön (20%_BECCS-64Mm3).

sekä työvoiman kohdentumista ja saatavuutta. ENVIMATscen-mallilla tehdyt tarkastelut osoittavat, että osaavan työvoiman saatavuus rajoittaa kansantalouden kasvua, ja tämän rajoitteen vuoksi 100 % hiilidioksidin käyttöasteen BECCUS-skenaarioiden kansantalousvaikutukset jäävät arvonlisäystarkesteluun verrattuna maltillisiksi⁵. Vaikka uusien arvoketjujen arvonlisäpotentiaali on suuri, niiden vaatimat resurssit ovat pois muilta toimialoilta. Tämä vähentää muiden toimialojen arvonlisää ja pienentää siten koko kansantalouden tason vaikutuksia.

Skenaario, jossa hakkuita ainoastaan vähennettiin ilman investointeja uusiin teknologioihin, johti negatiivisiin talousvaikutuksiin. Nykyteollisuuden arvonlisäyksen arvioitiin alenevan 64 Mm³:n hakkuutasolla samassa suhteessa kuin hakkuut vähenivät. Tämä vastasi noin 13,5 % (1,4 Mrd.€) laskua arvonlisäyksessä. ENVIMATscen-mallinnuksessa arvonlisäyksen lasku vastaavilla sektoreilla oli noin 10–12 % (0,9–1,1 Mrd.€), ja bruttokansantuotteen kokonaisvaikutus oli noin -0,2 mrd. €. BKT:n laskua hillitsee se, että mallinnuksessa metsäsektorilta vapautuvat tuotannon tekijät (työvoima ja pääoma) hyödynnetään muilla toimialoilla.

Luonnonvarakeskuksen tuoreiden arvonlisätarkastelujen perusteella on esitetty, että jos uusia puupohjaisia arvonlisä tuotteita ei saada markkinoille, 10 milj. m³:n hakkuiden väheneminen pienentää metsäsektorin arvonlisää noin 1–1,5 miljardia euroa vuodessa (kerrannaisvaikutuksineen n. 2–2,5 mrd/v). Samalla työllisten määrä vähenisi metsäsektorilla noin 5 000–10 000 henkilöllä (kerrannaisvaikutuksineen 10 000–20 000) perusuraan verrattuna. (Kniivilä ym. 2025, Kniivilä ym. 2026) Tässä arviossa ei kuitenkaan ole oletettu sopeutumista työvoiman osalta.

4.5 INVESTOINTEJA TARVITAAN

Metsäteollisuuden uusista, korkeamman jalostusasteen tuotteista, kuten tässä tarkastelluista ligniini- ja tanniinituotteista, on mahdollista saada korkea arvonlisäystä suhteellisen maltillisilla investoinneilla. Tässä tarkastelussa investointitarve oli noin 780–900 miljoonaa euroa. Näiden arvonlisä tuotteiden tuotantoa eivät rajoita samalla tavoin esimerkiksi sähkön tai osaavan työvoiman saatavuus, erityisesti silloin, kun ligniinin erotus toteutetaan siten, ettei se vielä vaikuta sellutehtaan energiaomavaraisuuteen.

Tarkasteltujen BECCUS-skenaarioiden toteutuminen edellyttää sen sijaan merkittäviä investointeja, erityisesti BECCU-teknologian käyttöönotossa. BECCU-skenaarioissa uusien investointien määrä oli 41–244 miljardia euroa hiilidioksidin käyttöasteesta riippuen. BECCS-skenaariot eivät edellytä yhtä suuria investointeja, sillä niiden investointitarve oli 5–28 miljardia euroa, mutta vastaavasti myös arvonlisäys jää niissä alhaisemmaksi. Näitä investointeja verrattiin vuosien 2024–2040 nykyisen metsäteollisuuden ja bioenergiantuotannon kumulatiivisiin investointeihin, jotka olivat nykyistä tuotantoa ylläpitävien vuosittaisten investointien mukaisesti arvioituna noin 34–40 mrd. €.

Tässä työssä tehdyn tarkastelun lisäksi investointeja tarvitaan myös sähkönjakeluun sekä vetyverkkoon, erityisesti BECCU-skenaarioissa. Gasgridin ja Fingridin (2026) selvityksessä todetaan, että heidän arvioimansa korkean kasvun vetyskenaarion (71 TWh lisäsähköntarve) toteutumiseksi sähkön kantaverkon päivittämiseen tarvittaisiin suunniteltujen 5,2 miljardin investointien ja 3 800 kilometrin johtorakentamisen lisäksi vielä noin 200–1000 kilometriä uusia voimajohtoja. Kansallisen vetyverkon investointitarpeeksi on arvioitu noin 8,1 miljardia euroa. Gasgridin ja Fingridin skenaario asettuu suuruusluokaltaan suunnilleen tässä tarkasteltujen 20 % ja 50 % hiilidioksidin käyttöasteen BECCU-skenaarioiden väliin.

⁵ Eroa tuottaa myös mallinnuksen erilainen systeemirajaus.

4.6 KYSYNTÄ TUOTTEILLE LUOTAVA KUNNIANHIMOISELLA ILMASTOPOLITIIKALLA

Tässä tarkasteltujen tuotteiden arvonlisäyspotentiaalin toteutuminen edellyttää toimivien markkinoiden syntymistä. Erityisesti bioperäisestä hiilidioksidista valmistettuihin tuotteisiin ja hiilidioksidin pysyvään varastointiin kohdistuvien investointien mahdollistamiseksi tarvitaan kunnianhimoista, pitkäjänteistä ja vakaata ilmastopolitiikkaa. Näiden tuotteiden markkina syntyy pitkälti sääntelyn ohjaamana. Ilman selkeää tulevaisuudennäkymää tuotteiden kysynnälle investointien toteutuminen on haastavaa. Nykyiset politiikkainstrumentit, kuten RED-direktiivi (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2018) ja ReFuelEU Aviation -asetus (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023b) luovat kysyntää erityisesti BECCU-polttoaineille, mutta tulevat tavoitteet eivät vielä ole konkretisoituneet markkinakysynnäksi. Metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteille tai BECCU-tuotteille, kuten muoveille, ei toistaiseksi ole yhtä selkeitä kannustimia tai kysyntää luovia politiikkainstrumentteja. Myöskään BECCS:lle ei tällä hetkellä ole muuta markkinakysyntää kuin vapaaehtoisen hiilidioksidin poistojen markkinan synnyttämä kysyntä. Euroopan komissio antaa mahdollisesti esityksen BECCS:n liittämistä päästökauppaan kesällä 2026, mutta tämäkään ei vielä nykyisillä päästöoikeuden hinnoilla riitä yksinään kannusteksi BECCS:lle. EU:n uusi biotalousstrategia (Euroopan komissio 2025b) voi puolestaan avata mahdollisuuksia metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden kysynnän vahvistamiseen. Metsäteollisuuden uusien tuotteiden kysyntää voitaisiin vauhdittaa esimerkiksi asettamalla fossiilisia tuotteita korvaaville ratkaisuille eri sektoreilla vastaavanlaisia velvoitteita kuin BECCU-polttoaineille.

Tässä tarkasteltujen metsäteollisuuden ja hiilidioksiditalouden tuotteiden kysyntää voitaisiin EU:n ilmastopolitiikkaan vaikuttamisen ohella vahvistaa myös kansallisin toimin, esimerkiksi asettamalla erillisiä kansallisia tavoitteita. Tällaiset tavoitteet voisivat olla jakelovelvoitteen kaltaisia tai esimerkiksi kiinteitä tavoitteita teknologisille hiilinieluille.

4.7 SKENAARIOIDEN ILMASTOVAIKUTUKSET

Skenaarioiden ilmastovaikutukset muodostuvat metsien hiilinielujen ja teknologisten nielujen vaikutuksista, uusien ja olemassa olevien tuotteiden korvaushyötyjen muutoksista sekä inventaariolaskennan mukaisten väli aikaisten hiilivarastojen muutoksista aiheutuvista puutuotenieluista puu- ja BECCU-tuotteissa. Parhaat nettoilmastovaikutukset saavutetaan matalamman hakkuutason (64 Mm³) skenaarioissa. Myös korkeamman hakkuutason BECCU- ja BECCS-skenaariot tuottavat ilmastohyötyjä nykytilaan verrattuna.

Työssä tehty analyysi osoitti, että vaikka uusilla tuotteilla voidaan saavuttaa nykytilaan verrattuna huomattaviakin ilmastohyötyjä, korkeammalla hakkuutasolla saavutettavat lisähyödyt eivät edes BECCU- ja BECCS-skenaarioissa riitä kompensoimaan metsien hiilinielun heikkenemistä verrattuna alemman hakkuutason tilanteeseen. Työssä käytetty arvio metsien hiilinielumenetyksestä runkopuun jokaista hakattua miljoonaa kuutiometriä kohden oli maltillinen verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin korkeimpiin arvioihin (ks. esim. Soimakallio ym. 2022).

Skenaarioiden ilmastovaikutukset erosivat selvästi sen suhteen, miten ne tukevat Suomen ilmastotavoitteiden ja –velvoitteiden saavuttamista, koska hyödyt ilmastovaikutuksista kohdentuvat eri skenaarioissa eri tavoin Suomen ja ulkomaiden välillä. BECCU-skenaarioissa on oletettavaa, että suurin osa ilmastovaikutuksista kirjautuisi muiden maiden päästöninventarioihin, kun BECCU-tuotteet korvaavat fossiilisia tuotteita Suomen rajojen ulkopuolella. BECCS-skenaarioissa teknologisista nieluista syntyvä ilmastohyöty tukee Suomen ilmastolain mukaisen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamista, mutta ei välttämättä EU:n kansallisten ilmastovelvoitteiden täyttämistä LULUCF- tai taakanjakosektoreilla, mikäli BECCS sisällytetään EU:n yhteiseen päästökauppajärjestelmään.

Metsänielun merkitystä skenaarioiden vaikutuksiin Suomen ilmastotavoitteiden ja -velvoitteiden saavuttamisessa korostaa se, että Luonnonvarakeskuksen uusimman Mela-mallin (Luonnonvarakeskus 2026b) arvion mukaan runkopuun 74 milj. m³ vuosihakkuut johtaisivat Suomen metsät selväksi päästölähteeksi vuonna 2040. Tällöin edes hiilidioksidin 50 % käyttöaste BECCS-skenaarioissa ei riittäisi saavuttamaan hiilineutraaliutta Suomessa vuonna 2040 nykyisen KEITO WAM-politiikkaskenaarion mukaisesti, koska muu maankäyttösektori olisi edelleen selvä päästölähde eikä fossiilisista päästöistä olisi vielä kokonaan päästy eroon (Koljonen ym. 2025b). Mikäli BECCS ei ole täysimääräisesti käytettävissä Suomen päästökaupan ulkopuolisten EU:n ilmastovelvoitteiden täyttämiseksi ja maankäyttösektorin nettonielun säilyttäminen ja jopa vahvistaminen on osa Suomenkin hyväksymää EU:n vuoden 2040 ilmastotavoitetta, EU:n ilmastovelvoitteiden täyttäminen Suomessa tarvitsee tuekseen myös metsien hiilinielujen merkittävää vahvistamista.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tarkastelun tulokset osoittavat, että metsien ja puun käytön resurssitehokkuutta, arvonlisäystä ja ilmastovaikutuksia pystytään parantamaan yhtäaikaaisesti. Metsäteollisuuden korkeamman jalostusarvon tuotteista, kuten kuoren tanniineista (nahan käsittely) ja ligniinisovelluksista (esim. kovahiili akkumateriaaleihin, liimat) voidaan saada merkittävää arvonlisäystä, ja liikkeelle päästään nopeasti suhteellisen maltillisilla investoinneilla. Puun hiilen tehokas hyödyntäminen tulisi toteuttaa ensin materiaalina mahdollisimman tehokkaasti ja pitkäaikaisesti ennen polttoa ja näin edistää kiertotaloutta ja tukea energia- ja materiaalitehokkuutta. Uusien puutuotteiden kysyntää tulisi pyrkiä edistämään EU:n yhteisten toimien kautta EU:n biotalousstrategian mukaisesti.

Suomessa on yksi EU:n merkittävimmistä bioperäisen hiilidioksidin talteenottopotentiaaleista, joka säilyy hyvänä (yli 15 Mt vuodessa), vaikka metsäteollisuuden sivuvirtoja, kuten ligniiniä ja kuorta, ohjattaisiin pois poltosta ja hakkuutaso madaltuisi nykytasosta 64 miljoonaan kuutiometriin vuodessa. Vuonna 2040 Suomi voisi esimerkiksi valmistaa merkittävän osan EU:n synteettisten lentopolttoaineiden tarpeesta ja samalla tuottaa pysyviä hiilidioksidin poistoja.

Bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämisen ratkaisut (BECCU) mahdollistavat potentiaalisen suuren mittakaavansa takia merkittävän arvonlisäyksen, mutta vaativat huomattavia investointeja. Hiilidioksidin hyötykäyttöä suuressa mittakaavassa rajoittaa erityisesti vedyn tuotantoon tarvittavan uusiutuvan sähkön sekä investointipääoman saatavuus.

Bioperäisen hiilidioksidin varastointi (BECCS) vaatii huomattavasti vähemmän investointeja sekä lisäsähkön tuotantoa kuin BECCU mutta luo vastaavasti vähemmän arvonlisäystä, josta osa kohdistuu hiilidioksidin geologista varastointia tarjoaviin maihin. Kotimaisen varastointimahdollisuuden voisi luoda hiilidioksidin mineralisointi kaivosjätteisiin.

BECCU-tuotteiden ja BECCS:n potentiaalinen toteutuminen edellyttää vakaan ja kunnianhimoisen ilmastopolitiikan lisäksi ennakoitavaa kysyntä- ja investointiympäristöä. Markkina syntyy sääntelyn sekä EU:n ja kansallisten tavoitteiden kautta. Toistaiseksi EU on asettanut tavoitteita erityisesti lentoliikenteen synteettisille polttoaineille (ns. RFNBO-polttoaineet). BECCS-kysyntää voidaan luoda esimerkiksi sisällyttämällä pysyvät hiilidioksidin poistot EU:n päästökauppaan, mutta tämä ei todennäköisesti alkuvaiheessa yksinään riitä kannusteeksi. Teknologioiden skaalautuminen vie aikaa, joten potentiaalinen toteuttamiseksi tarvitaan nopeasti demonstraatioita ja investointipäätöksiä teollisen mittakaavan hankkeisiin.

BECCU:n sekä metsäteollisuuden korkeamman arvonlisän tuotteiden ja toisaalta BECCS:n ilmastohyödyt kohdistuvat eri tavoin: uusien tuotteiden ilmastohyödyt näkyvät markkinoiden myötä myös Suomen rajojen ulkopuolella, kun taas BECCS:n muodostamien teknologisten nielujen ilmastohyödyt kohdistuvat Suomen ilmastolain mukaisten tavoitteiden saavuttamiseen. BECCS:n rooli kansallisten EU-velvoitteiden täyttämässä vuoden 2030 jälkeen selkiytyy myöhemmin EU-sääntelyn täsmentyessä.

Metsäteollisuuden ilmastovaikutuksia voidaan parantaa lisäämällä puun materiaalikäyttöä ja kasvattamalla hiilidioksidin talteenottoastetta. Uusi tuotantotoiminta (tässä tarkastellut ligniini- ja tanniinisovellukset sekä BECCUS-ratkaisut) ei kuitenkaan pysty kompensoimaan metsänielun heikkenemisestä aiheutuvaa päästövaikutusta korkeamman hakkuutason skenaariossa verrattuna matalamman hakkuutaso skenaarioon. Tämän vuoksi raportissa tarkastellun matalamman hakkuutaso yhdistäminen uuteen tuotantotoimintaan tukee paremmin tulevien ilmastotavoitteiden ja -velvoitteiden saavuttamista sekä raaka-ainepohjan kestävyyskriteerien mukaisuutta.

Uudet metsäteollisuuden kuori- ja ligniinituotteet sekä hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö voivat mahdollistaa nykyisen tai jopa korkeamman arvonlisäyksen myös nykytasoa maltillisemmalla hakkuutasolla. Jollei uusia arvonlisätuotteita saada markkinoille, hakkuiden väheneminen johtaisi metsäsektorin taloudellisen aktiviteetin laskuun, johon kansantalous ja aluetaloudet joutuisivat sopeutumaan. Hakkuiden 10 milj. m³ alentaminen nykyisellä tuotantorakenteella laskisi metsäsektorin arvonlisää 0,9–1,4 Mrd. € vuodessa. Kansantalouden sopeutumista kuvaavan ENVIMATscen-
tasopainomallin avulla arvioitiin hakkuiden alentamisen laskevan bruttokansantuotetta 0,2 Mrd. € vuodessa, kun mallissa kokonaistyöttömyys säilyy samana.

LÄHTEET

AECOM 2022. Next Generation Carbon Capture Technology: Technoeconomic Analysis (Work Package 6). By Menmuir, D., Berry, K., Florence, S., Cross, A., Cook, G. & Cross, A. Prepared for the Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS). Saatavilla:

<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6294923ce90e07039e31b777/aecom-next-gen-carbon-capture-technology-technoeconomic-analysis.pdf> (Viitattu 12.2.2026).

Ahlvik, L., Haavisto, J., Koponen, K., Korhonen, S., Kulovesi, K., Kankare, V., Mähönen, M., Eskelinen, S. 2026. *Suomi ja Euroopan unionin ilmastopolitiikka 2030-luvulla*. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2026.

Aidoo, E. A. & Fatehi, P. 2026. Lignin-enabled Li-ion battery components: recent advances and outlook. *Green Chemistry* 28, 3911–3935. <https://doi.org/10.1039/d5gc05761b>

Alakangas, E. & Impola, R. 2013. Puupolttoaineiden laatuohje. VTT-M-07608-13. ISBN 978-952-93-3223-6 [viitattu 30.10.2025] Saatavilla: <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2013/VTT-M-07608-13.pdf>

Allen, M. R., Frame, D. J., Friedlingstein, P., Gillett, N. P., Grassi, G., Gregory, J. M., ... Zickfeld, K. 2025. Geological Net Zero and the need for disaggregated accounting for carbon sinks. *Nature*, 638(8050), 343–350. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08326-8>

Arasto, A., Kohl, J., Kujanpää, L., Lehto, J., Lehtonen, J., Lintunen, J., Mäkikouri, S. 2024. Päästäjästä tuottajaksi – Hiilidioksiditaloudella arvonlisää Suomen metsäsektorille. Teknologian tutkimuskeskus VTT & Luonnonvarakeskus. <https://doi.org/10.32040/2024.978-951-38-8835-0>

Babu, S. 2002. Thermal Gasification of Biomass. IEA Bioenergy. Saatavilla: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/18_AR1999Task20colour.pdf

Berglin, N., Von Schenck, A. & Vakkilainen, E. 2024. Biofuels in lime kilns – Operating experience in the Nordic pulp and paper industry. *Tappi Journal*, 23(10) 559–576. Saatavilla: <https://doi.org/10.32964/TJ23.10.559>

Bioenergia ry & Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy 2024. *CO₂-logistiikkaa koskeva julkinen yhteenvetoraportti*. Bioenergia ry. https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2024/10/PUBLIC-SUMMARY-REPORT-CO2-LOGISTICS_Bioenergiary-VTT-04-10-2024.pdf

BloombergNEF 2022. Wind and solar corporate PPA prices rise up to 16.7% across Europe. Saatavilla: <https://about.bnef.com/insights/finance/wind-and-solar-corporate-ppa-prices-rise-up-to-16-7-across-europe/> (Viitattu 21.4.2026).

Borealis 2024. Borealis ottaa jälleen askeleen kohti kestävämpää tulevaisuutta 4,5 miljoonan euron investoinnilla Porvoon olefiiniyksikköön. Lehdistötiedote 9.4.2024. Saatavilla: <https://www.borealisgroup.com/news/borealis-ottaa-j%C3%A4lleen-askleen-kohti-kest%C3%A4v%C3%A4mp%C3%A4-tulevaisuutta-4-5-miljoonan-euron-investoinnilla-porvoon-olefiiniyksikk%C3%B6n> (Viitattu 27.5.2026).

Carbonaide Oy 2026. Auris Energia and Carbonaide start Finland's first biogenic CO₂ capturing from biogas production in Mäntsälä. Uutinen 2.4.2026. Saatavilla: <https://carbonaide.com/news/auris->

energia-and-carbonaide-start-finlands-first-biogenic-co₂-capturing-from-biogas-production-in-mantsala/ (Viitattu 27.4.2026).

Cdr.fyi. 2026. Price Index. Saatavilla: <https://www.cdr.fyi/> (Viitattu 23.1.2026).

Correa Guillen, E., Babaeipour, S., Nousiainen, P., Forssell, S., Forsman, N., Schlapp-Hackl, I., Awais, M., Österberg, M. & Dessbesell, L. 2026. Bio-based dispersion coating designed for enhanced functionality, recyclability and economic feasibility. *Bioresource Technology* 444, 133924. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.133924>

Elliott (n.d.). Centrifugal Compressor Performance Calculator. Saatavilla: https://yrsp.elliott-turbo.com/public/comp_perf/index.jsp https://yrsp.elliott-turbo.com/public/comp_perf/index.jsp (Viitattu 13.1.2026).

Eloranta-Jokela, E. 2023. Stora Enso aikoo lopettaa Sunilan tehtaasta selluntuotannon ja ligniinin erottamisen pysyvästi. *Paperiliitto, Verkkolehti* 4/2023. Saatavilla: <https://verkkolehti.paperiliitto.fi/kaikki-artikkelit/stora-enso-aikoo-lopettaa-sunilan-tehtaasta-selluntuotannon-ja-ligniinin-erottamisen-pysyvasti>.

Energiateollisuus 2024. Raporttimuotoinen kaukolämpötilasto 2023. ISSN 0786-4809. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/05/Kaukolampotilasto_2023.pdf (Viitattu 30.10.2025).

Energiateollisuus 2025. Kaukolämpövuosi 2024, ennakkograafit (PowerPoint) 5.2.2025. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/01/Kaukolampovuosi-2024_ennakkograafit_paivitetty-20250205.pptx (Viitattu 7.11.2025)

Energiateollisuus ry. 2026a. Energiavuosi 2025 Kaukolämpö – Kaukolämmön ennakkotiedot 2025. 21.1.2026. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2026/01/Kaukolampovuosi-2025_ennakkograafit_v1.pdf (Viitattu 12.2.2026)

Energiateollisuus ry. 2026b. Sähkövuosi 2025. Saatavilla: <https://energia.fi/wp-content/uploads/2026/01/Sahkovuosi-2025.pdf>. (Viitattu 1.6.2026)

Energiateollisuus ry. 2026c. Tuulivoima. Saatavilla: <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/tuulivoima/> (Viitattu 27.4.2026).

Energistyrelsen 2025. Technology data catalogue. Saatavilla: <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-generation-electricity-and-district-heating> (Viitattu 28.1.2026).

ESABCC 2025. Scaling up carbon dioxide removals – Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU. doi:10.2800/3253650

European Union Aviation Safety Agency (EASA) 2025. Briefing note: 2024 Aviation Fuels Reference Prices for ReFuelEU Aviation. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/141675/en> (Viitattu 20.1.2026).

European Environment Agency (EEA) 2023. Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC) No 166/2006 - ver. 10.0 Dec 2023. Saatavilla: <https://doi.org/10.2909/ff47e25d-5d4c-491d-b9ce-de17ca61fe6d>

Euroopan komissio 2023a. Komission delegoitu asetus 2023/1184 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan

muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt. Euroopan unionin virallinen lehti L 157/11, 20.6.2023. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2023/1184/oj

Euroopan komissio 2023b. Komission delegoitu asetus 2023/1185 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä vahvistamalla kierrätetyillä hiilipitoisilla polttoaineilla saavutettavia kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiä koskeva vähimmäiskynnys ja täsmentämällä menetelmä muuta kuin biologista alkuperää olevilla uusiutuvilla nestemäisillä ja kaasumaisilla liikenteen polttoaineilla ja kierrätetyillä hiilipitoisilla polttoaineilla saavutettavien kasvihuonekaasupäästöjen vähennysten määrittämiseksi. Euroopan unionin virallinen lehti L 157/20, 20.6.2023. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj

Euroopan komissio 2024a. Commission Staff Working Document: Impact assessment report Part 1 Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society. SWD/2024/63 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52024SC0063>

Euroopan komissio 2024b. Carbon removals and carbon farming – EU carbon removals and carbon farming certification (CRCF) regulation. Saatavilla: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en#eu-carbon-removals-and-carbon-farming-certification-crcf-regulation.

Euroopan komissio 2024c. Komission delegoitu asetus 2024/2620 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2003/87/EY täydentämisestä niiden vaatimusten osalta, joiden perusteella kasvihuonekaasupäästöjen katsotaan olevan pysyvästi kemiallisesti sitoutuneita tuotteeseen. Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 4.10.2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32024R2620>

Euroopan komissio 2025a. Komission täytäntöönpanoasetus 2025/2358 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) 2024/3012 mukaisia sertifiointijärjestelmiä, sertifiointielimiä ja tarkastuksia koskevista säännöistä. Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 21.11.2025. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202502358

Euroopan komissio 2025b. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: Kilpailukykyisen ja kestäväen EU:n biotalouden strategiakehys. COM/2025/960 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:52025DC0960>

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2018. Direktiivi 2018/2001 uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (uudelleenlaadittu). Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 21.12.2018. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023a. Direktiivi direktiivin 2018/2001, asetuksen 2018/1999 ja direktiivin 98/70/EY muuttamisesta uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisen osalta sekä neuvoston direktiivin 2015/652 kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 31.10.2023. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023b. Asetus 2023/2405 tasapuolisten toimintaedellytysten varmistamisesta kestäväälle lentoliikenteelle (ReFuelEU Aviation -aloite). Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 31.10.2023. <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj>

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023c. Asetus 2023/1805 uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden käytöstä meriliikenteessä sekä direktiivin 2009/16/EY muuttamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti, L 234/48, 22.9.2023. <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1805/oj>

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2024a. Asetus 2024/1735 Euroopan nettonollateknologiatuotteiden valmistusekosysteemiä vahvistavasta toimenpidekehyksestä ja asetuksen (EU) 2018/1724 muuttamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 28.6.2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32024R1735>

Euroopan parlamentti ja neuvosto 2024b. Asetus 2024/3012 pysyvää hiilenpoistoa, hiiliviljelyä ja hiilen varastointia tuotteisiin koskevasta unionin sertifiointikehyksen perustamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti, L-sarja, 6.12.2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202403012

Fingrid Oyj 2025. Fingridin sähköjärjestelmävisio vuodelle 2040. Loppuraportti. Lokakuu 2025. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/sahkojarjestelmavisio-2025/fingrid-sahkojarjestelmavisio-2040.-loppuraportti-10_2025.pdf (Viitattu 27.4.2026).

Fingrid Oyj 2026. Sähkökattiloiden kulutuksen summa – reaaliaikatieto (1 min) [tietoaaineisto]. Fingridin avoin data. Dataset ID: 371. Saatavilla: <https://data.fingrid.fi/data?datasets=371> (Viitattu 27.4.2026).

Garcia, S., Weir, H., Van der Spek, M., Saleh, A., Charalambous, C., Sanchez-Fernandez, E., Ros, J., Skylogianni, E., Garcia Moretz-Sohn Monteiro, J., Wiechers, G., Moser, P., Kvamsdal, H.M., Haugen, G., Eldrup, N.H. & Skagestad, R. 2021. Process Integration of Advanced Amine-based Solvents in Power and Industrial Plants: A New Benchmark for Post-combustion Carbon Capture? Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference, 15–18.3.2021.

Gasgrid Finland Oy & Fingrid Oyj 2026. Gasgridin ja Fingridin energiajärjestelmäanalyysi – Loppuraportti. Maaliskuu 2026. Saatavilla: <https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/2026/04/Gasgridin-ja-Fingridin-energiajarjestelmaanalyysi-Loppuraportti-maaliskuu-2026.pdf> (Viitattu 27.4.2026).

Hatta, A., Consoli, C. & Seyyedi, M. 2025 (Dec). Cost of CO₂ storage. Global CCS Institute. Saatavilla: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2025/12/Cost-of-CO2-Storage-1225.pdf> (Viitattu 26.1.2026)

Heikkinen, M., Savolainen, H., Huuki, H. & Karhinen, S. 2026. Will Circular Economy Actions Deliver What is Promised? A Comparative Analysis Using Static and Dynamic Environmentally Extended Input-Output Simulation Models. Manuscript under review. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5170375> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5170375>

Henn, K. A., Forssell, S., Pietiläinen, A., Forsman, N., Smal, I., Nousiainen, P., Bangalore Ashok, R. P., Oinas, P. & Österberg, M. 2022. Interfacial catalysis and lignin nanoparticles for strong fire- and water-resistant composite adhesives. *Green Chemistry* 24(17), 6487–6500. <https://doi.org/10.1039/d2gc01637k>

Hiltunen, P., Lindroos, T. J., Rämä, M. 2025. The impact of electric boilers and heat storages in the Nordic power markets and district heating systems. *Cleaner Engineering and Technology*. Volume 27, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101028>

Hurmekoski, E., Myllyviita, T., Seppälä, J., Heinonen, T., Kilpeläinen, A., Pukkala, T., Mattila, T., Hetemäki, L., Asikainen, A., & Peltola, H. 2020. Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4), 899–912.
<https://doi.org/10.1111/jiec.12981>

International Energy Agency (IEA) 2024. Life cycle Upstream Emission Factors 2024.
https://iea.blob.core.windows.net/assets/3ff59090-1420-4e74-9069-a90602e56bf3/IEAupstreamlifecycleemissionfactors_2024.pdf

IEAGHG 2004. Ship Transport of CO₂. Technical Report PH4/30, July 2004. Saatavilla:
https://publications.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/PH4-30%20Ship%20Transport.pdf

IEAGHG 2019. Further Assessment of Emerging CO₂ Capture Technologies for the Power Sector and their Potential to Reduce Costs. Technical Report 2019-09, September 2019 Saatavilla:
<https://ieaghg.org/publications/further-assessment-of-emerging-co2-capture-technologies/>

IPCC 2018. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: Chapter 4 – Transport of CO₂. Saatavilla: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_chapter4-1.pdf

IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 12: Harvested Wood Products. IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Saatavilla: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch12_HarvestedWoodProducts.pdf

IPCC 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

IPCC 2026. “IPCC Authors Begin Work on Methodology Report on Carbon Dioxide Removal Technologies, Carbon Capture, Utilization, and Storage.” IPCC Newsroom, April 14. Saatavilla:
<https://www.ipcc.ch/2026/04/14/pr-ipcc-cdrt-mr-first-lead-author-meeting/>. (Viitattu 28.5.2026).

ISOPA 2021. Eco-profile of long and short chain polyether polyols for polyurethane products. April 2021. *PlasticsEurope Eco-profiles -ohjelma*. PDF. Saatavilla: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/03/ISOPA-Eco-profile_Polyols_2021.pdf (Viitattu 22.4.2026).

Kalliola, A., Ohra-aho, T., Mikkelsen, A., Kellock, M., Widsten, P., Guizani, C., Winberg, I., Torvinen, K., King, A., Kyllönen, H., Heikkinen, J., Agustin, M., Berg, J., Pauls, G., Sarvola, I. -M., Sorsamäki, L., Grönqvist, S. & Bertella, S. 2025. SmartRecovery to boost lignin commercialization. 01/2023-04/2025. VTT & Aalto-yliopisto. Projektin koontitietosivu. Saatavilla: <https://cris.vtt.fi/en/projects/smartrecovery-to-boost-lignin-commercialization/>

Kangas, P., Kaijaluoto, S. & Määttä, M. 2014. Evaluation of future pulp mill concepts – Reference model of a modern Nordic kraft pulp mill. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 29(4) 620-634. Saatavilla: <https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-04-p620-634>

Karlsson, T., Heliö, N., Atlaskin, E. & Mäkelä, J. (2025). Report 2023 – Finland. IEA Wind TCP. Saatavilla: https://www.iea-wind.org/wp-content/uploads/2024/11/Finland_2023.pdf (Viitattu 12.2.2026).

Kearns, D., Liu, H. & Consoli, C. 2021. Technology Readiness and Costs of CCS. Global CCS Institute. Saatavilla: <https://www.globalccsinstitute.com/publications/technology-readiness-and-costs-of-ccs/>

Kniivilä, M., Keränen, J., Kukkala, A., Mutanen, A., Viitanen, J., Asikainen, A., Paloniemi, R., Tammelin-Peltonen, T. & Vauhkonen, J. 2025. Luontotyyppien ennallistamisen vaikutukset metsäsektoriin: Skenaariotarkastelu hakkuukertymien ja metsäsektorin arvonlisäyksen kehittymisestä sekä korkeamman arvonlisäyksen tuotteiden mahdollisuuksista tasapainottaa muutosta. Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportti 3/2025. Metsäbiotalouden tiedepaneeli, Helsinki. 37 s. URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-65456-6-0>.

Kniivilä, M., Kilpeläinen, H., Mutanen, A., Hirvelä, H., Lintunen, J. & Pitkänen, J. 2026. Metsien ennallistamisen vaikutukset hakkuumahdollisuuksiin, metsien rakenteeseen sekä arvonlisäykseen ja työllisyyteen: Kansallisen ennallistamissuunnitelman laadintaa tukeva raportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 27/2026. Luonnonvarakeskus (Luke). 55 s. URN: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-177-7>.

Koljonen, T. (toim.), Soimakallio, S. (toim.), Silfver, T. (toim.), Kivinen, M. (toim.), Aakkula, J., Aittoniemi, E., Arola, T., Faehnle, M., Forsberg, T., Forsius, M., Haakana, M., Hirvelä, H., Honkatukia, J., Ikkala, L., Jarva, J., Karhinen, S., Karvonen, T., Karvosenoja, N., Kivimaa, P., ... Vähäkuopus, T. 2025a. Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) – keskipitkän aikavälin vaikutusarviot. Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT Technology No. 442. <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2025.T442>

Koljonen, T., Silfver, T., Soimakallio, S., Kivinen, M. ym. 2025b. Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) – pitkän aikavälin ilmastosuunnitelman taustaselvitys. VTT Technology 443. Teknologian tutkimuskeskus VTT. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2025/T443.pdf>

Komission delegeoitu asetus (EU) 2023/1184, annettu 10 päivänä helmikuuta 2023, direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä vahvistamalla unionin menetelmä, jossa säädetään yksityiskohtaisista säännöistä uusiutuvista muista kuin biologista alkuperää olevista nestemäisistä ja kaasumaisista liikennepolttoaineista (RFNBO). EUVL L 157, 20.6.2023, s. 11–19. CELEX: 32023R1184. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1184>

Koponen, K. & Kujanpää, L. 2025. Hiilidioksidin talteenoton, hyödyntämisen ja poiston kansallisen kannustimen arviointikriteerit. Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR00188-25

Koponen, K., Silvennoinen, K., Sokka, L., Niemistö, J., & Horn, S. 2025. Elinkaariarviointi energiasiirtymään liittyvässä EU:n ja Suomen sääntelyssä. Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-00499-25

Kujanpää, L., Linjala, O. & Mäkikouri, S. 2024. Outlook of CO2 logistics in Finland for CCUS. Public summary report. Saatavilla: https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2024/10/PUBLIC-SUMMARY-REPORT-CO2-LOGISTICS_Bioenergiary-VTT-04-10-2024.pdf

Kumar, T.R., Beiron, J., Biermann, M., Harvey, S. & Thunman, H. 2023. Plant and system-level performance of combined heat and power plants equipped with different carbon capture technologies, Applied Energy, 338, 120927. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120927>.

Lintunen, J., Kohl, J., Buchert, J., Asikainen, A., Jyske, T., Maunuksela, J. 2023. Suomi elää metsästä myös 2035 – Keskustelunavaus metsäsektorin arvonlisän kaksinkertaistamiseen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 21 s. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-620-7>

Luonnonvarakeskus 2024a. Suomen virallinen tilasto (SVT): Hakkuukertymä ja puuston poistuma alueittain 2024 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma-alueittain-2024> (Viitattu: 24.10.2025).

Luonnonvarakeskus 2024b. Suomen virallinen tilasto (SVT): Metsäteollisuuden puunkäyttö 2024 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/metsateollisuuden-puunkaytto-2024> (Viitattu 31.10.2025).

Luonnonvarakeskus 2024c. Suomen virallinen tilasto (SVT): Metsäteollisuuden ulkomaankauppa maittain 2024 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsateollisuuden-ulkomaankauppa/metsateollisuuden-ulkomaankauppa-maittain-2024> (Viitattu: 24.10.2025).

Luonnonvarakeskus 2024d. Yhä suurempi osa puun kuiva-aineesta päätyy energiaksi. 28.11.2024. Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/uutiset/yha-suurempi-osa-puun-kuivaaineesta-paatyy-energiaksi> (Viitattu 31.10.2025).

Luonnonvarakeskus 2026a. *Hakkuukertymä ja puuston poistuma alueittain 2025*. Tilasto. Julkaistu 23.4.2026. Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma-alueittain-2025> (Viitattu 18.5.2026).

Luonnonvarakeskus 2026b. MELA tulospalvelu – VMI13 (2019–2023). <https://mela.luke.fi/mela/tupa/index.php> (luettu 15.4.2026). Metsä Group 2026. Metsä Groupin ligniini-koetehdas käynnistyi Äänekoskella. Lehdistötiedote 12.2.2026. Saatavilla: <https://www.metsagroup.com/fi/uutiset-ja-julkaisut/tiedotteet/2026/metsa-groupin-ligniini-koetehdas-kaynnistyi-aanekoskella/> (Viitattu 21.4.2026).

Metsäteollisuus 2025. Metsäteollisuustuotteiden tuotantomäärät nousivat vuonna 2024. 6.3.2025. Saatavilla: <https://metsateollisuus.fi/uutishuone/metsateollisuustuotteiden-tuotantomaarat-nousivat-vuonna-2024/> (Viitattu 4.11.2025).

Moser, P., Wiechers, G., Schmidt, S., Moretz-Sohn Monteiro, J.G., Goetheer, E., Charalambous, C., Saleh, A., van der Spek, M. & Garcia, S. (2021). 'ALIGN-CCUS: Results of the 18-month test with aqueous AMP/PZ solvent at the pilot plant at Niederaussem – solvent management, emissions and dynamic behavior', International Journal of Greenhouse Gas Control, 109, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103381>.

Nevander, M., Hurskainen, M., Kiviranta, K., Mäkikouri, S., Kärki, J. & Lehtonen, J. 2022. D4.1 Techno-economic assessments of selected pathways. BECCU project.

Niiranen, I. 2025. Process design and techno-economic analysis of tannin extraction from spruce bark for leather industry applications [M.Sc. Thesis, Aalto University]. Saatavilla: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/62a7e14a-8247-4a60-a785-ca534f8a4937/content>

- Niiranen, I., Forssell, S., Oinas, P. & Dickson, R. 2026. Techno-economic and life cycle assessment of tannin production from spruce bark for leather industry applications. *Green Chemistry* 28(14), 6284–6294. <https://doi.org/10.1039/D6GC00120C>
- Nurmio, K. & Pakarinen, H. 2024. Tuulivoimapotentiaali Suomessa. Suomen ympäristökeskus (SYKE). Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/573122>
- Onarheim, K., Kangas, P., Kaijaluoto, S., Hankalin, V. & Santos, S. 2016. Techno-Economic Evaluation of Retrofitting CCS in a Market Pulp Mill and an Integrated Pulp and Board Mill. IEAGHG, 2016/10. Saatavilla: <https://ieaghg.org/publications/techno-economic-evaluation-of-retrofitting-ccs-in-a-market-pulp-mill-and-an-integrated-pulp-and-board-mill/>
- Pasquier, L., Mercier, G., Blais, J., Cecchi, E., & Kentish, S. 2016. Technical & economic evaluation of a mineral carbonation process using southern Québec mining wastes for CO₂ sequestration of raw flue gas with by-product recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 50, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.04.030>
- Pauls, G., Sorsa, O., Paajanen, A., Modi, V., Leclerc, S., Bouizi, Y., Dufour, A., Kalliola, A., & Guizani, C. 2026. Inorganics from kraft black liquor enable rapid oxidative crosslinking and morphology control in lignin derived hard carbons. *Bioresource Technology*, 447, 134177. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.134177>
- Pagliari, M., Albanese, L., Scurria, A., Zabini, F., Meneguzzo, F., & Ciriminna, R. 2021. Tannin: A new insight into a key product for the bioeconomy in forest regions. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15, 973–979.
- Pizzi, A. 2019. Tannins: Prospectives and actual industrial applications. *Biomolecules*, 9, 344.
- Pizzi, A. 2021. Tannins medical / pharmacological and related applications: A critical review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 22, 100481.
- PlasticsEurope 2025. *Plastics the Fast Facts 2025: Global and European plastics production and economic indicators (2024 data)*. Verkkojulkaisu (PDF). Saatavilla: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf (Viitattu 27.4.2026).
- Ruokonen, J., Ulvila, L., Lähdesmäki, E., Tuomisalo, T., Breyer, C., Laaksonen, P. & Kauranen, P. 2026, Electricity-based methanol-to-X as integral solution in hard-to-abate segments in the energy-industry system in the case of Finnish industry expectations. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 203, 153171, 12 p. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.153171
- Sathre, R. & O'Connor, J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy* 13(2), 104. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>
- Savolainen, H., Niemistö, J., Heikkinen, M., Seppälä, J., Springare, S., Salminen, J., Savolahti, M., Soimakallio, S., Ruokamo, E., Koljonen, T., Harlin, A., Keränen, J., Vainio, T., Vainio-Kaila, T., Kivikytö-Reponen, P., Orko, I., Karhu, M., Lehtonen, H., Joutsjoki, V., Niemeläinen, O., Kivinen, M., Eerola, T., Heino, N., Kaariaho, T. 2024. Suomen kansantalouden materiaalivirrat ja niiden vaikutukset: Toteutunut kehitys ja kiertotalouden skenaariot vuodelle 2035. Valtioneuvosto.

Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J.-M., Härmä, T., Korhonen, M.-R., Saarinen, M., Virtanen, Y. 2011. An assessment of greenhouse gas emissions and material flows caused by the Finnish economy using the ENVIMAT model. Journal of Cleaner Production, Promoting Transformation towards Sustainable Consumption and Production in a Resource and Energy Intensive Economy - the Case of Finland 19, 1833–1841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.021>

Seppälä, J., Heinonen, T., Pukkala, T., Kilpeläinen, A., Mattila, T., Myllyviita, T., Asikainen, A. & Peltola, H. 2019. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. J. Environ. Management: 247, 580–587.

Seppälä, J., Heinonen, T., Kilpeläinen, A., Peltola, H., Pukkala, T., Sihvonen, M., Soimakallio, S., Weaver, S., Vesala, T., Ollikainen, M. 2022. Metsät ja ilmasto: Hakkuut, hiilinielut ja puun käytön korvaushyödyt. Suomen ilmastopaneelin raportti 3/2022. <https://ilmastopaneeli.fi/hae-julkaisuja/metsat-ja-ilmasto-hakkuut-hiilinielut-ja-puun-kayton-korvaushyodyt/>

Seppälä, J., Pukkala, T., Kotiaho, J., Aalto, J., Bäck, J., Kallio, K.P., Karttunen, M., Koivula, M., Laine, I., Oksanen, E., Ollikainen, M., Silfverberg, O., Salo, M., Soimakallio, S., Weaver, S., Vesala, T. 2026. Metsien hakkuiden, ilmastotavoitteiden ja luonnon monimuotoisuuden suojelun yhteensovittaminen – Skenaariotarkastelu eri hakkuutasoilla. Suomen ilmastopaneelin raportti 1/2026. <https://ilmastopaneeli.fi/hae-julkaisuja/metsien-hakkuiden-ilmastotavoitteiden-ja-luonnon-monimuotoisuuden-suojelun-yhteensovittaminen/>

Sika 2023. Declaration of conformity with Model EPD: Casco® MultiTech (Version 1, 20.2.2023). PDF. Saatavilla: https://nor.sika.com/dms/getdocument.get/af71cb97-1423-486c-92cc-5094390b9bb0/cascomultitech_no_no_epd.pdf

Soimakallio, S., Böttcher, H., Niemi, J., Mosley, F., Turunen, S., Hennenberg, K. J., Reise, J., & Fehrenbach, H. 2022. Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon. GCB Bioenergy, 14(8), 989–1000. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12981>

Sorsamäki, L., Winberg, I. & Sarvola, I.-M. 2025. SmartRecovery WP5 - Final Report Slides. SmartRecovery concept. Julkaisematon projektiraportti, VTT.

Suomen ilmastopaneeli 2025. Suomen hiilineutraalispolku – Arvio hiilineutraaliuden saavuttamisesta ja sen keinoista. Suomen ilmastopaneelin julkaisuja 1/2025. <https://ilmastopaneeli.fi/hae-julkaisuja/suomen-hiilineutraalispolku-arvio-hiilineutraaliuden-saavuttamisesta-ja-sen-keinoista/>

Suomen uusiutuvat 2025a. Tietoa tuulivoimasta. Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/tuulivoiman-yhteiskuntavaikutukset/taloudellisuus/investoinnit/> (Viitattu 12.2.2026).

Suomen uusiutuvat 2025b. Talvella tuulee eniten. Saatavilla: <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten/> (Viitattu 3.2.2026).

Tilastokeskus 2024a. Polttoaineluokitus 2024. Saatavilla: https://stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html (Viitattu: 30.10.2025).

Tilastokeskus 2024b. Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuustuotanto [verkkajulkaisu]. ISSN=1798-6389. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla: https://stat.fi/fi/tilasto/tti_Teollisuustuotanto_tuotenumikkeittain_muuttujina_Vuosi_PRODCOM-koodi_ja_Tiedot.PxWeb (Viitattu: 12.2.2026).

Tilastokeskus 2026a. Suomen virallinen tilasto (SVT): Kansantalouden vuositilinpito [verkkajulkaisu]. ISSN=2954-0828. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla: <https://stat.fi/fi/tilasto/vtp> (Viitattu: 30.1.2026).

Tilastokeskus 2026b. Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestöennuste [verkkajulkaisu]. ISSN=1798-5137. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla: <https://stat.fi/tilasto/vaenn> (Viitattu: 24.3.2026).

Tilastokeskus 2026c. Energian kokonaiskulutus väheni prosentoin vuonna 2025. Energian hankinta ja kulutus 2025, 4. neljännes. Julkaistu 16.4.2026. Saatavilla: <https://stat.fi/fi/julkaisu/cmfg0s2fc6bp5707t7gegb9rkg> [stat.fi]

TEM 2022. Suomen biotalousstrategia. *Kestävästi kohti korkeampaa arvonlisää*. Valtioneuvoston julkaisuja 2022:3. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-547-4>

TEM 2025a. Bioperäisen hiilidioksidin 90 miljoonan euron hankehaku käynnistyy. Tiedote 11.12.2025. <https://tem.fi/-/bioperaisen-hiilidioksidin-talteenoton-90-miljoonan-euron-hankehaku-kaynnistyy>

TEM 2025b. *Valtioneuvoston selonteko: Pitkän aikavälin ilmastosuunnitelma*. Huttunen, R., Kuuva, P., Lemström, B., Hirvonen, P., Kinnunen, M. (toim.) Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2026:6. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-984-1>

Trompoukis, C., Koponen, K., Elfving, J., Bajamundi, C., Deliukov, A., Kila, A., Bormans, J. 2025. The role of Direct Air Capture technologies in the EU's decarbonisation effort. Publication for the Committee on Industry, Research and Energy, Policy Department for Transformation, Innovation and Health, European Parliament, Luxembourg. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/772474/ECTI_STU\(2025\)772474_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/772474/ECTI_STU(2025)772474_EN.pdf)

Tumara, D., Uihlein, A. and Hidalgo Gonzalez, I. 2025. *Shaping the future CO2 transport network for Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, doi:10.2760/582433, JRC136709.

Valtioneuvosto 2023. Vahva ja välittävä Suomi. Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58. Saatavilla: <https://valtioneuvosto.fi/hallitukset/hallitusohjelma#/>

Valtiovarainministeriö 2024. Taloudellinen katsaus, kevät 2024. Valtiovarainministeriön julkaisuja 2024:31. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-367-481-3>

Vuori, K.-M. (toim.), Hytönen, J. (toim.) Akujärvi, A., Forsius, M., Heikkinen, R., Hytönen, J., Juntila, V., Leikola, N., Nurmio, K., Pekkonen, M., Saastamoinen, U., Toivonen, M., Vanhala, P. 2026. Tuuli- ja aurinkovoiman ekologinen kestävyys Suomessa - Nykytila ja kehittämistarpeet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 15:2026.

Wang, A., Zhang, G., Li, M., Sun, Y., Tang, Y., Sun, K., Lee, J.-M., Fu, G., & Jiang, J. 2025. Lignin derived hard carbon for sodium ion batteries: Recent advances and future perspectives. *Progress in Materials Science*, 152, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101452>

Weiss, R., Suomalainen, M., & Lehtonen, J. (Eds.). 2024. Optimal electrolysis routes and dimensioning for a sustainable Aviation fuel PTL plant (EFCF 2024: 16th European SOFC&SOE Forum, Vol. A1107). EFCF.

Winqvist & Hakala 2026. Biogas plants as source of Bio-CO2 for local applications and logistics cost calculation. Presentation in Bio-CO2 Use and Removal event 2026.

Österberg, M., Karjalainen, M., Lintunen, J., Tammelin, T., Asikainen, A., Vakkilainen, E., Toivonen, R., Virta, P., Henn., A., Nuutinen, E.-M., Kohl, J. & Hassinen, J. 2024. Lankusta lääkkeisiin - Tuoteportfolion arvonnoususta uutta arvonlisää metsäsektorille. Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportti 1/2024.

Saatavilla: <https://metsatiedepaneeli.fi/wp-content/uploads/2024/04/Lankusta-laakkeisiin-Tuoteportfolion-arvonnoususta-uutta-arvonlisaa-metsasektorille.pdf>

LIITTEET

LIITE 1. EU:N CCUS-POLITIIKKAINSTRUMENTIT

EU pyrkii edistämään CCUS-ratkaisuja usein eri politiikkainstrumentein, joista tärkeimpiä ovat esimerkiksi:

- Teollisen hiilenhallinnan strategia (Industrial Carbon Management Strategy, Euroopan komissio 2024b), jossa esitetään visio sekä kunnianhimoisia tavoitteita CCUS:lle EU:ssa (vrt. kuva 2).
- Net Zero Industry Act (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2024a), joka asettaa fossiilisten polttoaineiden tuottajille EU:ssa mandaatin lisätä geologisen varastoinnin kapasiteettia 50 Mt vuoteen 2030 mennessä.
- Pysyvää hiilenpoistoa, hiiliviljelyä ja hiilen varastointia tuotteisiin koskeva sertifiointikehys (CRCF, Euroopan parlamentti ja neuvosto 2024b, Euroopan komissio 2025a), joka luo vapaaehtoisen sertifiointikehysten hiilidioksidin poistoille. Sertifiointia voitaisiin käyttää esimerkiksi EU:n sisäisellä hiilimarkkinalla. BECCS:n, DACCS:n ja biohiilen sertifiointikriteerit julkaistiin vuoden 2026 alussa.
- Päästökauppadirektiivi (EU ETS):
 - Fossiilisten päästöjen talteenotolla ja geologisella varastoinnilla tai mineralisoimalla (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2024b, Euroopan komissio 2024c) hiilidioksidia pysyviin tuotteisiin voi välttää ETS-yksikköjen ostamisen.
 - ETS:n päivityksen yhteydessä vuonna 2026 tarkastellaan pysyvien hiilidioksidin poistojen liittämistä EU:n päästökauppaan. Tätä on tutkittu tarkemmin Ilmastopaneelin raportissa EU:n vuoden 2030 jälkeisestä ilmastoarkkitehtuurista (Ahlvik ym. 2026).
- Kannusteita CCU:lle luovat esimerkiksi:
 - RED-direktiivi (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2018, 2023a, Euroopan komissio 2023a, 2023b, tavoitteet synteettisille polttoaineille (RFNBO) sekä sen alaiset delegoidut asetukset (Euroopan komissio 2023a, b), joissa asetetaan kestävyyskriteerejä RFNBO-polttoaineille sekä käytetyn hiilidioksidin alkuperälle (ks. Koponen ym. 2025). Vain BECCS:n tai DACCS:n avulla talteenotettu hiilidioksidi kelpaa RFNBO-polttoaineiden raaka-aineeksi vuodesta 2040 alkaen (Euroopan komissio 2023b).
 - ReFuelEU Aviation (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023b) asettaa tavoitteita hiilidioksidista valmistettujen synteettisten polttoaineiden käytön lisäämiselle lentoliikenteessä EU:ssa vuoteen 2050 asti.
 - FuelEU Maritime (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2023c) asettaa tavoitteita synteettisten polttoaineiden käytölle meriliikenteessä.
- EU Innovation Fund on myöntänyt investointitukia CCUS-hankkeille.
- Euroopan komissio on biotalousstrategiassa (Euroopan komissio 2025b) ehdottanut osto-ohjelmaa hiilidioksidin poistoille (EU Buyer's Club). Ohjelman tarkoituksena on koota yhteen yksityisten yritysten vapaaehtoinen kysyntä hiilidioksidin poistoille, johon voidaan vastata CRCF:n mukaisilla poistoyksiköillä.

LIITE 2. TILASTOPOHJAISEN PUUNKÄYTTÖMALLIN MATERIAALI- JA ENERGIAVIRTOJEN LASKENTA

Raaka-ainevirtojen ja saantojen laskenta

Mallin materiaalivirtojen laskenta toimii siten, että ensin annetaan mallille lähtöarvoksi hakkuukertymä, esimerkiksi vuoden 2024 73,7 milj. m³ kosteaa kiintokuutiota.⁶ On huomioitava, että mallissa esitetyt muutkin kuutiomäärät tarkoittavat nimenomaan kosteita kiintokuutiomääriä, ellei toisin mainita. Malliin on syötetty parametreiksi joukko lineaarisia riippuvuuksia vastaamaan vuoden 2024 tilastojen mukaisia osuuksia siitä, mihin tuo hakkuukertymä käytettiin: tukkipuuksi 28,6 milj. m³/73,7 milj. m³ eli 38,8 %, kuitupuuksi 33,4 milj. m³/73,7 milj. m³ eli 45,3 % ja niin edelleen. Puunkäytön osuuksien tapauksessa nämä lineaariset riippuvuudet voidaan määritellä yhtälön 1 mukaan,

$$\text{Puunkäytön osuus } A [\%] = \frac{\text{Käyttömäärä } A \text{ (v.2024)}[m^3]}{\text{Käytöt yhteensä (v.2024)}[m^3]}, \quad (1)$$

missä Puunkäytön osuus A voi merkitä esimerkiksi tukkipuun osuutta hakkuukertymästä, Käyttömäärä A v. 2024) vuonna 2024 käytettyä tukkipuun määrää kuutioina ja Käytöt yhteensä (v. 2024) koko vuoden 2024 hakkuukertymää.

Alemman hakkuukertymän skenaariossa puun käytön oletetaan jakautuvan samassa suhteessa kuin perustapauksen hakkuukertymän skenaariossa. Näin esimerkiksi hakkuukertymästä 63,7 milj. m³ edelleen sama vuoden 2024 osuutta vastaava määrä on tukkipuuta (38,8 %) ja kuitupuuta (45,3 %) ja näitä vastaavat määrät siten 24,7 milj. m³ tukkipuuta ja 28,9 milj. m³ kuitupuuta.

Hakkuukertymän lisäksi malliin tulee puuvirtoina tuontipuuta (5,5 milj. m³ v. 2024) ja hakkuutähteitä, kantoja ja kierrätyspuuta (3,9 milj. m³ v. 2024). Näiden jakautuminen eri käyttökohteissa on mallinnettu myös yhtälön 1 mukaisesti noudattaen vuoden 2024 käyttöjä. Samoin tuontipuun ja hakkuutähteiden kokonaismäärä alemman hakkuukertymän skenaarioissa mallinnettiin yhtälön 1 mukaisesti suhteutettuna vuoden 2024 tilanteeseen.

Raaka-aineista tuotteiksi muuntokertoimet eli saannot puolestaan perustuvat pääasiassa saman vuoden 2024 tilastotuihin puun käyttömääriin sekä tuotanto- ja vientimääriin (Luonnonvarakeskus 2024b; Luonnonvarakeskus 2024c; Metsäteollisuus 2025; Energiateollisuus 2024). Esimerkiksi saha- ja puutuotetehtaat tuottivat yhteensä 11,8 milj. m³ sahatavaraa ja vaneria, josta sahatavaran osuus oli 10,9 milj. m³ ja vaneria 0,9 milj. m³ (Metsäteollisuus 2025). Mallinnettu saanto lasketaan lineaarisena riippuvuutena eli samankaltaisesti kuin yhtälössä 1, joka tässä tapauksessa muuttuu yhtälön 2 muotoon:

$$\text{Saanto } A [\%] = \frac{\text{Tuotantomäärä } A \text{ (v.2024)}[m^3]}{\text{Käyttömäärä (v.2024)}[m^3]}. \quad (2)$$

Lämpö- ja voimalaitosten mallinnuksessa käytettiin samaa periaatetta, mutta yksiköksi saannolle tuli [MWh/m³] ja saannot laskettiin sekä lämmölle, että sähkölle. Pienpolton osuus mallinnettiin myös

⁶ Skenaariotilanteissa ja laskentamallissa on toisinaan merkitty tilan säästämiseksi milj. m³ sijaan "Mm³" tai "Mm3", vaikka nämä eivät ole SI-järjestelmän mukaisia merkintätapoja. SI-järjestelmän mukaisesti voitaisiin merkitä hm³ = 100 m * 100 m * 100 m = 1 000 000 m³, mutta tämä on harvoin käytetty merkintätapa.

tilastoiduin osuuksin. Massatehtaista puolimekaaninen ja mekaaninen massanvalmistus sekä paperin- ja kartonginvalmistus mallinnettiin yhtälön 2 mukaisesti tilastoihin pohjautuen ja bioperäisten hiilidioksidipäästöjen osalta laituskategorian tilastoituihin päästöihin pohjautuen.

Poikkeuksena näihin tilastoituihin pohjautuviin saantoihin oli sellutehtaiden mallinnus, jota koskevat teknologiset muutokset vaativat yksityiskohtaisempia muutoksia sellutehtaan referenssimalliin (Kangas ym. 2014) pohjautuen. Yksityiskohtaisempi mallinnus on ollut välttämätöntä, koska Tech-skenaarioissa tarkastellaan muutoksia, kuten ligniinin erotusta, jolla on vaikutus sähköntuotannon määrään muuttamatta selluntuotannon määrää. Sellutehtaan osalta mallinnettiin lineaarisin riippuvuuksin sellunkeiton saanto (mustalipeän tuotantomäärä suhteessa syötetyn hakkeen määrään), ligniinin erotus, meesauuneille kaasutettavan kuoren osuus, kaasutuksen saanto, kuoren poltto kuorikattiloilla, kuoren jalostus sekä yhdistetty sähkön- ja höyryntuotanto.

Polton laskenta ja energiantuotanto

Polton mallinnuksessa laskettiin polttoaineiden kosteista kiintokuutiolavuuksista poltossa vapautuvan lämmön määrä sekä muodostuvan hiilidioksidin määrä. Puupolttoaineiden keskimääräisenä lämpöarvona lämpö- ja voimalaitoksissa käytettiin arvoa 1,96 TWh/milj. m³, perustuen tilastoituihin tietoihin tuotetusta energiasta 43,1 TWh ja käytetystä kuutiolavuudesta 22,0 milj. m³ (Luonnonvarakeskus, 2024d). Pienpoltossa polttopuun lämpöarvona käytettiin arvoa 1,53 TWh/milj. m³, hakkeen kiintokuutiolavuuden ja irtokuutiolavuuden suhteena arvoa 0,4 perustuen Puupolttoaineiden laatuohjeeseen (Alakangas & Impola 2013), ja kuoren kiintokuutiolavuuden ja irtokuutiolavuuden suhteena arvoa 0,35 (Luonnonvarakeskus 2023). Kuoren lämpöarvona käytettiin lehtipuun ja havupuun hakkuukertymän mukaista painotettua keskiarvoa (n. 20% lehtipuuta, 0,75 MWh/irto-m³; n. 80% havupuuta, 0,60 MWh/irto-m³), joka sai arvon 0,63 TWh/milj. m³.

Soodakattiloissa poltetun mustalipeän määrä, kuiva-ainepitoisuus ja korkeampi lämpöarvo laskettiin Kangas ym. (2014) mallinnuksen mukaan keskiarvona lehti- ja havupuusellunkeiton arvoista. Mustalipeän lämpöarvoksi tuli 13,95 GJ/t kuiva-ainetta. Meesauuneissa poltetun kuorikaasun valmistuksessa käytettiin kaasutuksen energiahyötysuhteena arvoa 80 % (Babu, 2002). Vuonna 2020 Suomen sellutehtaiden meesauunien polttoaineiden kokonaisenergiamäärästä 4,2 TWh oli polttoöljyä 0,745 TWh, maakaasua 1,528 TWh, vetyä 0,051 TWh, metanolia 0,270 TWh, kuoren kaasutuskaasua 0,754 TWh, mäntypikeä 0,530 TWh, ligniiniä 0,181 TWh ja puupölyä 0,153 TWh (Berglin ym. 2024). Tässä työssä oletettiin yksinkertaistaen, että peruskkenaarioissa polttoaineena on joko kuoren kaasutuskaasu (18 % meesauunien energiantarpeesta, vastaten kuoren kaasutuskaasun osuutta vuonna 2020) tai maakaasu (lopun 82 %).

Puupolttoaineiden bioperäisen hiilidioksidin päästökertoimenä käytettiin 112 tCO₂/TJ (Tilastokeskus 2024), joka lämpöarvon mukaan muutettuna oli lämpö- ja voimalaitoksille 0,79 MtCO₂/milj. m³ ja pienpoltossa käytetyille haloille 0,61 MtCO₂/milj. m³, ja kuorikattiloissa poltetulle kuorelle 0,73 MtCO₂/milj. m³. Mustalipeän bioperäisen hiilidioksidin päästökerroin oli 95,3 tCO₂/TJ, kuorikaasun päästökerroin 108 tCO₂/TJ ja maakaasun fossiilisen hiilidioksidin päästökerroin 68,22 tCO₂/TJ (Tilastokeskus 2024).

Polttoaine- ja tuotantomääristä lasketut hiilidioksidimäärät jaetaan laituskategorioiden välillä vuoden 2022 päästötietokannan (EEA 2023) mukaisissa suhteissa. Sellutehtailla vapautuvasta bioperäisestä hiilidioksidista 49,5 % tuotetaan suurilla biotuotetehtailla (Kategorian 1 laitokset) ja 50,5 % keskikokoisilla sellutehtailla (Kategorian 2 laitokset). Muissa laitoksissa (Kategorian 3 laitokset) tuotetusta hiilidioksidista >0,1 MtbioCO₂/a laitosten osuus, 78,7 % ohjataan hiilidioksidin talteenottoon CCU- ja CCS-skenaarioissa ja lopun 21,3 % oletetaan vapautuvan < 0,1 MtbioCO₂/a laitoksista ilman

hiilidioksidin talteenottoa. On myös huomattava, että tilastoituna ei ole <0.05 Mt bioCO₂/a tuottavien laitosten päästötietoja.

Lämpö- ja voimalaitokset on mallinnettu yhdistelmänä 1) kaukolämpöä tuottavia sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksia, joista käytetään tässä lyhennettä kaukolämpö-CHP, (*combined heat and power*), 2) teollisuuteen lämpöä tuottavia yhteistuotantolaitoksia, joista käytetään termiä teollisuus-CHP sekä 3) lämpölaitoksia, jotka tuottavat pelkkää lämpöä tai höyryä joko kaukolämpöverkkoon tai teollisuuden tarpeisiin. Puun energiakäytön tilastosta (Luonnonvarakeskus 2024d) selviää kiinteiden puupolttoaineiden käyttömäärät, joista on tässä työssä erotettu kuoren osuus kuoren jalostuksen tarkastelua varten. Mallinnettuja lämpö- ja voimalaitoksissa poltettavia kiinteitä puupolttoaineita ovat energiapuusta valmistettu metsähake, hakkuutähteet, kierrätyspuu sekä sahoilta ja puutuotetehtailta tuleva sivutuotepuu. Näistä tuotetaan lämpö- ja voimalaitoksissa yhteensä kaukolämpötilaston (Energiateollisuus 2024) mukaisissa osuuksissa sähköä ja lämpöä. Lämmön ja sähkön lisäksi poltossa syntyy bioperäistä hiilidioksidia.

Lämpö- ja voimalaitoksissa poltettu polttoaine muunnettiin sähköksi ja lämmöksi järjestelmätason tuotantomääriä vastaavilla hyötysuhteilla, pois lukien sähkökattilat (2 % kaukolämmön hankinnasta). Kaukolämmön hankinta yhteensä oli 35,97 TWh (98 % kokonaismäärästä 36,7 TWh), kaukolämmön tuotannon yhteydessä CHP-laitoksilla tuotettu sähkö yhteensä oli 5,9 TWh ja kaukolämmön hankinnassa käytetyt polttoaineet energiasisällöltään yhteensä olivat 43,2 TWh. (Energiateollisuus 2024) Tämän perusteella lämmön- ja sähköntuotannon hyötysuhteiksi järjestelmätasolla tuli 83,3 % ja 13,7 % sähköä eli yhteensä jopa 96,9 %, mikä oli mahdollista lämpöpumppujen ja savukaasupesureiden avulla.

Sellutehtaiden höyryn- ja sähköntuotannon hyötysuhteet perustuivat Kangas ym. (2014) mallinnustyöhön, jossa sellutehtailta on yksi yhteinen turbiinisaareke sähköntuotannolle. Polttoaineiden lämpöarvosta höyryksi saadaan mallin mukaan muutettua 69 % ja höyrystä sähköksi 24,9 %.

Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen laskenta

Skenaariolaskennassa osa tarkastelluista muutoksista vaikutti siten, että lämpö- ja voimalaitosten lämmön kuluttajille tarvitaan lisää lämpöä puupolttoaineiden määrän vähentyessä. Lisäinen lämmöntarve laskettiin vertaamalla kussakin skenaariossa lämpö- ja voimalaitosten tuottamaa lämmön määrää vuotta 2024 vastaavaan perustilanteeseen. Näin laskettu lämmöntuotannon lisätarve katettiin skenaariossa sekoituksella sähkökattiloita ja lämpöpumppuja. Mallissa sähkökattilat ja lämpöpumput kuvaavat siis uusia asennuksia suhteessa nykytilaan. Sähkökattilat tuottavat sähköstä suoraan lämpöä ja höyryä pienellä lämpöhäviöllä, kun taas lämpöpumput vaativat kalliimman investoinnin, mutta tuottavat moninkertaisen määrän lämpöä suhteessa käytettyyn sähkön määrään.

Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen vuosituotannon osuudet kaukolämmöntuotannosta olivat vuoden 2024 ennakkotietojen mukaan n. 4 % sähkökattiloihin ja n. 16 % lämmöntalteenottoon ja lämpöpumppuihin perustuvaa tuotantoa. Tämä n. 1:4 tuotantomäärien suhde vastasi likimain myös Energiateollisuuden jäsenkyselyyn perustuvaa arviota näiden tuotantomuotojen keskinäisestä suhteesta vuoteen 2030 asti. (Energiateollisuus 2025)

Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen kuluttama sähköenergian määrä laskettiin lämmöntarpeesta käyttämällä sähkökattiloille hyötysuhdetta 99 % ja lämpöpumppuille tehokerrointa (COP, engl. *coefficient of performance*) 520 %. (Energistyrelsen 2025)

Suomeen on lyhyellä aikavälillä asennettu yli 3000 MW sähkökattilakapasiteettia. Kun sähkön hinta on alhaisempi kuin puupolttoaineen ja myös silloin kun isoilla pakkasilla sähkön hinta on alhaisempi kuin

öljyä käyttävän huippulämpökattilan, sähköllä tehdään laajasti kaukolämpöä sekä teollisuuden höyryä. Tämä vähentää ostobiomassan käyttöä, joka näkyy jo selvästi 2025 kaukolämpötilastossa (Energiateollisuus 2026).

Massanvalmistus

Massanvalmistuksen syötteinä ovat kuitupuu, tuontihake sekä sahakke sahoilta ja puutuotetehtailta. Lisäksi Tech-skenaariossa energiapuusta valmistettua metsähaketta ohjataan lämpö- ja voimalaitoksilla polttamisen sijaan massanvalmistukseen.

Massanvalmistus on eroteltu kahteen osaan: 1) kemiallinen sellun valmistus ja 2) mekaaninen ja puolikemiallinen massateollisuus. Kuitupuun ja sahakkeen käyttö näissä käyttökohteissa on eroteltu. Sellunkeittoon liittyvistä teknologisista muutoksista tarkastellaan hiilidioksidin talteenottoa, ligniinin erotusta, kuoren jalostusta ja meesauuneilla fossiilisen maakaasun korvaamista sahojen ja puutuotetehtaiden sivutuotepuun poltolla, kuten sahanpurulla. Mekaanisen ja puolikemiallisen massateollisuuden osalta teknologisina muutoksina tarkastellaan vain hiilidioksidin talteenottoa.

Massanvalmistuksen alkuvaiheessa kuitupuusta erotetaan kuori. Sellutehtailta kuorta kaasutetaan sekä poltetaan kuorikattiloissa. Sellutehtaiden kuorta jalostetaan Tech-skenaarioissa tanniinituotteiksi, jolloin sellutehtaiden sähköntuotanto pienenee. Sen sijaan mekaanisen ja puolikemiallisen massateollisuuden kuori rajattiin jätettäväksi laitosten omaan käyttöön, jotta energiaomavaraisuus ei vaarantuisi. Sellutehtailta kaikki hake käytetään sellunkeittoon, jossa tuotetaan sellua ja mustalipeää. Kaikki massateollisuuden tuotetut massat yhdistetään mallissa, ja osa massoista päättyy suoraan vientiin ja osa jalostetaan paperiksi ja kartongiksi. Sellunkeiton mustalipeästä erotetaan Tech-skenaarioissa ligniiniä, ja loppu mustalipeä poltetaan kemikaalien kierrättämiseksi sekä höyryn ja sähkön tuottamiseksi. Sellutehtaiden sähköntuotanto soodakattiloiden ja kuorikattiloiden höyrystä sähköksi on käsitelty yhdistettynä turbiinilaitoksena.

Massanvalmistuksen sekä paperin ja kartonginvalmistuksen bioperäiset hiilidioksidipäästöt syntyvät mallinnuksen mukaan tarkemmin eriteltynä sellutehtailta sekä yhdistettynä hiilidioksidivirtana mekaanisen ja puolikemiallisen massan valmistuksen laitoksilta sekä paperi- ja kartonkitehtailta. Sellutehtailta on eritelty mustalipeän poltto soodakattilassa, kuorikaasun poltto meesauunissa ja kuoren poltto kuorikattilassa.

Sahat ja puutuotetehtaat

Mallissa sahojen ja puutuotetehtaiden syötteenä on tukkipuu. Tech-skenaarioissa, joissa kuori jalostetaan tanniinituotteiksi, on toisena syötteenä sahoille ja puutuotetehtaille lisälämpö, joka tuotetaan sähkökattiloilla ja lämpöpumpuilla. Sahoilla ja puutuotetehtailta syntyy päätuotteena sahatavaraa ja vaneria. Sivutuotteina syntyy kuorta, sahaketta massanvalmistukseen sekä sivutuotepuuta polttoon. Perusskenaariossa kuori poltetaan omaan energiakäyttöön ja sivutuotepuu poltetaan lämpö- ja voimalaitoksilla. Sahahake käytetään kaikissa skenaarioissa massanvalmistuksessa. Tech-skenaarioissa sivutuotepuusta osa käytetään sellutehtaiden meesauunien polttoaineena korvaamaan fossiilista maakaasua.

Ligniinin talteenoton laskenta

Ligniinin talteenotto laskettiin perustuen viimeaikaiseen tutkimushankkeeseen, jonka aineistossa on kuvattu ultrasuodatukseen ja spraykuivaukseen perustuva prosessi (Sorsamäki ym. 2025). Ligniiniä erotetaan näissä tarkasteluissa vain sen verran, että sellutehdas pysyy höyryn suhteen omavaraisena,

vaikka höyryä käytetään myös hiilidioksidin talteenottoon. Tech-skenaarioissa erotettu ligniinin määrä on soodakattilaan menevän mustalipeän kuiva-ainepitoisuudesta 6,5 m-%.

Ligniinin talteenoton vaikutukset sellutehtaan energiataseeseen laskettiin huomioimalla soodakattilassa poltettavan ligniinin määrän väheneminen sekä ligniinin talteenotto-prosessin kuluttama energia. Mustalipeän koostumuksen ja siten myös lämpöarvon muutoksia ligniinin talteenotto-prosessin seurauksena ei huomioitu. Lisäksi laskettiin NaOH:n lisäystarve, kun prosessista poistuu sellunkeitossa tarvittavia kemikaaleja.

Kuoren jalostuksen laskenta

Tässä työssä mallinnettiin Tech-skenaarioissa sellutehtaiden ja sahojen kuorelle yhteisiä jalostuslaitoksia tanniinin kuumavesiuuttoon (Niiranen 2025) perustuvalla prosessilla, energiaintegroituna sellutehtaisiin. Työssä ei huomioitu kuoren yhteisjalostuslaitosten logistisia näkökulmia.

Jalostettava kuoren määrä kattaa sahoilta ja puutuotetehtailta kaiken kuoren ja sellutehtailta kaiken kuoren, joka ei mene kuoren kaasutukseen. Mekaanisten ja puolikemiallisten sellutehtaiden kuori jätettiin laitosten omaan käyttöön.

Kuoren yhteisjalostuslaitoksissa saadaan tanniiniväliuotetta ja ne kuluttavat sellutehtaiden tuottamaa sähköä ja höyryä. Lisäksi laskettiin kemikaalien ja entsyymien tarve kuumavesiuutossa (Niiranen, 2025) mukaisesti.

Hiilidioksidin talteenoton, hyötykäytön ja varastoinnin laskenta

Hiilidioksidin talteenotto mallinnetaan pohjautuen kemialliseen absorptioon nestemäisellä PZ/AMP-amiiniliuoksella, joka edustaa IEAGHG:n (2019) mukaan state-of-the-art teknologiaa eli parhaana pidettyä nykYTEKNIikkaa. Talteenotossa oletetaan, että 90 % päästölähteen hiilidioksidista saadaan talteen. Jos lähteessä on useita päästövirtoja (esim. sellutehtaan soodakattila, kuorikattila ja meesauuni), oletetaan, että ne voidaan yhdistää yhdeksi virraksi talteenottoa varten. Päästölähteen ominaisuudet kuten CO₂-pitoisuus ja epäpuhtaudet vaikuttavat talteenoton suorituskykyyn ja kustannuksiin, mutta koska työssä tarkastellut päästölähteet ovat pitkälti samankaltaisia polttoon perustuvia prosesseja, oletetaan, että CO₂ talteenoton suorituskyky on eri laitosten välillä yhtäläinen.

Kullekin tarkastellulle laitostekategorialle arvioidaan ominaisinvestointikustannus kategorian keskimääräisen päästömäärän perusteella. Kustannukset skaalataan pohjautuen referenssilaitokseen, jonka talteenottokapasiteetti on 1000 tCO₂/d ja kokonaisinvestointi (pl. hiilidioksidin paineistus) on 111 M€ (AECOM 2022), olettaen skaalakertoimeksi 0,7. Täten lasketut ominaisinvestointikustannukset ovat: suuret biotuotetehtaat 179 €/tCO₂, keskikokoiset sellutehtaat 247 €/tCO₂, ja muut päästölähteet 387 €/tCO₂.

Hiilidioksidin talteenotto kuluttaa energiaa lämpönä liuoksen regeneroinnissa sekä sähköä virtaus- ja apulaitteissa. Laskennallisesti työssä oletetaan, että regeneroinnin lämmönlähteenä käytetään höyryä sellutehtailta ja kaukolämpöä CHP-laitoksissa. Käytännössä myös CHP-laitoksissa regenerointi tehdään höyryllä, mutta regeneroinnin jälkeen lauhtunutta höyryä saadaan kaukolämpöön sopivassa lämpötilassa, jolloin kokonaisuudessa CO₂ talteenotto madaltaa laitoksen kaukolämmöntuotantoa. Laskennassa hiilidioksidin talteenotolle oletetaan lämmön tarpeeksi 2.97 GJ/tCO₂ (Moser ym. 2021) ja sähkön tarpeeksi 75 kWh/tCO₂ (IEAGHG 2019). CCU-polyoliprosessi voi kattaa osan lämmöntarpeesta CCU-skenaarioissa. Talteenotto-prosessissa syntyy hukkalämpöä mm. savukaasun, liuoksen ja talteenotetun hiilidioksidin viilennyksessä. Työssä oletetaan, että hukkalämpö hyödynnetään

kaukolämpöä tuottavissa energiantuotantolaitoksissa, mutta ei teollisuuslaitoksissa. Talteen saatavan lämmön määräksi oletetaan 0.58 GJ/tCO₂ (Kumar ym. 2023).

Muita käyttökustannuksia ovat absorbenttien tarve 0.45 kg/tCO₂ (Moser ym. 2021) hintaan 8.1 €/kg (Garcia ym. 2021), sekä muut muuttuvat käyttökustannukset (mm. kemikaalit, kulutustavarat ja jätteet), jotka skaalataan lineaarisesti pohjautuen kustannuksiin 1.1 M€2025 laitoksessa, jonka talteenottokapasiteetti on 1000 tCO₂/d (AECOM 2022). Vuotuiset työvoima- ja huoltokustannukset oletetaan olevan 2.2 % laitoksen kokonaisinvestoinnista (Kearns ym. 2021).

CCU skenaariossa hiilidioksidi hyödynnetään suoraan päästölähteiden yhteydessä, joten kuljetusta ei tarvita. Laitoksilla oletetaan olevan yhden vuorokauden raaka-ainetarvetta vastaava CO₂ välivarasto. Hiilidioksidi paineistetaan 20 bariin hyötykäyttöä ja välivarastointia varten. Paineistuksen investointikustannus skaalataan 60 ktCO₂/a kokoluokan referenssilaitokseen, jossa investointi on 2.31 M€. Paineistuksen sähkötarve on 75 kWh/tCO₂ (pohjautuen Elliott n.d.). Vuotuisten työvoima- ja huoltokustannusten oletetaan olevan 2.2 % kokonaisinvestoinnista.

CCS skenaariossa hiilidioksidi paineistetaan ylikriittiseksi ja kuljetetaan putkella joko mineralisoitavaksi tai satamaan, jossa se nesteytetään ja laivataan Pohjanmerelle geologiseen varastoon. Putkikuljetuksen oletettu kapasiteetti 0.491 Mt/a pohjautuu tarkasteltujen laitosten keskimääräisiin CO₂ päästöihin ja oletettuun 90 %:n talteenoton hyötysuhteeseen. Putkikuljetuksen etäisyydeksi sisämaasta rannikolle oletetaan 32 km, perustuen Kujanpää ym. (2024) työn päästölähteiden painotettuun keskimääräiseen etäisyyteen rannikolle. Laivakuljetus oletetaan tapahtuvan keskitetysti rannikolla sijaitsevista hubeista, joihin kerätään lähialueilta talteenotettu CO₂. Hubien keskimääräinen koko (2.7 Mt/a) on arvioitu pohjautuen työhön Kujanpää ym. 2024. Laivakuljetuksen etäisyydeksi Suomesta Pohjanmeren varastopaikalle oletetaan 2000 km.

Talteenotetun hiilidioksidin käsittelyssä ja logistiikassa voi esiintyä pieniä CO₂ häviöitä. CCU skenaariossa välivarastoinnissa oletetaan tapahtuvan 0.2 % häviö kapasiteetista per päivä (IEAGHG 2004). CCS skenaariossa häviöt koostuvat putkikuljetuksen uudelleenpaineistusosien, venttiilien ja mahdollisten vuotojen aiheutumista häviöstä, jonka oletetaan olevan 1.5 % kuljetuskapasiteetista (pohjautuen maakaasuputkien häviöihin lähteestä IPCC 2018), sekä laivakuljetuksessa nesteytetyn CO₂:n höyrystymisestä johtuvasta häviöstä, jonka oletetaan olevan 0.2 % kuljetuskapasiteetista per päivä (IEAGHG 2004).

CCU-prosessit + elektrolyysit

Mallissa tuotetaan CCU-prosesseja varten huomattavia määriä vetyä veden elektrolyysillä. Mallissa käytetään alkali-elektrolyysiprosessia (AEL), pohjautuen Weiss ym. (2024) työhön. AEL prosessin syötteenä ovat vesi ja sähkö ja tuotteina vesi ja lämpö. Hukkalämmön lämpötilataso vaatii yleensä korottamista esimerkiksi lämpöpumpuilla ennen hyödyntämistä kaukolämmön tai prosessilämmön tuotannossa.

E-kerosiiniprosessissa hukkalämpö voisi toimia lämmönlähteenä esimerkiksi lämpöpumpuille, mutta tässä mallissa vain polykarbonaattipolyoliprosessin lämpö katsotaan suoraan vähennykseksi hiilidioksidin talteenotto-prosessien lämmöntarpeesta, sillä lämpötilataso on aiemman selvityksen mukaan sellaisenaan riittävä tähän tarkoitukseen. (Nevander ym., 2022.) Tässä työssä elektrolyysin hukkalämmön on oletettu tarjoavan vain lämmönlähteen lämpöpumpuille, eikä suoraa lämmöntarvehennyksiä kaukolämmössä tai teollisuudessa.

Uuden sähköntuotannon laskenta

Skenaarioissa uutta sähköntuotantoa tarvittiin sekä kattamaan uutta sähkönkulutusta, että korvamaan polttoainevähennyksestä aiheutunutta alemmalla sähköntuotantoa. Uusi sähköntuotannon tarve laskettiin vertaamalla sähköntuotantoa kussakin skenaariossa mallinnettuun perustilaan vuonna 2024 ja lisäämällä tähän uusien prosessien sähkönkulutus yhteensä. Koska sellutehtaiden osalta osa mallinnetut muutokset, kuten ligniinin erotus, vaikuttivat sekä polttoainevähennykseen, että lisättyyn sähkönkulutukseen, jouduttiin osa vaikutuksista yhdistämään yhdeksi kokonaisuudeksi. Vastaava tilanne syntyi myös hiilidioksidin talteenotossa sellutehtailla, jossa hiilidioksidin talteenoton vaikutti sellutehtaiden höyrynkulutukseen ja siten höyryllä tuotettavan sähkön määrään.

Eriteltyt uuden sähköntuotannon tarpeen kategoriat olivat:

- Polttoainevähennyksen, ligniinin ja kuoren jalostuksen sekä hiilidioksidin talteenoton vaikutukset
- Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen sähkönkulutus
- Hiilidioksidin logistiikka ja geologinen varastointi
- Hiilidioksidin mineralisointi
- Elektrolyysi
- CCU-tuotteiden valmistus

Näistä vaikutuksista yhteenlaskettu uuden sähköntuotannon tarve laskettiin mallissa lähtökohtaisesti maatuulivoimana. Maatuulivoiman investointikustannuksena käytettiin 1,2 M€/MW (Suomen uusiutuvat, 2025a mukaan: 1,2–1,5 M€/MW) ja käyttöikä 30 vuotta (Energistyrelsen, 2025).

Kapasiteettikertoimena käytettiin arvoa 33 % (Suomen uusiutuvat, 2025b), joka perustuu VTT:n tuotantotilastoihin vuosina 2011–2017 rakennetuista tuulivoimaloista. Keskimääräinen tuulivoimaloiden kapasiteettikerroin Suomessa on 28,9 % (Karlsson ym., 2025).

Äärimmäisissä skenaarioissa jos sähkönkulutus olisi suurempi kuin koko Suomen maatuulivoimapotentaali tai jopa yli yhdistetyn maa- ja merituulivoimapotentiaalini, voisi olla perusteltua käyttää sekoitusta maa- ja merituulivoimaa.

Pienpoltto

Puun pienpolttoon ei ole mallinnuksessa oletettu muutoksia, pois lukien hakkuumäärän muutoksen tasainen vaikutus kaikkiin käyttökohteisiin. Puun pienpoltto käsittää maatiloilla, kodeissa, saunoissa sekä vapaa-ajan- ja lomarakennuksissa tapahtuvan puun polton. Puun pienpoltton määrää ei mitata vaan se arvioidaan kyselyjen perusteella.

LIITE 3. LISÄTIETOJA MALLIN RAJOITTEISTA

Tässä liitteessä annetaan kappaletta 2.1.9 täydentäviä tietoja mallinnuksen rajoitteista. Monet mallin keskeiset rajoitukset liittyvät tilastopohjaisuuteen ja siitä johtuviin epätarkkuuksiin. Jos esimerkiksi jonkin laitostyyppin kohdalla vuonna 2024 on varastoitu puuta vuoden yli, näyttää mallin mukaan siltä, kuin laitostyyppin saanto olisi heikompi kuin todellisuudessa. Jos varastoitu puu käytettäisiin seuraavan vuonna, voisi saanto näyttää laskennallisesti suuremmalta. Poltettavien materiaalien kosteuden, tiheyden ja lämpöarvon vaihtelu aiheuttavat epävarmuutta päästölaskennassa. Päästötietokannan ja tilastojen vuosien erot voivat myös aiheuttaa epä johdonmukaisuuksia. Päästötietokannasta tunnistettiin puuttuvia ja muuttuneita tietoja, joita on täydennetty manuaalisesti. Tästä huolimatta on mahdollista, että joitakin tietoja puuttuu edelleen. Lisäksi päästötietokannasta puuttuvat kaikki alle $0.05 \text{ Mt bioCO}_2/\text{v}$ päästävien laitosten päästötiedot.

Laitoskohtaiset energiaintegrointimahdollisuudet voisivat pienentää merkittävästi energiakustannuksia joidenkin laitosten osalta. Mallinnuksessa käytetään esimerkiksi myös vain yhtä hintaa sähkölle, mikä on sama myyjälle ja ostajalle. Tarkempia tarkasteluja varten tulisi huomioida erikseen eri sähkön tuottajien saamat hinnat laitosten ajotavoista riippuen, sähkön siirto sekä verotus. Uuden rakennettavan sähköntuotannon on myös oletettu olevan yksinomaan maatuulivoimaa, vaikka maksimiskenaarioissa voidaan ylittää jopa yhdistetty maa- ja merituulivoiman potentiaali Suomessa. Samoin uusista tuotteista saadut hinnat ja katteet voivat todellisuudessa vaihdella laitoksittain. Laitostyypeittäin tehdyt teknologiset ja taloudelliset oletukset perustuvat kirjallisuuteen ja asiantuntija-arvioihin, mutta sisältävät myös merkittäviä epävarmuuksia mm. teknologioiden ja hintojen tulevasta kehityksestä. Skenaarioihin sisältyy myös huomattavia oletuksia markkinoiden volyymeisterä, kuten CCU-tuotteiden määrien suhteet 80 % e-polttoaineisiin ja 20 % polykarbonaattipolyoleiksi, sekä CCS-osuudet 95 % geologiseen varastoon ja 5 % CO₂:n mineralisointiin. Nykyistä saostetun kalsiumkarbonaatin tuotantoa sellu- ja paperiteollisuudessa ei myöskään otettu erikseen huomioon, vaan sen oletetaan jatkuvan samanlaisena.

Myös esimerkiksi voimalaitoksilta vähenevä polttoaineen määrä näyttäisi nykyisten käyttötuntien mukaan vähenevän yksinomaan CHP-laitoksilta, mutta ei lämpölaitoksilta. (ks. Energiavuosi, tilastot, kalvo 18/43 (<https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/>) Lisäksi esimerkiksi ligniinin talteenotto voisi painottua enemmän joko havupuusellun tai lehtipuusellun valmistukseen, millä olisi vaikutuksia mustalipeän lämpöarvoon ja sitä kautta sellutehtaiden sähköntuotantoon. Ligniinin erotus myös vähentää soodakattilaan päätyvää hiilivirtaa ja mahdollistaa sellutehtaan tuotantokapasiteetin kasvattamisen, mikäli soodakattila rajoittaa kapasiteettia.

Työn rajaamisen vuoksi mekaanisen ja puolikemiallisen massanvalmistuksen osalta ei tarkasteltu muita muutoksia, kuin hakkuumäärän muutoksia ja hiilidioksidin talteenottoa. Näiltä laitoksilta olisi myös mahdollista jalostaa kuorta, mutta tämä vaikuttaisi myös sähkön ja lämmön tarpeeseen näillä laitoksilla ja olisi vaatinut erillisen energiataseen tarkastelun. Myös pelkät hakkuutason muutokset voivat vaikuttaa näiden laitosten yhteydessä kuorta polttavien teollisuus-CHP-laitosten toimintaan tai laitosten sähkönkulutukseen tavoilla, joita nykyinen malli ei huomioi.

Työssä ei ole huomioitu kaukolämmön kysynnän muutosten aiheuttamaa kausivaihtelua CHP- ja lämpölaitosten kuormituksessa ja päästövirroissa. Tämä tarkoittaa, että mikäli kausivaihtelulle alttiista laitoksista on tavoitteena oletettu 90 %:n talteenoton hyötysuhde, hiilidioksidin talteenottoyksikkö tulisi mitoittaa suurimman mahdollisen päästövirran mukaan, ja sitä operoitaisiin osakuormalla matalamman kuorman ajankohtina.

Yksi merkittävät energijärjestelmää koskeva epävarmuus on elektrolyysereiden hukkalämpöjen todelliset hyödyntämismahdollisuudet. Tässä työssä elektrolyysereiden hukkalämmöt on

konservatiivisesti oletettu vain lämpöpumppujen lämmönlähteiksi ilman lisätuloa, sillä lämpötilatasoa olisi nostettava nykyisiä kaukolämpöjärjestelmiä varten. Mallinnetuissa maksimiskenaarioissa elektrolyysereiden hukkalämmön määrä on kuitenkin erittäin merkittävä ja mikäli se todellisuudessa sijoittuisi kaukolämpöverkkojen läheisyyteen ja olisi oikea-aikaista lämmön kysynnän suhteen, voitaisiin sillä kattaa suuri osa kaukolämmön tarpeesta. Myös CCU-tuotteiden valmistuksen hukkalämpöjen realistinen hyödyntäminen on merkittävä mahdollisuus sekä epävarmuustekijä.

LIITE 4. NYKYTEOLLISUUDEN ARVONLISÄN ARVIOINTI

Raportissa tehdyn arvonlisälaskennan vertailukohtana haluttiin käyttää nykyisen metsäteollisuuden sekä bioenergiantuotannon arvonlisää. Vertailuna arvioitiin metsäteollisuuden ja bioenergiantuotannon arvonlisäystä vuosittain toimialakohtaisen kansantalouden vuositilipidon perusteella. Nykyisen teollisuuden osalta arvonlisäykset ja vuotuinen investointien taso on esitetty taulukossa L4. Kiinteitä puupolttoaineita käyttävän bioenergian osuus koko toimialasta 35 on arvioitu ENVIMATscen-mallinnuksen avulla.

Taulukko L4: Arvonlisäys ja investoinnit nykyteollisuudessa.

Lähtötieto	Lukuarvo	Yksikkö	Lisätieto	Lähde
Nykyteollisuuden investointivuosien lukumäärä vertailussa uusiin teknologioihin	15	a	Nykyteollisuuden tuotantokapasiteetin ylläpitämiseksi vaaditut investoinnit vertailuaikajaksolla 2026–2040.	Oletus
Toimiala 02: Metsätalous ja puunkorjuu				
Toimialan 02 vuotuiset investoinnit	480	M€/a	"Kiinteän pääoman bruttomuodostus, menona, viitevuosi 2024", keskiarvo vuosilta 2021–2023	124I – Investoinnit ja kiinteä pääoma, vuosittain, 1975-2024* (Tilastokeskus, 2026)
Toimialan 02 bruttoarvonlisäys	3905	M€/a	"Bruttoarvonlisäys perushintaan, käyvin hinnoin", keskiarvo vuosilta 2021–2023	123h – Tulot ja tuotanto sektoreittain ja toimialoittain, vuosittain, 1975-2024*. (Tilastokeskus, 2026)
Toimiala 35: Sähkö-, kaasu- ja lämpöhuolto, jäähdytysliiketoiminta; kiinteillä puupolttoaineilla tuotetun bioenergian osuus				
Toimialan 35 vuotuiset investoinnit	3680	M€/a	"Kiinteän pääoman bruttomuodostus, menona, viitevuosi 2024", keskiarvo vuosilta 2021–2023	124I – Investoinnit ja kiinteä pääoma, vuosittain, 1975-2024* (Tilastokeskus, 2026)
Kiinteillä puupolttoaineilla tuotetun bioenergian osuus toimialan 35 investoinneista	9,0 %	%		Arvio perustuen tämän hankkeen EnvimatScen-mallinnukseen.
Toimialan 35 bruttoarvonlisäys	6179	M€/a	"Bruttoarvonlisäys perushintaan, käyvin hinnoin", keskiarvo vuosilta 2021–2023	123h – Tulot ja tuotanto sektoreittain ja toimialoittain, vuosittain, 1975-2024*. (Tilastokeskus, 2026)
Kiinteillä puupolttoaineilla tuotetun bioenergian osuus toimialan 35 bruttoarvonlisäyksestä	17,0 %	%		Arvio perustuen tämän hankkeen EnvimatScen-mallinnukseen.
Toimialat 16–17: Metsäteollisuus				

Toimialan 16–17 vuotuiset investoinnit	1911	M€/a	"Kiinteän pääoman bruttomuodostus, menona, viitevuosi 2024", keskiarvo vuosilta 2021–2023	124i – Investoinnit ja kiinteä pääoma, vuosittain, 1975-2024* (Tilastokeskus, 2026)
Toimialan 16–17 bruttoarvonlisäys	5166	M€/a	"Bruttoarvonlisäys perushintaan, käyvin hinnoin", keskiarvo vuosilta 2021–2023	123h – Tulot ja tuotanto sektoreittain ja toimialoittain, vuosittain, 1975-2024*. (Tilastokeskus, 2026)

Vertailtaessa investointeja nykyisen teollisuuden tuotantokapasiteetin ylläpitämiseen ja uuteen teollisuuteen vuoteen 2040 mennessä, on nykyisen teollisuuden toimialakohtaisia vuotuisia investointeja kerrottu 15 vuodella (2026–2040) kumulatiivisten investointien määrittämiseksi.

Nykyteollisuuden arvonlisäyksen laskun alemmalla 64 milj. m3 hakkuutasolla on arvioitu tapahtuvan vastaavassa suhteessa, kuin hakkuut alenevat. Tämä vastaa noin 13,5 % laskua arvonlisäyksessä. ENVIMATscen-mallinnuksessa arvonlisäyksen lasku vastaavilla sektoreilla oli noin 10–12 %, joten arviot vastaavat suuruusluokaltaan toisiaan.

LIITE 5. ENVIMATSCEN-MALLINNUKSEN SEKTORIKOHTAISET TULOKSET

Metsäteollisuus	Tuotos, Meur		Kasvu	Arvonlisäys, Meur		Kasvu
	2015	2035	%/v	2015	2035	%/v
2035 "v2024 74 Mm3"	19 710	18 204	-0,4	4 785	5 304	0,5
2035 "2024 64 Mm3"	19 710	16 142	-1,0	4 785	4 756	0,0
2035 "CCU 74 Mm3"	19 710	19 326	-0,1	4 785	5 689	0,9
2035 "CCU 64 Mm3"	19 710	17 173	-0,7	4 785	5 127	0,3
2035 "CCS 74 Mm3"	19 710	21 236	0,4	4 785	5 988	1,1
2035 "CCS 64 Mm3"	19 710	18 870	-0,2	4 785	5 415	0,6
2035 "Tech CCU 74 Mm3"	19 710	20 672	0,2	4 785	6 194	1,3
2035 "Tech CCU 64 Mm3"	19 710	17 953	-0,5	4 785	5 433	0,6
2035 "Tech CCS 74 Mm3"	19 710	22 315	0,6	4 785	6 421	1,5
2035 "Tech CCS 64 Mm3"	19 710	19 439	-0,1	4 785	5 674	0,9
Metsätalous	Tuotos, Meur		Kasvu	Arvonlisäys, Meur		Kasvu
	2015	2035	%/v	2015	2035	%/v
2035 "v2024 74 Mm3"	4 616	5 143	0,5	3 318	3 778	0,7
2035 "2024 64 Mm3"	4 616	4 561	-0,1	3 318	3 376	0,1
2035 "CCU 74 Mm3"	4 616	5 056	0,5	3 318	3 756	0,6
2035 "CCU 64 Mm3"	4 616	4 485	-0,1	3 318	3 357	0,1
2035 "CCS 74 Mm3"	4 616	5 147	0,5	3 318	3 793	0,7
2035 "CCS 64 Mm3"	4 616	4 566	-0,1	3 318	3 390	0,1
2035 "Tech CCU 74 Mm3"	4 616	5 013	0,4	3 318	3 756	0,6
2035 "Tech CCU 64 Mm3"	4 616	4 506	-0,1	3 318	3 379	0,1
2035 "Tech CCS 74 Mm3"	4 616	5 088	0,5	3 318	3 791	0,7
2035 "Tech CCS 64 Mm3"	4 616	4 575	0,0	3 318	3 410	0,1

LIITE 6. MALLIN VALIDOINTI

Hiilidioksidin päästömäärien osalta voidaan tehdä suuntaa antavaa vertailua vuoden 2022 tilastoitujen päästömäärien sekä mallissa polttoainemäärien ja päästökertoimien mukaan laskettujen hiilidioksidimäärien välillä. Päästötietokannan mukaan bioperäisen hiilidioksidin päästöt olivat Suomessa n. 29,8 Mt laitoksissa, joissa vuotuinen päästömäärä oli >0,05 Mt/v. Mallin mukaan laskettu bioperäisen hiilidioksidin päästömäärä olisi vuoden 2024 polttoainekulutuksilla ja hakkuutasolla n. 30,5 Mt, kun huomioon ei oteta pienpolttoa. Vuosien 2022 ja 2024 välillä on poltetun biomassan osalta vaihtelua, joten ainakin suuruusluokka täsmää tarkasteluun sopivalla tasolla.

Lämmöntuotanto mallin perustilassa vuonna 2024 lämpö- ja voimalaitoksilla oli yhteensä 26,1 TWh. Lähtötiedoissakin käytetyn vuoden kaukolämpötilaston vuoden 2024 ennakkotietojen perusteella biomassalla, lämmön talteenotolla, sähkökattiloilla ja jätteenpoltolla (arvioiden biomassan osuudeksi 50 %) tuotettu lämmön kokonaistuotanto oli 25,9 TWh. (Energiateollisuus 2025)

Mallinnettu CHP-laitosten sähköntuotanto 3,6 TWh laskettuna vuoden 2023 kaukolämpötilaston (Energiateollisuus 2024) järjestelmätason hyötysuhteella ja vuoden 2024 puunkäyttömäärillä on lähellä vuoden 2023 CHP-tuotannon biomassankäytön polttoaineosuutta (56,3 %) CHP-sähköntuotannosta (5,9 TWh) eli n. 3,3 TWh (Energiateollisuus 2024). Metsäteollisuuden sähköntuotannon vertailu ei mallissa ole suoraviivaista tilastotietojen kanssa, sillä sahojen ja puutuotetehtaiden, mekaanisten ja puolikemiallisten massatehtaiden sekä paperi- ja kartonkitehtaiden sähköjen omaa sähkönkulutusta ei mallissa ole erikseen tarkasteltu. Mallissa sahojen yhteydessä tuotetaan CHP-laitoksilla kuoresta sähköä 0,7 TWh omaan käyttöön, ja sellutehtailla tuotetaan 11,6 TWh sähköä, josta myyntiin jää 7,5 TWh.