

Päästäjästä tuottajaksi – Hiilidioksiditaloudella arvonlisää Suomen metsäsektorille



Sisällys

Tiivistelmä	3
Executive summary	5
Esipuhe	7
1. Kohti vihreää siirtymää ja hiilidioksiditaloutta	8
1.1. Toimintaympäristö muutoksessa	8
1.2. Metsäbiotalous kestävään kasvuun	10
2. Metsäbiotalouden arvonlisäyksestä	12
3. Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi	16
3.1. Teknologiat ja hankkeiden nykytila	17
3.2. Keskeiset politiikat	19
4. Laskentamenetelmät ja skenaariot	22
4.1. Laskennan oletuksista	22
4.2. Bioperäisen hiilidioksidin käyttö eri skenaarioissa	24
5. Tulokset: tulevaisuuden tuotantoa ja tuotteita	26
5.1. Skenaarioiden tulokset	26
5.2. Herkkyystarkastelut	28
6. Keskustelua	31
7. Yhteenveto	34
Liite 1: Laskennan toteutus	37
Liite 2: Skenaarioiden tulokset lukuina	38
Liite 3: Lähteet	40

Kirjoittajat:

Arasto Antti, Kohl Johanna,
Kujanpää Lauri, Lehto Jani,
Lehtonen Juha, Lintunen Jussi
ja Mäkikouri Sampo

ISBN 978-951-38-8835-0

DOI: 10.32040/2024.978-951-38-8835-0

Tiivistelmä

Tässä työssä pyrimme vastaamaan kysymykseen, millaisia taloudellisia vaikutuksia metsäteollisuuden vuosittain tuottaman 20 miljoonan tonnin bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämisellä ja varastoinnilla voisi olla Suomelle. Tarkastelemme tätä arvioimalla näiden toimien vaikutuksia kansantalouden arvonlisään vuoteen 2040 mennessä neljän eri skenaarion avulla, joissa hiilidioksidia joko hyödynnetään tuottaen energiankantajia ja pitkäikäisiä hiilivetytuotteita tai varastoidaan pysyvästi poistaen näin hiilidioksidia ilmakehästä.

Raportin pääjohtopäätökset ovat:

- 1. Hiilidioksiditalous lisäisi metsäteollisuuden resurssitehokkuutta.**
Metsäsektorin tuottama arvonlisä kansantalouteen jalostettua puukuutiometriä kohden on pienentynyt huomattavasti paperin kultakauden jälkeen. Tällä hetkellä suuri osa puun hiilestä päättyy prosesseista savuna taivaalle
- 2. Hiilidioksidin hyötykäyttö voi luoda merkittävää arvonlisää.**
Tarkastelumme mukaan uusiutuvan vedyn kanssa jalostettuna bioperäisten hiilidioksidituotteiden arvonlisä voisi kasvaa 2,6 miljardiin euroon (tuotannon voittomarginaali 0 prosenttia) vuoteen 2040 mennessä, olettaen että näillä jalostustuotteilla on markkinakäyntä. Herkkyyystarkastelujen valossa arvonlisä saattaisi nousta peräti 8,6 miljardiin euroon, mikäli voittomarginaali nousisi esimerkiksi 50 prosenttiin.
- 3. Bioperäinen hiilidioksidi on vetytalouteen liittyvä kansallinen vahvuutemme.**
Bioperäisestä hiilidioksidista voidaan valmistaa uusiutuvan vedyn avulla esimerkiksi niin kutsuttuja sähköpolttoaineita lentoliikenteeseen. Näistä erityisesti e-lentopolttoaineiden markkinan odotetaan aukeavan tulevina vuosikymmeninä EU:ssa johtuen regulaatioiden ohjausvaikutuksesta. Suuren bioperäisen hiilidioksidin tuotannon ansiosta Suomesta voisi tulla merkittävä e-kerosiinin viejä.
- 4. Varastointi on vähiten investointeja vaativa vaihtoehto bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämiseen.**
Bioperäisen hiilidioksidin varastointi vaatii vähiten investointeja ja sähköä hiilidioksiditonniä kohden. Syntyvän teknologisen nielun lisäksi arvonlisäpotentiaali on merkittävä, mutta se riippuu

suuresti bioperäisen hiilidioksidin varastoinnista maksettavasta korvauksesta. Arvioituihin kustannuksiin pohjautuen arvonlisä voisi nousta jopa 1,5 miljardiin euroon vuoteen 2040 mennessä. Arvonlisä voisi olla jopa 3,6 miljardia euroa, mikäli bioperäisen hiilidioksidin varastoinnista saatava korvaus olisi 250 euroa hiilidioksiditonnilta.

5. Hiilidioksiditalous ei toteudu ilman kunnianhimoista ilmastopolitiikkaa.

Kuinka korkealle varastoitavan hiilen hinta nousee eli kuinka kannattavaksi vaihtoehdoksi bioperäisen hiilidioksidin talteenotto ja varastointi muodostuu, riippuu vahvasti lähivuosina kehittyvästä sääntelystä. Hiilidioksidin talteenotto-, varastointi- ja hyödyntämisteknologiat ovat vielä tällä hetkellä erittäin kalliita, osin kehitysvaiheessa ja energiaintensiivisiä. Tulevien vuosien haasteena on saada näistä teknologisesti kypsiä ja taloudellisesti kannattavia. Skenariossamme tuotantolaitosten vaatimien investointien rahallinen arvo nousi jopa 36 miljardiin euroon vuoteen 2040 mennessä.

6. Toivoa on, onko tarmoa?

Viemmekö Suomessa hiilidioksiditaloutta aktiivisesti edelläkävijänä eteenpäin vai seuraammeko sen kehittymistä passiivisesti taustalla odottaen? Mielestämme olisi sääli, jos Suomesta kehittyisi ainoastaan vetytalouden raaka-ainelähde: tuottaisimme puhdasta sähköä ja vihreää vetyäkin, mutta sen jatkojalostus tuotteiksi sekä näiden arvoketjujen tarvitsemien ratkaisujen kehittäminen tapahtuisi muualla. Jos sen sijaan Suomessa onnistuttaisiin kehittämään teknologioita ja palveluita globaalin murroksen tarpeeseen, niiden kansantaloudellinen arvonlisä ja globaali hiilikädenjälki, joita tämän työn puitteissa ei tarkasteltu, olisi todennäköisesti myös erittäin merkittävä.



Executive summary

In this work, we aim to answer the question of what economic effects the utilization and storage of the 20 million tons of biobased carbon dioxide produced by the forest industry each year could have on Finland. We examine this by evaluating the effects of these actions on the value added of the national economy by 2040 using four different scenarios, in which carbon dioxide are either utilized to produce energy carriers and long-lived hydrocarbon products or stored permanently, thus removing carbon dioxide from the atmosphere.

The main conclusions of the report are:

- 1. The carbon dioxide economy would increase the resource efficiency of the forest industry.**
The added value produced by the forest sector for the national economy per cubic meter of wood processed has decreased considerably since the golden age of paper. One way to
- 2. The utilization of carbon dioxide can create significant added value.**
According to our analysis, the added value of biobased carbon dioxide products, further refined with renewable hydrogen, could increase to 2.6 billion euros (profit margin 0 percent) by 2040, assuming that there is a market demand for these refined products. In the light of the sensitivity analyses, the value added could rise to as much as 8.6 billion euros, if the profit margin were to rise to, for example, 50 percent.
- 3. Biobased carbon dioxide is our national strength related to the hydrogen economy.**
Biobased carbon dioxide can be used to produce, for example, so-called electric fuels for aviation with the help of renewable hydrogen. Of these, the e-aviation fuel market in particular is expected to open up in the coming decades in the EU due to the steering effect of the regulations. Due to the large production of biobased carbon dioxide, Finland could become a significant exporter of e-kerosene.
- 4. Storage is the least investment-demanding option for utilizing biobased carbon dioxide.**
Storing biobased carbon dioxide requires the least amount of investment and electricity per ton of carbon dioxide. In addition to the emerging technological sink, the added value potential is

significant, but it depends greatly on the compensation paid for the storage of biobased carbon dioxide. Based on the estimated costs, the added value could reach up to 1.5 billion euros by 2040. The added value could be up to 3.6 billion euros, if the compensation received from the storage of biobased carbon dioxide was 250 euros per ton of carbon dioxide.

5. Carbon dioxide economy won't be realized without ambitious climate policy.

How high the price of stored coal rises, i.e. how profitable the recovery and storage of biobased carbon dioxide becomes, depends strongly on the regulation that develops in the next few years. Carbon dioxide capture, storage and utilization technologies are currently still very expensive, partly in the development phase and energy intensive. The challenge for the coming years is to make these technologically mature and economically profitable. In our scenario, the monetary value of the investments required by the production facilities rose up to 36 billion euros by 2040.

6. There is hope, but is there enough enthusiasm?

Are we actively leading the carbon dioxide economy in Finland, or are we following its development passively, waiting in the background? We think it would be a shame if Finland developed only as a raw material source for the hydrogen economy: we would produce clean electricity and green hydrogen as well, but its further processing into products and the development of the solutions needed by these value chains would take place elsewhere. If, instead, Finland succeeded in developing technologies and services to meet the needs of the global revolution, their national economic value added and global carbon footprint, which were not examined within the scope of this work, would probably also be very significant.



Esipuhe

Tämä työ on jatkoa Luonnonvarakeskuksen (Luke) vuonna 2023 julkaisemalle tarkastelulle ”Suomi elää metsästä myös 2035 - Keskustelunavaus metsäsektorin arvonlisän kaksinkertaistamiseen” sekä Metsäbiotalouden tiedepaneelin vuonna 2024 julkaisemalle ”Lankusta lääkkeisiin - Tuoteportfolion arvonnoususta uutta arvonlisää metsäsektorille” -raportille. Raporteissa todettiin, että Suomen biotalousstrategian kunnianhimoinen tavoite arvonlisän kaksinkertaistamisesta on haasteellinen, muttei mahdoton tehtävä metsäsektorin osalta. Luken mukaan metsäsektorin arvonlisän kaksinkertaistaminen vaatisi muun muassa nykyisen tuotevalikoiman radikaalia uudistamista, miljardien investointeja, aivan uusia teollisia ekosysteemejä sekä julkisen ja yksityisen sektorin parempaa yhteispeliä. Myös Metsäbiotalouden tiedepaneeli päättyi samankaltaisiin johtopäätöksiin.

Aiemmissa raporteissa ei ole käsitelty hiilidioksiditalouteen liittyviä mahdollisuuksia. Hiilidioksiditalous-termillä tarkoitamme bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämiseen

joko tuotteiden raaka-aineena tai pysyvästi ilmakehästä poistamiseen liittyviin taloudellisiin mahdollisuuksiin.

Tässä työssä keskitymme pohtimaan metsäsektorin hiilidioksiditaloutta. Pyrimme vastaamaan kysymykseen, millaisia taloudellisia vaikutuksia metsäteollisuuden vuosittain tuottaman 20 miljoonan tonnin bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämisellä ja varastoinnilla voisi olla Suomelle. Tarkastelemme tätä arvioimalla näiden toimien kansantalouden arvonlisään vuoteen 2040 mennessä. Tarkastelemme hyödyntämistä ja varastointia myös 2035 aikajänteellä selvittääksemme niiden tarjoamia mahdollisuuksia edistää Suomen biotalousstrategian mukaista tavoitetta arvonlisän kaksinkertaistamisesta sekä mahdollisuutta tuoda lisätoimenpiteitä Suomen 2035 asettaman hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamiseksi.

Hiilidioksidin talteenotto sekä sen hyödyntäminen ja varastointi tulevat olemaan avainteknologioita ilmastonmuutoksen vastaisessa

taistelussa. Ilmastonmuutoksen negatiivisten taloudellisten vaikutusten minimoimiseksi tarvitsemme hiilidioksidin poistoa ilmakehästä lyhyellä, mutta ennen kaikkea pitkällä aikavälillä. Lisäksi esimerkiksi hiilidioksidista ja uusiutuvasta vedystä tuotetuilla polttoaineilla on roolinsa EU:ssa liikenteen ja teollisuuden päästövähennystavoitteissa, erityisesti meri- ja lentoliikenteessä. Nämä teknologiat ovat vielä tällä hetkellä kalliita, osin kehitysvaiheessa ja energiaintensiivisiä. Tulevien vuosien haasteena on saada näistä teknologisesti kypsiä ja taloudellisesti houkuttelevia investointikohteita.

Meille suomalaisille bioperäiseen hiilidioksidin liittyviä kiinnostavia mahdollisuuksia pysyvän varastoinnin lisäksi ovat myös mahdollisuudet jatkojalostaa se yhdessä uusiutuvan vedyn kanssa uusiksi tuotteiksi ja kemikaaleiksi. Kutsumme päättäjiä, teollisuutta, rahoittajia ja tutkimusmaailmaa mukaan pohtimaan, miten tämä tehtäisiin.

Kirjoittajat

1. Kohti vihreää siirtymää ja hiilidioksiditaloutta

1.1. Toimintaympäristö muutoksessa

Olemme monien kriisien ja murrosten keskellä. Geopoliittiset jännitteet ja turvallisuusympäristön kiristyminen sekä luonnonvarojen ehtyminen voivat johtaa uudenvälisiin konflikteihin sekä huoltovarmuuden merkitystä korostavaan metsä- ja energiapolitiikkaan. Uusia kansallista ja EU:n kilpailukykyä edistäviä toimia kaivataan kipeästi. Vihreä siirtymä ja hiilidioksiditalous voivat olla luomassa edellytyksiä ja ratkaisuja sekä lyhyen aikavälin että pitkäkestoisiin toimintaympäristön muutoksiin.

Metsäsektorin rooli on keskeinen talouden, huoltovarmuuden ja vihreän siirtymän näkökulmasta. Yksi keino nostaa metsäsektorin arvonlisää lisäämättä hakkuumääriä olisi hyödyntää metsäteollisuuden tuottamat bioperäiset hiilidioksidivirrat joko raaka-aineena tai varastoituna.


Puhtaan energian rakentaminen on ilmasto-neutraalin Euroopan kannalta välttämätöntä¹.

Tämän, ja Euroopan energiaturvallisuustavoitteen edistämiseksi vuonna 2022 julkaistiin EU:n REPower-strategia, jonka mukaan EU:n olisi lisättävä uusiutuvan vedyn tuotantoa vuoteen 2030 mennessä nostamalla vedyn määrä 20 megatonniin vuodessa EU:n vetystrategiassa ehdotetusta kymmenestä megatonnista vuodessa. Lisäksi vedyllä on arvioitu olevan merkittävä rooli EU:n liikenteen päästötavoitteiden saavuttamisessa. Esim. lentoliikenteessä ReFuelEU Aviation-regulariaatio määrittelee, että 35 % lentoliikenteen polttoainetarpeesta tulisi kattaa vihreästä vedystä ja bioperäisistä lähteistä tai ilmasta kaapatusta hiilidioksidista valmistetuista ns. RFNBO-polttoaineilla (renewable fuels of non-biological origin) vuoteen 2050 mennessä².

Suomella ei ole omaa vetystrategiaa, vaan vety sisältyy ilmasto- ja energiastrategioihin. Valtioneuvosto on tehnyt periaatepäätöksen³, jonka mukaan Suomen tulee tavoitella Euroo-

passa johtavaa asemaa vetytaloudessa läpi koko arvoketjun. Suomella arvioidaan olevan edellytykset tuottaa vähintään kymmenen prosenttia EU:n päästöttömästä vedystä vuonna 2030. Päästöttömän vedyn viennin sijaan Suomesta voisi tulla merkittävä vedystä ja bioperäisestä hiilidioksidista valmistettujen tuotteiden viejä. Suomen kilpailuetuina mainitaan muun muassa toimintaympäristön ennakoitavuus, lupamenettelyjen sujuvuus ja maankäytön suunnittelu.

Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelmassa todetaan⁴, että Suomella on metsäteollisuuden ja bioenergian käytön takia luontainen puuperäisen hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen kilpailuetu ja että hallitus tavoittelee teknologisten nielujen käyttöä merkittävässä määrin jo 2020-luvun kuluessa. Perusteina tavoitteille todetaan, että hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen bioperäisestä poltosta yhdessä vedyntuotannon lisäämisen kanssa luo



alustan valmistaa polttoaineita, kemikaaleja ja materiaaleja kestävästä hiilenlähteestä ja vähentää riippuvuutta fossiilisista raaka-aineista. Hallitus haluaa edistää monipuolisesti innovaatioita vedyn hyödyntämiseen kaikilla sektoreilla.

Suuren mittakaavan vedyntuotanto edellyttää runsasta kilpailukykyisen puhtaan sähkön saatavuutta. Uutta aurinko- ja tuulivoimakapasiteettia on valmisteilla moninkertaisesti Suomen tämänhetkiseen kasvutarpeeseen verrattuna. Vuonna 2023 Suomeen suuntautuvien vihreän siirtymän investointiaikeiden summa⁵ kasvoi lähes kolmanneksella edellisvuoteen verrattuna. Pelkästään vedyn tuotantoon liittyviä hankkeita on vireillä 14 miljardin euron arvosta ja kokonaisuudessaan hankkeita on nyt vireillä 260 miljardin euron arvosta. Näistä lähimainkaan kaikki hankkeet eivät toki toteudu. Investointipäätökseen tai toteutukseen investointeja on edennyt 19 miljardin euron verran.

Suomen kansallisen vetyklusterin (H2 Cluster Finland) strategian mukaan⁶ Suomi voisi tuottaa vuonna 2035 kolme miljoonaa tonnia vetyä vuodessa, mistä syntyisi 33 miljardia euroa vuosittaista uutta liikevaihtoa sekä jopa 115 000 uutta työpaikkaa. Klusteri näkee liiketoimintamahdollisuuksia erityisesti muun

muassa vedyn primäärikäytössä (esimerkiksi puhtaan ammoniakkin ja lannoitteiden valmistus, puhdas teräs ja synteettiset polttoaineet) sekä teknologioissa ja palveluissa (esimerkiksi biotuotteet, laivanrakennus ja digitaaliset palvelut). Strategia tunnistaa yhdeksi Suomen kilpailueduksi bioperäisen hiilidioksidin.

Suomen ilmastopaneelin raportin mukaan⁷ Suomen teollisuus tuottaa vuosittain noin 28 miljoonaa tonnia⁸ (Mt) bioperäistä hiilidioksidia suurista teollisuuden laitoksista. Merkittävimpiä lähteitä ovat metsäteollisuus (19,6 Mt), lämpövoimalaitokset ja muut polttolaitokset (8 Mt) sekä jätteenpolto. Ilmastopaneeli toteaa, että Suomen voisi olla hyödyllistä tuottaa 5–6 Mt negatiivisia päästöjä tarjouskilpailun tai muiden ohjauskeinojen avulla. Yhdeksästä Suomen suurimmasta bioperäistä hiilidioksidia tuottavasta laitoksesta pystyttäisiin ottamaan talteen 15.7 Mt bioperäistä hiilidioksidia vuosittain. Hiilinielun tuottamisen yksikkökustannus Suomen teollisista päästölähteistä arvioidaan olevan välillä n. 120–240 €/tCO₂ tapauskohtaisesti. Ilmastopaneeli raportissaan toteaa myös, että kaikkeen hiilidioksidin poistoon liittyy erilaisia riskejä ja epävarmuuksia, joiden takia on tärkeää vahvistaa ja edistää sekä luonnon että teknologisia hiilinieluja⁹.

Suomen mahdollisuudet suurimittaiseen hiilidioksidin varastointiin negatiivisten päästöjen luomiseksi ovat riippuvaisia kansainvälisestä yhteistyöstä. Suomessa ei ole sopivia geologisia muodostumia¹⁰ hiilidioksidin varastointiin, joten geologinen varastointi onnistuu vain kuljettamalla hiilidioksidi toisen valtion alueella sijaitsevaan varastoon, kuten Tanskaan tai Norjaan. Sen sijaan Suomessa on Euroopan tasolla huomattavan suurta kaivosteollisuutta, jonka sivutuotteena syntyy vuosittain noin 90 Mt kaivosjätettä¹¹, kuten sivukiveä ja rikastushiekkaa. Joidenkin kaivosten, kuten esimerkiksi Hituran, Elijärven¹² tai Kevitsan¹³ jätteet soveltuvat hiilidioksidin varastointiin mineralisoimalla. Hiilidioksidin mineralisointitekniologia on vielä pilotointivaiheessa, mutta kaupallistuessaan se voisi tarjota kotimaisen vaihtoehdon hiilidioksidin varastoimiseen miljoonien tonnin kokoluokassa, ilman monitorointitarvetta¹⁴. Samalla voitaisiin ottaa kaivosjätteistä metalleja talteen sekä mahdollisesti tuottaa raaka-aineita rakennusteollisuuteen.

Suomen metsäbiotalouden tiedepaneelin mukaan¹⁵ Suomessa olisi käynnistettävä teollisuuspoliittiset toimet bioperäisten hiilidioksidipäästöjen hallinnan ja talteenoton sekä vihreän siirtymän vahvistamiseksi. Suomen olisi hyödyllistä tuoda esille

bioperäisen hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen mahdollisuuksia osana EU:n ilmastopolitiikkaa. Tähän liittyvät myös teknologiat, jotka tähtäävät prosessitehokkuuden nostoon ja hiilidioksidipäästöjen hallintaan resurssitehokkuuden kautta. Metsäbiotalouden tiedepaneelin mukaan bioperäisen hiilidioksidin talteenoton taloudellinen kannustin edellyttää, että talteenotto luetaan osaksi päästökauppasektoria.

Euroopan komissio esitteli tuoreessa tiedonannossaan¹⁶ keinoja ja strategiaa edistää hiilidioksidin talteenottoa, varastointia ja hyödyntämistä kestävästi ilmastoneutraaliuden saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä. Tiedonannon mukaan uusia toimia päästövähennyksiin ja hiilidioksidin hallintaan tarvitaan etenkin silloin kuin päästöjen vähentämiskeinot ovat rajallisia. Komissio arvioi tiedonannossa, että vuoteen 2040 mennessä EU:ssa tulisi ottaa talteen 280 miljoonaa hiilidioksiditonnia, josta noin 40 prosenttia eli yli 110 miljoonaa hiilidioksiditonnia otettaisiin talteen bioperäisistä lähteistä tai suoraan ilmakehästä. Vuoteen 2050 mennessä komission mukaan EU:ssa tulisi ottaa talteen noin 450 miljoonaa hiilidioksiditonnia, jolloin etenkin suoraan ilmakehästä talteen otetun hiilidioksidin merkitys kasvaisi.

EU:n delegoidun säädöksen 2023/1185 mukaan fossiilisen hiilidioksidin hyödyntäminen RFNBO-polttoaineisiin käytännössä päättyy 2040 vuoden loppuun mennessä, jolloin ilmasta kaapatun hiilidioksidin lisäksi bioperäinen hiilidioksidi nousee merkittävään rooliin.¹⁷ On arvioitu, että regulaatioperustusteinen RFNBO-lentopolttoaineiden tarve EU:ssa voisi olla 2050 lähes 15 Mt/a.¹⁸ Lisäksi merkittävää RFNBO-polttoaineiden tarvetta odotetaan olevan FUEEU Maritime-regulaation ohjaamassa meriliikenteessä.¹⁹ Hiilidioksidista valmistettavien kemikaalien ja materiaalien suhteen regulaatiot eivät ole yhtä kehittyneitä EU:ssa, mutta kemianteollisuudella tulee olemaan joka tapauksessa suuri tarve siirtyä ympäristöystävällisempiin tuotteisiin. Hiilidioksidista valmistettavat tuotteet ovat yksi mahdollinen ratkaisu. Joka tapauksessa bioperäisen hiilidioksidin roolin kestävässä raaka-aineena odotetaan kasvavan merkittävästi EU:ssa vuoteen 2050 mennessä.

1.2. Metsäbiotalous kestävässä kasvuun

Suomessa biotaloudella tarkoitetaan taloutta, joka käyttää uusiutuvia biologisia luonnonvaroja resurssiviisaasti ravinnon, energian, tuotteiden ja palvelujen tuottamiseen. Biotalouskokoluokan ja sen ajan myötä

tavoitellun kasvun mittarina tarkasteluissa käytetään usein (brutto) arvonlisää eli arvonlisäystä, jonka määritelmä on ”tuotantoon osallistuvan yksikön synnyttämä arvo”. Arvonlisä²⁰ lasketaan vähentämällä yksikön tuotoksesta tuotannossa käytetyt väli tuotteet, ja eri toimialojen arvonlisäysten summa muodostaa bruttokansantuotteen²¹ (BKT).

Kansallinen biotalousstrategia ”Kestävästi kohti korkeampaa arvonlisää” tavoittelee 4 %:n vuotuista kasvua biotalouden arvonlisälle. Tällöin koko biotalouden arvonlisä lähes kaksinkertaistuisi vuoteen 2035 mennessä verrattuna vuoden 2019 tasoon. Samaan aikaan Suomen tulisi olla hiilineutraali vuonna 2035. Metsien käyttöä haastavat globaalit sopimukset. YK:n luontokokous saavutti sovun luontokadon pysäyttämisestä vuoteen 2030 mennessä, ja siinä maailman valtioille annettiin 30 prosentin suojele- ja ennallistamistavoitteet. Yhtälöä ei ole kansallisesti eikä globaalisti helppo ratkaista. Kyse on teknistaloudellisten tarkastelujen lisäksi vastuullisuudesta, politiikkavalinnoista ja priorisoinneista sekä ajallisesti että paikallisesti oikeudenmukaisesta siirtymästä.

Kansallisessa biotalousstrategiassa kasvua ei tavoitella hinnalla millä hyvänsä, vaan etusija annetaan resurssiviisaalle taloudel-

liselle toiminnalle, jolla on hyvät kestävän kehityksen edellytykset. Metsä on tärkein uusiutuva biologinen luonnonvara Suomessa. Metsän tuottamat hyödykkeet perustuvat pääosin puubiomassan kasvattamiseen ja hyödyntämiseen raaka-aineina, jalosteina ja energiana. Metsän tuottamat ekosysteemi-palvelut ovat myös tärkeä osa biotaloutta. Lisäksi metsäbiotalous voi sisältää myös luonnonvarojen kestävään hyödyntämiseen pohjautuvien teknologioiden, sovellusten ja palvelujen kehittämistä ja tuotantoa. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan, millaisin reunaehdoin bioperäisen hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi voisivat luoda metsäsektorille uuden arvonlisän lähteen: hiilidioksiditalouden.



2. Metsäbiotalouden arvonlisäyksestä

Biotalousarvonlisäys vuosien 2010 ja 2019 välillä kasvoi noin 6 miljardia euroa eli noin 32 prosenttia. Tällä tarkastelujaksolla metsäsektorin arvonlisäys kasvoi 1,4 miljardia euroa eli noin 20 prosenttia. Metsäsektorin kasvu saavutettiin pääosin lisäämällä tuotantovolyymejä ja puunkäyttöä, mikä heijastui kasvaneina puunkorjummäärinä ja tuontipuunkäyttönä. Massa- ja paperiteollisuuden puukuutiometriä kohden laskettu arvonlisä on laskenut vuosituhannen vaihteen jälkeen. Vuonna 2019 metsäsektorin arvonlisäys oli kokonaisuudessaan noin 8,5 miljardia euroa kun taas koko biotalouden arvonlisä oli yhteensä 26 miljardia.

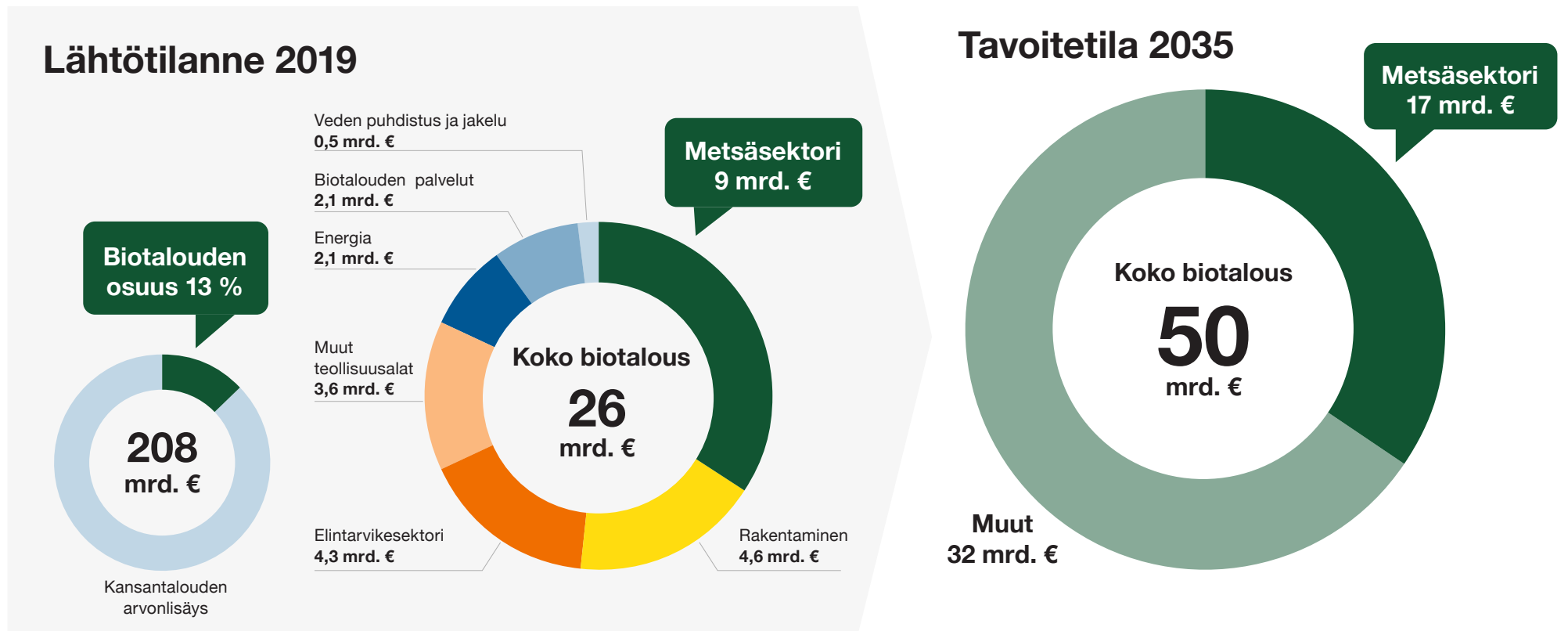
Vuonna 2022 biotalouden osuus²² Suomen kansantalouden arvonlisäyksestä oli 13 prosenttia ja työllisten määrästä 11 prosenttia. Suomen biotalous perustuu edelleen vahvasti metsäsektoriin, jonka osuus oli 36 prosenttia eli 10,5 miljardia koko biotalouden 29,4 miljardin arvonlisäyksestä.

Suomen biotalousstrategian tavoitteena on luoda kestäviin ratkaisuihin perustuvaa taloudellista kasvua ja työpaikkoja tuottamalla mahdollisimman korkean arvonlisän tuotteita ja palveluita. Tämä lisää alueellista ja kansallista hyvinvointia ja toimeliaisuutta. Kansatalouden kasvun, arvonlisän nostamisen ja uusien työpaikkojen syntyminen ajatellaan muodostuvan muun muassa teknologiakehityksen, resurssitehokkuuden kasvamisen, investointien sekä uusien palveluiden avulla. Biotalousstrategian päätavoitteiden mittareita ovat biotalouden arvonlisä, investoinnit, tavaravienti ja työllisyys.

Strategia tähtää biotalouden vuoden 2019 arvonlisän kasvattamiseen 26 miljardista eurosta 50 miljardiin euroon vuoteen 2035 mennessä. Olettaen, että metsäsektorin suhteellinen osuus arvonlisän muodostumisessa säilyy samana suhteessa muihin biotalouden sektoreihin, on metsäsektorin arvonlisän tavoitetilä vuonna 2035 noin 17 miljardia euroa (kuva 1).

Luken aiemmassa keskustelunavauksessa²³ todettiin, että Suomen biotalousstrategian kunnianhimoinen tavoite arvonlisän tuplaamisesta tulee olemaan haasteellinen, muttei mahdoton tehtävä metsäsektorin osalta. Luken mukaan metsäsektorin arvonlisän tuplaaminen vaatisi muun muassa nykyisen tuotevalikoiman radikaalia uudistumista, miljardien investointeja, aivan uusia teollisia ekosysteemejä sekä julkisen ja yksityisen sektorin parempaa yhteispeliä.

Luken tarkastelussa oletettiin, että metsäsektorin vuoden 2035 tavoitetilään 17 miljardin arvonlisästä päästäisiin kolminkertaistamalla kuiduttavan teollisuuden arvonlisä vuoteen 2019 verrattuna, koska arvonlisän merkittävän kasvattamisen metsätalouden ja puunkorjuun puolella ei nähty olevan mahdollista. Metsäsektorin arvonlisän muodostumista on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 2.



Kuva 1. Biotaloitusstrategian tavoitetila 2035 ja metsäsektorin osuus siinä.

Luken tarkastelun oleellinen johtopäätös oli, että biotalousstrategian toteutuminen vaatisi suuria rakenteellisia muutoksia metsäteollisuuden arvoketjuissa. Erityisesti sellun ja ligniinin jatkojalostamisella on ratkaiseva rooli, sillä korkean jalostusarvon tuotteita olisi tuotettava suuria määriä. Jos teollisuuden

saatavilla oleva raaka-ainemäärä tulevaisuudessa selvästi pienenee, haaste tuotteiden arvonlisän nostolle kasvaa vielä suuremmaksi.

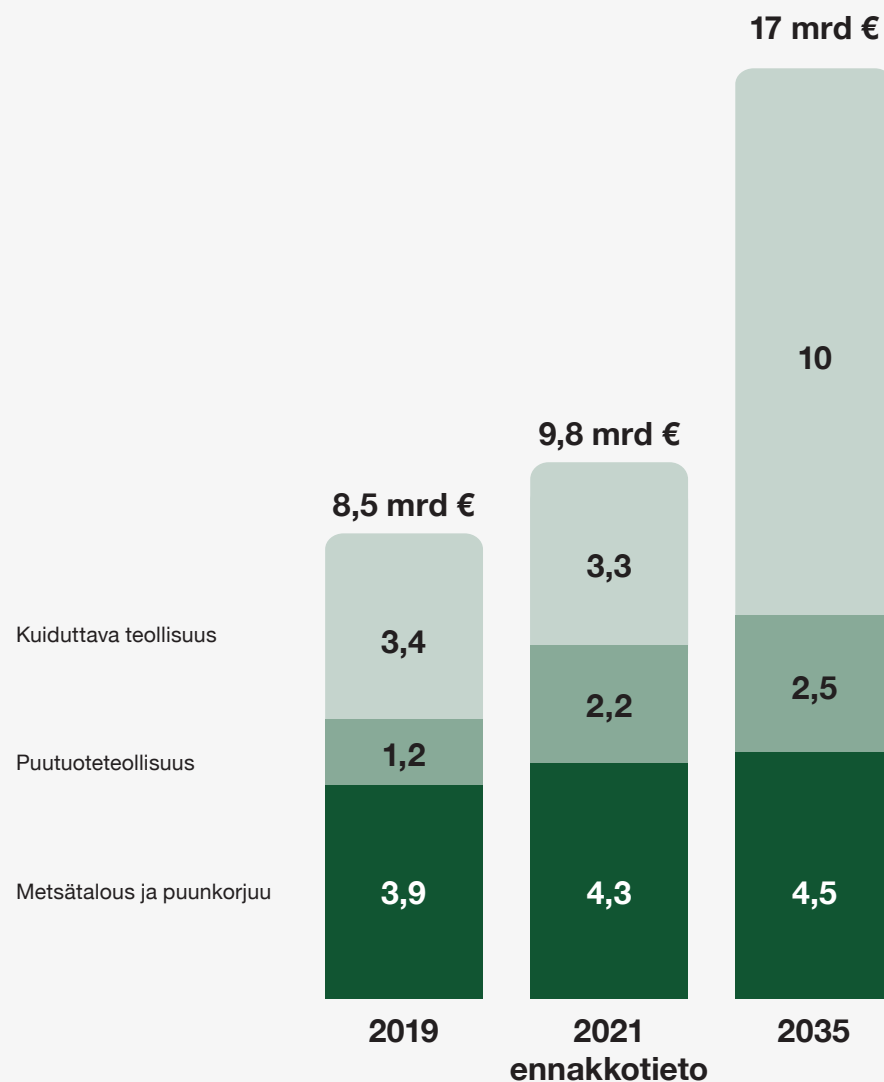
Tarkastelun perusskenaariossa peräti 70 prosenttia vientiselluloosasta jalostettiin tekstiilikuiduksi, muiden uusien tuotteiden

tuotannon lisäksi. Siirtymää korkean arvonlisäyksen tuotteisiin voidaan havainnollistaa suhteuttamalla metsäteollisuuden arvonlisäyksen käyttämään raakapuun määrään. Perusskenaariossa metsäteollisuuden arvonlisäys oli 175 €/m³ ja alemman puun käytön skenaariossa 210 €/m³. Vuonna 2019 tämä

suhdeluku oli metsäteollisuudelle 65 €/m³. Muutos nykytilanteeseen on siis merkittävä.

Uusien tuotantoprosessien ja uusien tuotteiden, erityisesti ligniinijohdannaisten kasvun myötä tehtaiden sähkön- ja lämmöntuotantotaseet muuttuvat. Aiemmassa tarkastelussa skenaarioiden vaikutuksia energiaan ei tarkasteltu yksityiskohtaisemmin. Työn päätulokset on koottu kuvaan 3.

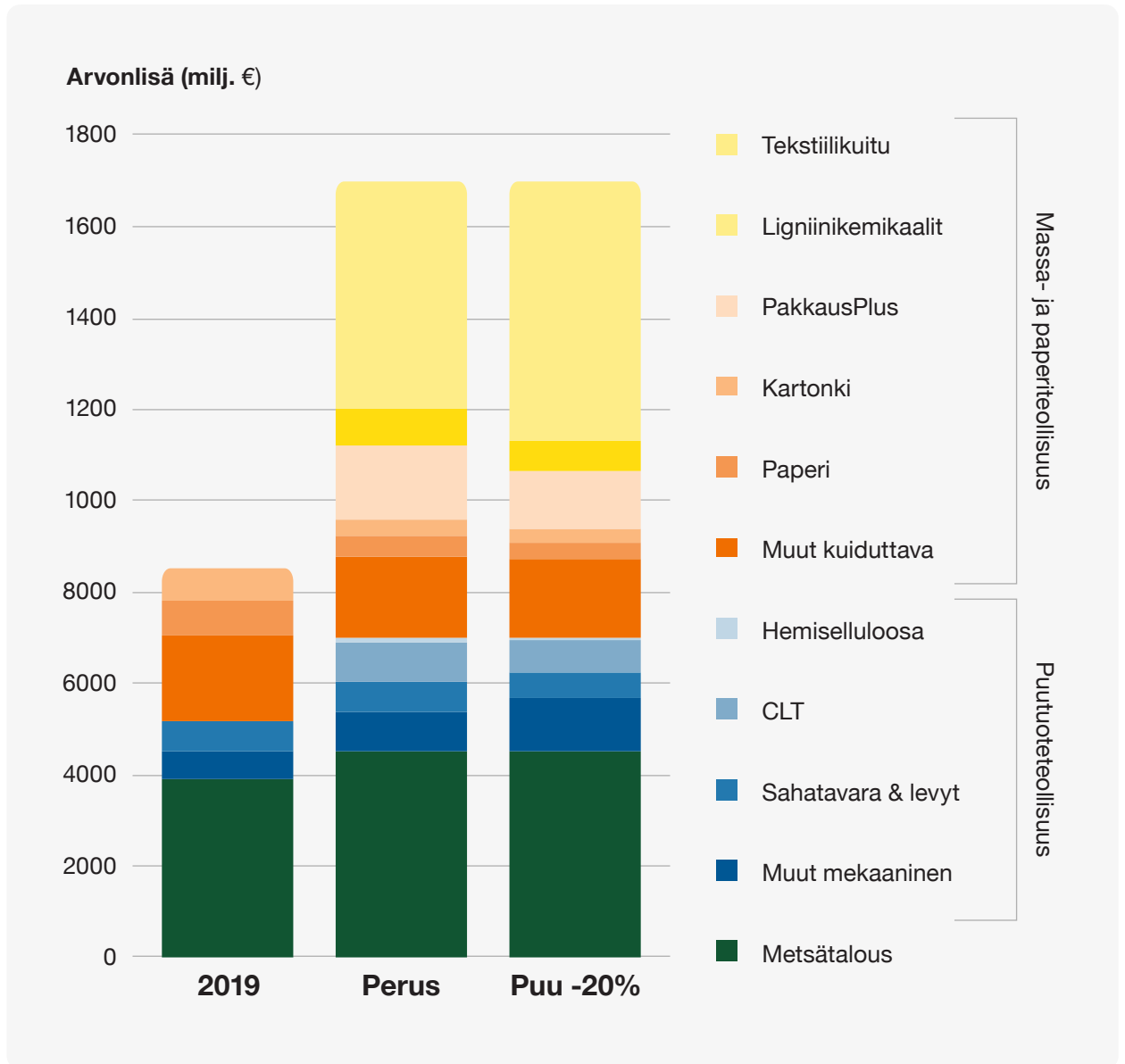
Metsäbiotalouden tiedepaneeli arvioi alkuvuonna 2024 julkaistussa raportissaan²⁴ tarkemmin Luken keskustelunavauksen pohjalta metsäsektorin arvonlisän kasvattamisen mahdollisuuksia sekä tarvittavia rakenteellisia muutoksia. Raportin mukaan metsien tuottamaa arvonlisää on mahdollista nostaa merkittävästi ilman lisähakkuita jatkojalostamalla ligniiniä, sellukuituja ja mekaanisia puutuotteita sekä hyödyntämällä sivuvirtoja. Arvonlisän nostaminen ei kuitenkaan ole mahdollista ilman merkittäviä investointeja sekä pitkäjänteistä panostusta



Kuva 2. Metsäsektorin arvonlisä 2019 ja arvio vuodesta 2035.

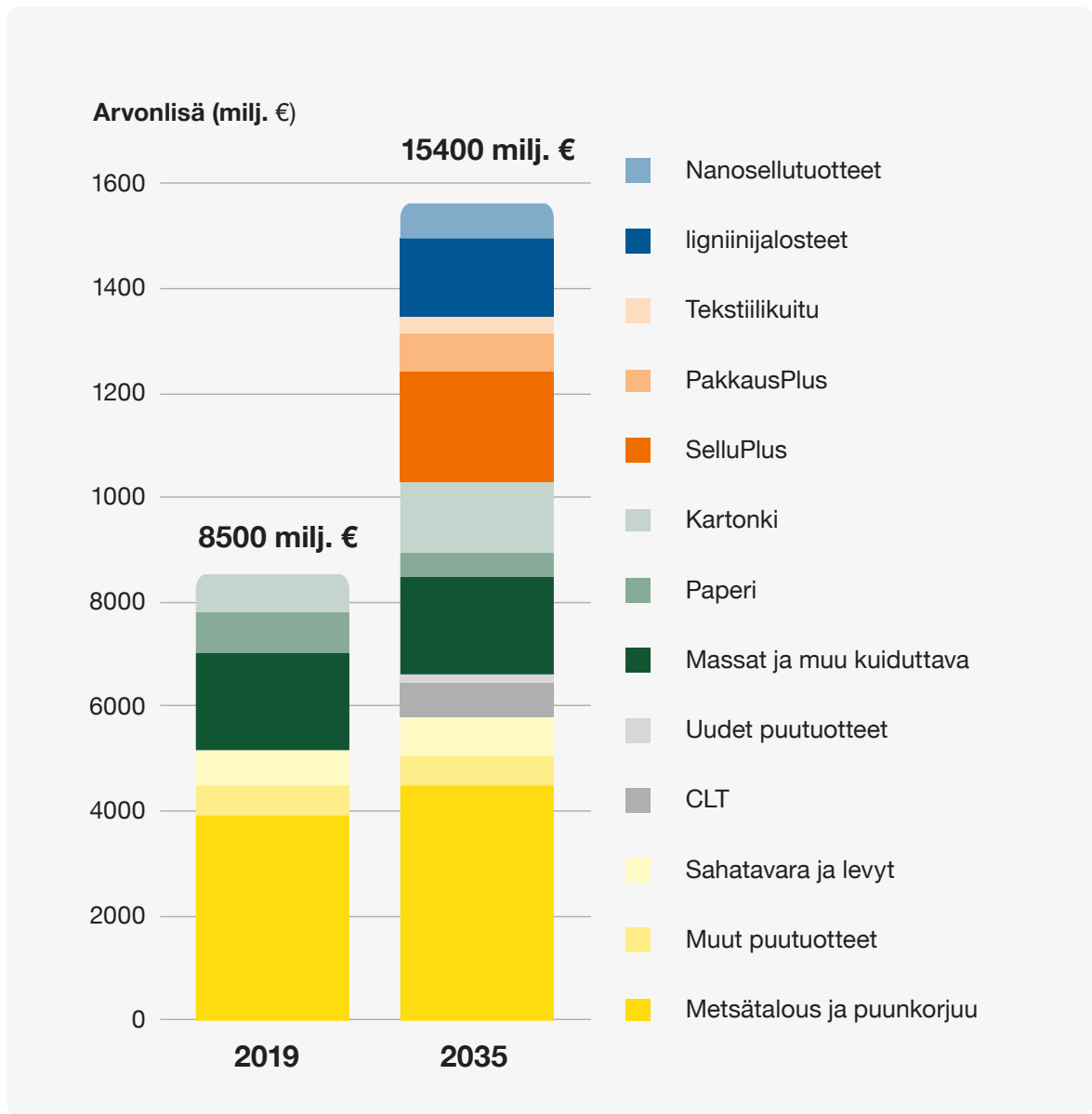
tutkimus- ja kehitystyöhön. Raportin mukaan vuonna 2035 Suomen metsistä voitaisiin saavuttaa jopa 15,6 miljardin euron arvonlisä, mikä tarkoittaisi 80 prosentin kasvua verrattuna vuoden 2019 tasoon (kuva 4).

Tarkasteltavat tuotteet oli jaoteltu nykyisten ratkaisujen päivitykseen ja uusiin innovaatioihin. Uusia tarkasteltavia tuoteryhmiä olivat muun muassa joustavat pakkaukset, kehittyneisiin erikoisselluihin perustuvat tuoteryhmät ja ligniinin lukuisat jalosteet. Työn merkittävimmät erot Luken aikaisempaan työhön olivat erityisesti laajempi tuotevalikoima sekä se, ettei arvonlisää ollut pakotettu kaksinkertaistumaan. Molemmissa skenaariotöissä kuitenkin päädytään liki 16 miljardin arvonlisäpotentiaalin, eli metsäsektorin arvonlisän kasvattamispotentiaali arvioidaan todella suureksi. Molemmat raportit arvioivat arvonlisän voimakkaan kasvattamisen kuitenkin olevan erittäin haasteellista vuoteen 2035 mennessä.



Kuva 3. Metsäsektorin arvonlisäykset lähtötilanteessa ja eri skenaariossa (Perus ja Puu -20 %).

Metsäsektorin tavoitellun arvonlisäyksen nostoa voisi vauhdittaa sektorilta vapautuvan bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämisen avulla. Volyymiltään se on sektorin suurin hyödyntämätön hiilivirta, mutta toisaalta se on myös vaikeimmin hyödynnettävissä. Hiilidioksidin voi muuttaa tuotteiksi, mutta se vaatii lähtökohtaisesti paljon energiaa. Bioperäisen hiilidioksidin laajamittaisen hyödyntämisen eri teknologioiden kautta voidaan arvioida kuitenkin olevan realistista, jos Suomen vetytaloustavoitteet toteutuvat. Bioperäistä hiilidioksidia voi myös varastoida pysyvästi. Näin luodaan arvokas hiilinielu.



Kuva 4. Metsäsektorin arvonlisäys lähtötilanteessa arvio potentiaalista.

3. Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi

3.1. Teknologiat ja hankkeiden nykytila

Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi (engl. Carbon capture, utilisation and/or storage, CCUS) kattaa laajan joukon erilaisia teknologioita ja niiden yhdistelmiä. Osajoukkoja näistä yhdistelmistä ovat hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon capture and storage, CCS) ja hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö (Carbon capture and utilisation, CCU). Joissain tapauksissa talteen otettu hiilidioksidi käytetään hyödyksi ja varastoidaan pysyvästi tai pitkäikäisesti esimerkiksi rakennustuotteisiin. Hiilidioksidia voidaan varastoida suurissa määrissä pysyvästi sopivanlaisiin geologisiin muodostumiin, kuten suolavesikerrostumiin tai tyhjentyneisiin kaasu- tai öljykenttiin. Suomessa tällaisia muodostumia ei kuitenkaan ole.²⁵ Hiilidioksidin hyötykäytössä tuotteen elinkaari voi vaihdella paljon lyhytikäisistä polttoaineista polymeeriin rakennusmateriaaleihin, joiden elinkaari voi olla vuosikymmeniä ja pysyvästi hiilidioksidia varastoiviin mineraalisiin

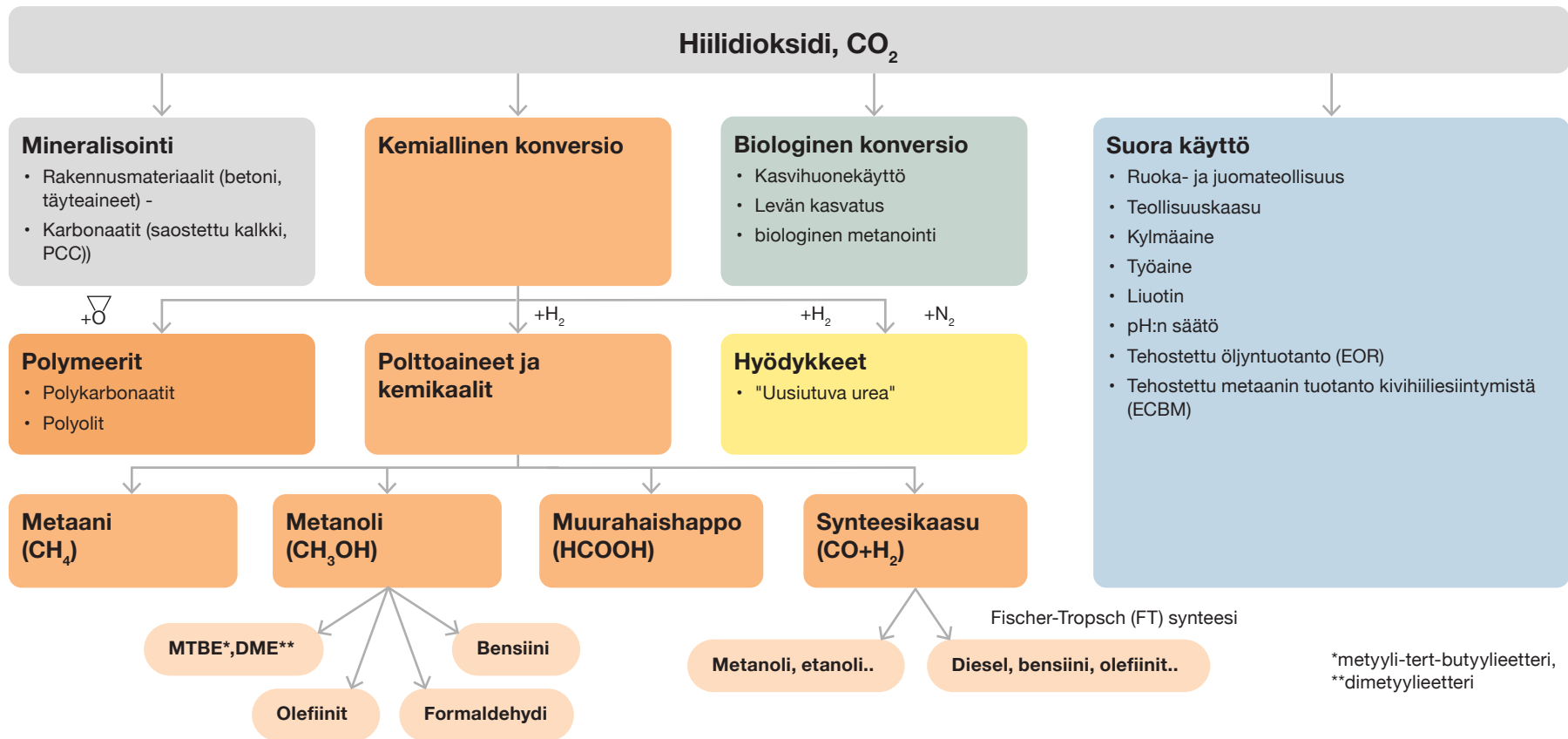
materiaaleihin. Esimerkkejä hiilidioksidin hyötykäyttömahdollisuuksista on esitetty kuvassa 5 (Kärki 2018).²⁶

Hiilidioksidin talteenoton, hyötykäytön ja varastoinnin teknologiakehityksen ja hankkeiden tilannetta Euroopassa ja Suomessa on päivitetty Valtioneuvoston kanslian teettämässä selvityksessä *Carbon dioxide use and removal: Prospects and policies* (Kujanpää et al. 2023).²⁷ Teknologiakehityksen tilaa metsäsektorin bioperäisen hiilidioksidin näkökulmasta voisi vetää yhteen seuraavasti:

Hiilidioksidin talteenottoteknologiat:

Pesurityyppisiä teknologioita kuten amiinipesuprosesseja on kaupallisesti saatavilla ja laajalti käytössä esim. kemianteollisuudessa, joskaan sellutehtaisiin yhdistettynä teollisen kokoluokan laitoksia ei vielä ole rakennettu. Energiaa säästäviä ja ympäristöystävällisempiä uusia teknologioita kehitetään ja pilotoidaan.

Hiilidioksidin hyötykäyttö: Hyötykäyttöreitistä riippuen teknologian kypsyyssaste vaihtelee huomattavasti. Esimerkiksi monet polttoaineiden tuotantoteknologiat (esim. metaani ja metanoli) ovat kaupallistumassa ja näiden kaupallistumiseen vaikuttavat erityisesti regulaatiot EU:ssa. CCU-polttoaineiden kaupallistumista ajavat erityisesti lentopolttoaineisiin liittyvät regulaatiot ja niiden valmistuksen tärkeimmät reitit ovat Fischer-Tropsch -hiilivetyjä ja metanolia välituotteina hyödyntävät tuotantoteknologiat. Joidenkin rakennusmateriaalien ja täyteaineiden valmistus on jo kaupallista, ja kemikaalien sekä muovituotteiden valmistusta hiilidioksidista on demonstroitu yksittäisille muovilaaduille. Kustannukset korkeapäästöisiin verrokkeihin ovat usein vielä merkittävästi suurempia ja CCU-kemikaalien ja -materiaalien tuotannon regulaatio on EU:ssa polttoaineisiin verrattuna kehittymättömämpää.



Kuva 5. Erilaisia hiilidioksidin hyödyntämisreittejä.

Hiilidioksidin varastointi: Hiilidioksidin geologisesta varastoinnista on vuosikymmenten kokemuksesta erityisesti Yhdysvalloissa tehostettuun öljyntuotantoon liittyen. Teollisessa kokoluokassa hiilidioksidia on varastoitettu Norjassa Sleipnerissa vuodesta

1996, mutta vasta nyt varastointimäärien odotetaan lähtevän huomattavaan kasvuun pohjoisessa Euroopassa. Lähivuosina lukuisat uudet hankkeet aloittavat toiminnan. Hankkeet keskittyvät pääasiassa fossiilisen hiilidioksidin varastointiin päästökaupan

ohjaamana, muutamaa vapaaehtoisilla päästökaupparakkeilla rahoitettua bioperäistä poikkeusta lukuun ottamatta. Suomessa hiilidioksidin varastoinnin mahdollistava mineralisointitekniikka on vielä pilotoitintasolla.

Hiilidioksidin logistiikka: Hiilidioksidin suurimittaiseen kuljetukseen ja välivarastointiin vaadittava infrastruktuuri on vasta suunnitteilla. Keskipitkällä aikavälillä todennäköinen kuljetus varastoihin Suomesta tapahtuisi laivoilla, joista vasta ensimmäisiä kaupallisia aluksia on rakennettu.

Euroopassa on käynnissä kymmeniä esikaupallisia tai kaupallisia hiilidioksidin hyötykäyttöön liittyviä hankkeita (CO₂ Value Europe)²⁸ ja yli kaksikymmentä julkistettua hiilidioksidin geologisen varastoinnin hanketta (GCCSI).²⁹ Olemassa olevaa hiilidioksidin hyötykäyttöön liittyvää toimintaa Suomessa on hiilidioksidin käyttö sellaisenaan esimerkiksi teollisuuskaasuna tai pH:n säädössä sekä paperin täyteaineena käytetyn saostetun kalsiumkarbonaatin valmistuksessa. Suomessa viimeaikaiset lähimpänä kaupallista toimintaa olevat hankkeet ovat liittyneet hiilidioksidin hyötykäyttöön metaaniksi uusiutuvan vedyn kanssa sekä hiilidioksidin käyttöön betonituotteissa. Lisäksi viime aikoina on julkaistu useita esiselvityksiä suuremman kokoluokan hankkeista, joista jotkin liittyvät myös hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin teknologisten hiilinielujen luomiseksi. (Kujanpää ym. 2023)³⁰

3.2 Keskeiset politiikat

EU:ssa on hiljattain hyväksytty hiilidioksidin hyötykäyttöön sekä varastointiin liittyviä regulaatiota ja lisäksi useita aihepiiriin liittyviä ehdotuksia on työn alla. Hyötykäytön osalta valmiina oleva sääntely liittyy lähinnä liikennepolttoaineiden valmistukseen ja käyttöön. Niin sanotut sähköllä tuotetusta vedystä ja hiilidioksidista valmistettavat sähköpolttoaineet, ”muuta kuin biologista alkuperää olevat nestemäiset ja kaasumaiset polttoaineet (renewable fuels of non-biological origin, RFNBO-polttoaineet)”, määritellään uusiutuvan energian direktiivissä, josta viimeisin versio (REDIII)³¹ astui voimaan marraskuussa 2023.

Uusiutuvan energian direktiivin hiljattain julkaistuissa delegoiduissa säädöksissä (2023/1184³² ja 2023/1185) säännellään mm. RFNBO-polttoaineiden valmistusmenetelmistä ja vaadituista kasvihuonekaasupäästövähennyksistä. Merkittävintä bioperäisen hiilidioksidin kysynnän kannalta on fossiilisen hiilidioksidin käytön kieltä RFNBO-polttoaineissa päästökaupan piirissä olevilta sähköntuotantolaitoksilta kaapattuna vuoden 2035 jälkeen sekä kaikista päästökaupan piirissä olevista päästölähteistä vuoden 2040 jälkeen.

EU:n FitFor55-paketti sisälsi uusiutuvan energian direktiivin lisäksi aloitteet sähköpolttoaineista ilmailu- ja meriliikenteessä, ReFuelEU Aviationin ja FuelEU Maritimen. Ne julkaistiin säädöksinä 2023. CCU-tuotteiden markkinoiden kannalta merkittävin on ReFuelEU Aviation -säädos, joka säätelee kestävien lentopolttoaineiden käyttöä EU:n lentoliikenteessä. Säädöksen mukaan sähköpolttoaineiden osuus EU:n lentoliikenteessä tulisi olla 2035 5 % kasvaen 35 %:iin vuoteen 2050. Tämä tarkoittaa lähes 15 Mton/a sähköpolttoainemarkkinaa EU:ssa 2050 mennessä. Lisäksi FuelEU Maritime -säädos ohjaa lähitulevaisuuden meriliikenteen päästöjä EU:ssa. Säädöksen mekanismi on erilainen kuin ReFuelEU Aviationin asettaen tavoitteeksi 80 % hiili-intensiteetin aleneman meriliikenteessä 2050 mennessä. Sähköpolttoaineiden osuutta tavoitteen saavuttamiseksi ei ole niin selkeästi säädelty kuin lentoliikenteessä, mutta ainakin metanoli nähdään potentiaalisesti vedystä ja hiilidioksidista valmistettavaksi sähköpolttoaineeksi meriliikenteessä. RFNBO:n vähimmäismäärä vuoteen 2031 mennessä on yksi prosentti. Siinä tapauksessa, että määrä ei täyty, tavoite nostetaan kahteen prosenttiyksikköön vuodesta 2034 lähtien.

Muiden CCU-tuotteiden kuin polttoaineiden suhteen on regulaatiokenttä EU:ssa huomattavasti kehittymättömämpi. Materiaalituotteisiin vaikuttavia valmistelussa olevia EU-regulaatioita ovat mm. delegoitu säädös pysyvästä CCU:sta, jonka viimeisimmän julkaistun luonnoksen mukaan pysyviksi CCU-tuotteiksi laskettaisiin ainoastaan jotkut mineralisointituotteet. Lisäksi valmisteltavana olevassa nettonollateollisuutta koskevassa säädöksessä (Net Zero Industry Act) tullaan ottamaan kantaa luetaanko CCU nettonollateknologioihin.

Euroopan komissio julkaisi helmikuussa 2024 tiedonannot unionin ilmastotavoitteista vuodelle 2040 (COM/2024/63) sekä teollisen hiilenhallinnan strategiasta (COM/2024/62). Teollisen hiilenhallinnan tiedonanto pyrkii luomaan strategisen kokonaisuuden, joka edistää kilpailukykyä ja päästövähennyksiä, sisältäen kuvauksen toimista, joilla luodaan eurooppalainen hiiliarvoketju. Tiedonantojen keskeisenä viestinä oli merkittävä tarve sekä bioperäisen hiilidioksidin hyötykäytölle sekä teknologisille hiilinieluilille EU:ssa, 50-70Mt/vuosi vuonna 2040 sekä 115 Mt/vuosi vuonna 2050. Tavoitteiden saavuttamiseksi komission strategia asettaa säännöskehikon luonnin sekä vaadittavan infrastruktuurin kasvattamisen ensisijaisiksi toimenpiteiksi.

Yhdessä teknologian taloudellisuuden sekä rahoitusinstrumenttien kehittämisen myötä, bioperäisen hiilidioksidin talteenotolle pyritään luomaan suotuisa liiketoimintaympäristö merkittävässä skaalassa vuoden 2040 jälkeen.

Tällä hetkellä BECCS:lle ei ole suoria kannustimia kansallisessa tai EU:n lainsäädännössä. EU:n ETS-direktiivissä (EU Emissions Trading System 2023/959) on määrätty, että Euroopan komission on viimeistään heinäkuussa 2026 raportoitava Euroopan parlamentille ja EU:n neuvostolle siitä, miten päästökauppaan voitaisiin sisällyttää “kasvihuonekaasujen poistaminen ilmakehästä ja niiden turvallinen ja pysyvä varastoiminen negatiivisina päästöinä”. Vaihtoehtona arvonmuodostuksena keinona teknologisille hiilinieluilille voisivat päästökaupan lisäksi tai sijaan toimia vapaaehtoiset hiilenpoistomarkkinat, joita ei toistaiseksi ole kuitenkaan reguloitu vahvasti EU:ssa niiden laadun varmistamiseksi. Euroopan komissio on esittänyt vapaaehtoista sertifiointijärjestelmää hiilidioksidin poistomekanismeille. Komission on koontanut asiantuntijaryhmän (Expert group on carbon removals) auttamaan tätä työtä.

Suomessa Petteri Orpon hallitusohjelmaan on kirjattu, että teknologisiin hiilinieluihin

sijoittamista ja käyttöönottoa edistetään ja tuensaantimahdollisuuksia kartoitetaan. Hallitusohjelman mukaan kartoituksen perusteella otetaan käyttöön ”negatiivisten päästöjen huutokauppajärjestelmä tai vastaava ratkaisu” (Valtioneuvosto 2023) bioperäisen hiilidioksidin käytön ja poiston edistämiseksi Suomessa. BECCS-hankkeista saatava päästövähennys vähentäisi Suomen kokonaispäästöjä IPCC:n inventaariohjeiden (EU 525/2013) mukaisesti YK:n inventaariossa. Päästövähennys näkyisi taakanjakosektorilla, kun inventaarin kokonaispäästöistä otetaan ETS-sektorin päästöt pois (Kujanpää ym. 2023).



4. Laskentamenetelmät ja skenaariot

4.1. Laskennan oletuksista

Tämän työn keskeinen tarkoitus on pohtia neljän erilaisen skenaarion avulla metsäsektorin hiilidioksiditaloutta. Tutkimme, kuinka metsäsektorin suuruutta kuvaavaan arvonlisään vaikuttaisi se, jos sen tuottamaa, noin 20 Mt/a bioperäistä hiilidioksidivirtaa vastaava määrä käytettäisiin jatkojalostuksen raaka-aineena tai sitä varastoitaisiin lopputuotteena täysimääräisesti vuoteen 2040 mennessä asteittain kasvavasti. Keskitymme työssä vain hiilidioksiditalouden suuruusluokkaan ja siihen vaikuttaviin tekijöihin, ja esimerkiksi biodiversiteetti-vaikutuksia ei ole arvioitu. Skenaariot kuvataan tarkemmin kappaleessa 4.2.

Arvonlisän laskennan keskiössä on tuotteiden valmistuksesta saatavat tulot (ns. tuotos) ja välituotekustannukset, joiden erotuksena saadaan arvonlisä. Välituotekustannuksissa huomioidaan ostetut panokset, jotka tuotantoprosessissa jalostetaan uusiksi tuotteiksi. Välituotekustannuksiin eivät siis

kuulu työvoima- tai pääomakustannukset, vaan ne lasketaan arvonlisään. Arvio välituotekustannuksista perustuu ymmärrykseen tuotantoprosessista ja arvioihin välituotteiden hinnoista. Tuotantoprosessien kuvaukset on kerätty kirjallisuudesta³³ ja välituotehinnat perustuvat nykyisiin hintoihin tai oletuksiin tulevista hinnoista. Skenaarioissa erityisen merkittävä välituote on sähkö, jonka hinta määrittelee vedyn ja sen jatkojalosteiden hintatason. Sähköntuotannon arvonlisäystä ei ole tässä työssä arvioitu, koska se rajautuu selvästi metsäsektorin ulkopuolelle.

Tuotoksen laskennassa tarvitaan arvio valmistettujen tuotteiden hinnoista. Tässä työssä ei ole käytetty arvioita tulevasta hintakehityksestä, vaan hinnat on määritelty johdonmukaisesti prosessikuvausten perusteella syntyvien tuotantokustannusten perusteella. Näin laskettu hinta kattaa välituote-, työvoima- ja pääomakustannukset. Tuotteiden hinnat on siis arvioitu tasolle, jolla

niiden tuottaminen on juuri ja juuri kannattavaa. Peruslaskelmissamme myyntituloista pystytään kattamaan asetettu pääoman tuottovaade, mutta hinta ei sisällä ylimääräistä voittomarginaalia. Tässä tapauksessa arvonlisä on suoraan työvoima- ja pääomakustannusten summa. Laskennan keskeinen oletus on, että tarkastelluille tuotteille on tuotantokustannuksia vastaavalla hintatasolla skenaarioiden tuotantotasoa vastaava kysyntä. Tämä oletus on sitä perustellumpi, mitä kilpailukykyisempi näiden tuotteiden suomalainen tuotanto on suhteessa tuotantoon muissa maissa.

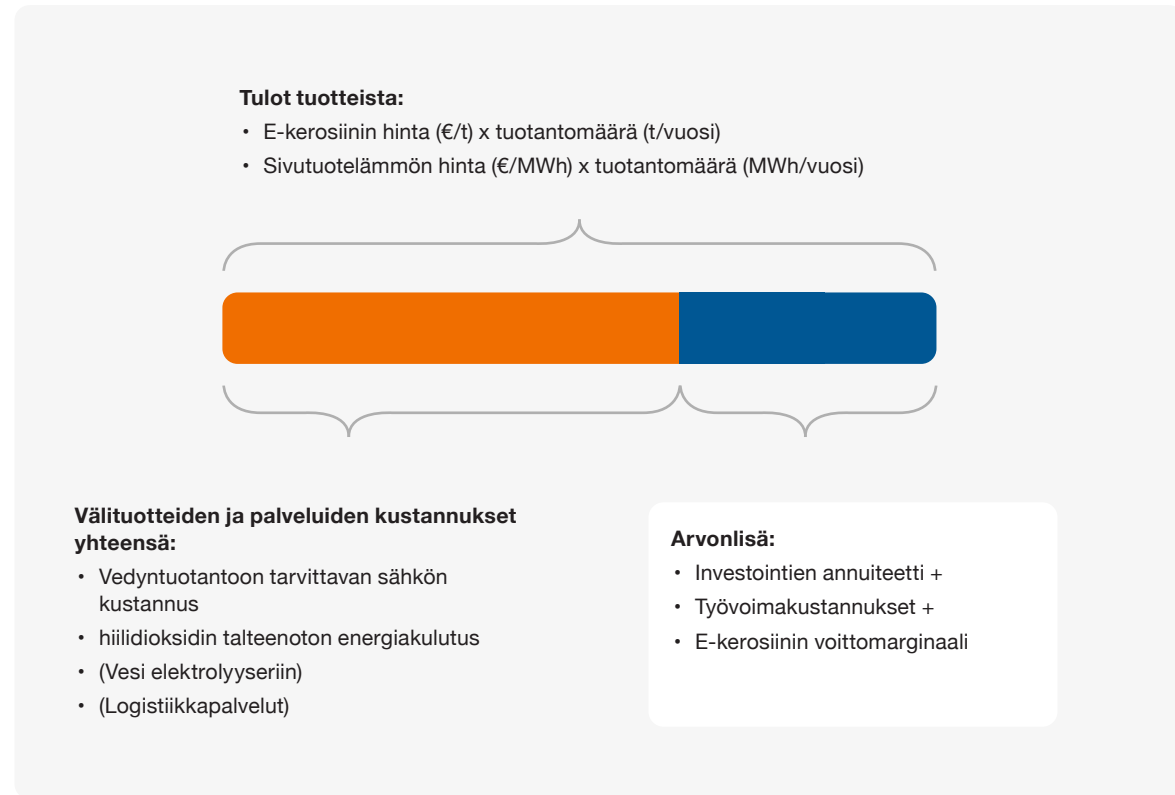
Tarkasteltaviksi CCU-tuotteiksi valittiin turbiinimoottoreihin soveltuva lentopolttoaine (e-kerosiini) kuvaamaan lyhyen elinkaaren liikennepolttoainetuotetta. Sähköpolttoaineista erityisesti e-lentopolttoaineiden markkinan odotetaan aukeavan ensin EU:ssa johtuen regulaatioiden (ReFuelEu Aviation) ohjausvaikutuksesta. Merkittävästä

bioperäisen hiilidioksidin määrästä johtuen Suomesta voisi tulla merkittävä e-kerosiinin viejä. E-kerosiinin valmistuksen sivutuotteena saadaan myös e-bensiiniä, mikä huomioidaan CCU-laskelmissa.

Pidemmän elinkaaren CCU-tuotteeksi valittiin hiilidioksidista valmistettavat polyolit, jotka ovat monien pitkäikäisten polyuretaanituotteiden, kuten rakennuseristeiden ja –liimojen raaka-aineita. Koska näiden tuotteiden tuottaminen ei ole vielä tässä vaiheessa regulaatioihin perustuvaa, on niiden kaupallistumisen aikataulussa ja tuotantomäärissä enemmän epävarmuustekijöitä.

Sekä e-kerosiinin että polyolien tuotantokustannusten arvioinnissa käytettiin VTT:n hiljattain päättäneiden E-fuel³⁴ – ja BECCU³⁵-projekteissa tuotettua tutkimustietoa.

CCS:n tapauksessa tarkasteltiin sekä geologista että mineralisointiin perustuvaa hiilidioksidin varastointia. Geologisen varastoinnin tapauksessa huomioitiin erilaiset kustannusrakenteet sen mukaan, onko hiilidioksidin lähde rannikolla vai sisämaassa. Vastaavasti mineralisoinnissa huomioitiin se, syntykö talteen otettava hiilidioksidi lähellä mineralisoinnissa käytettävää kiviainesta,



Kuva 6. Arvonlisän laskenta esimerkituotteelle (e-kerosiini)

siirretäänkö kiviaines hiilidioksidilähteen luo vai siirretäänkö talteen otettu hiilidioksidi kiviaineksen luo.

Vuosille 2030, 2035 ja 2040 arvioitiin erilliset investointikustannukset elektrolyysiin, e-kerosiinin ja polyolien valmistukseen. Lisäksi

kaikkien pääomakustannusten arvioinnissa käytettiin 10, 9 ja 8 prosentin keskimääräistä pääomakustannusta (WACC) vuosille 2030, 2035 ja 2040. Aleneva kustannus kuvaa teknologian ja markkinoiden kehittymisen myötä alenevia investoinnin tuottovaatimuksia. Investointikustannusten laskennassa

huomioitiin se, että vuonna 2035 on käytössä vuoden 2030 laitokset ja vuonna 2040 kaikki laitokset vuosilta 2030 ja 2035.

Sähkön ja lämmön hinnoiksi laskelmissa asetettiin 45 ja 30 €/MWh vastaavasti. Vuotuisiksi käyttötunneiksi valittiin 8000 h. Peruslaskelmissamme bioperäisen hiilidioksidin varastoinnista maksettavan korvauksen suuruus (€/tCO₂) valittiin vastaamaan kullekin teknologialle arvioituja tuotantokustannuksia. Valittu lähestymistapa vastaa hiilidioksidin hyötykäytön käsittelyä, eli skenaarioissa oletettu hintataso vastaa tilannetta, jossa voittomarginaali on nolla prosenttia. Näillä oletuksin skenaarioissa lasketut arvonlisät ovat kustannusperusteisia arvonlisäjä, joissa investointi on kuitenkin pääoman tuottovaatimuksen mukaisesti kannattava.

Tulevaisuuden ennakoiminen on vaikeaa. Tulevaisuusskenaario on projisointi tulevasta, kyseessä ei siis ole ennuste. Skenaarion toteutumiseen vaikuttaa useita epävarmuustekijöitä, kuten teknologiamurrokset, ansaintalogiikan muutokset, asennemuutokset, poliittikkamuutokset niin kansallisesti kuin kansainvälisesti sekä monet muut epävarmuuksia aiheuttavat toimet ja tapahtumat, joita peilattiin lyhyesti toimintaympäristön kuvauksessa luvussa 1.1. Täten on hyvä

tiedostaa, että laskennassa käytetyt luvut ja sitä kautta saadut tulokset ovat syntyneet tämän työn tekijöiden muodostamien arvioiden pohjalta. Skenaarioiden tulosten taustalla olevaa laskentaa ja siinä käytettyjä lukuja ja perusolettamia on tarkemmin kuvattu Liitteessä 1.

4.2. Bioperäisen hiilidioksidin käyttö eri skenaarioissa

Hiilidioksidin talteenoton käyttö- ja/ tai varastointimäärien taustalla kussakin skenaariossa on Suomen tämänhetkiset bioperäiset CO₂-päästöt suurista päästölähteistä. Nykyiset yli 0,1 Mt/a pistelähteistä peräisin olevat bioperäiset CO₂-päästöt Suomessa ovat yhteensä noin 28 Mt/a, josta metsäteollisuuden osuus on noin 19,6 Mt/a. Tästä määrästä noin 15 Mt/a voitaisiin ottaa suhteellisen helposti talteen suurimmista päästölähteistä ja varastoida noin 130 €/t CO₂ arvioiduilla kustannuksilla ja noin 20 Mt/a noin 150 €/tCO₂ arvioiduin kustannuksin, jota seuraisi jyrkempi kustannusten nousu siirryttäessä pienemmän mittakaavan laitoksille ja tehtaille (Kujanpää ym. 2023). On myös huomattava, että 2–3 suurinta bioperäistä hiilidioksidia tuottavaa tehdasta riittäisi tarjoamaan noin 5 Mt/a potentiaalin ja vastaavasti 5–6 tehdasta tarjoaisi jo 10 Mt/a potentiaalin.



Tässä työssä tutkimme neljää eri skenaariota (MAXCCS, MAXVALUE, OPPORTUNITY ja MAXCCS+H2) kolmessa eri aikaikkunassa. Kussakin skenaariossa hyödynnetyn bioperäisen hiilidioksidin vuotuinen käyttömäärä kunakin vuonna eri käyttökohteissa on lueteltu Taulukossa 1. Skenaariot sisältävät varastoidun ja/tai hyödynnetyn CO₂:n määrän asteittaisen lisäyksen ollen vuonna 2040 maksimissaan 20 Mt/a.

Ensimmäinen skenaario MAXCCS kuvaa tilannetta, jossa bioperäinen hiilidioksidi varastoidaan asteittain kasvavasti niin, että lopulta vuonna 2040 koko 20 Mt/a hiilidioksidivirta varastoidaan. Pääpaino on geologisella varastoinnilla, mutta vuosina 2035 ja erityisesti 2040 osa varastoinnista perustuu mineralisointiin. Toinen skenaario MAXVALUE lähtee ajatuksesta, että samaiset hiilidioksidivirrat hyödynnetäänkin kokonaisuudessaan uusien tuotteiden tekemiseen. Kolmas OPPORTUNITY-skenaario on kahden edellisen välimuoto, eli siinä on mukana sekä varastointia että hyötykäyttöä, pääpainon kuitenkin ollessa hyötykäytössä. Neljännessä MAXCCS+H2-skenaariossa MAXCCS-skenaariota arvonlisään on lisätty MAXVALUE-skenaariota vedyn tuotantoa vastaava arvonlisä. Tällä skenaariolla hahmottelemme bioperäisen hiilidioksidin

	2030		2035		2040	
	CCU	CCS	CCU	CCS	CCU	CCS
MAXCCS		5		10		20
MAXVALUE	5		10		20	
OPPORTUNITY	2.5	2.5	5	5	15	5
MAXCCS+H2		5		10		20

Taulukko 1. Skenaariot, vuodet ja hiilidioksidin kaappausmäärät (milj. t/a).

jatkojalostuspotentiaalin suhdetta pelkkään vedyn ja teknologisten hiilinielujen tuotantoon.

Skenaarioissa oletetaan, että kysyntä tuotteille tai negatiivisille päästöille on olemassa niiden tuotantokustannuksiin perustuvalla hintatasolla, eikä markkinan koko ole rajoittava tekijä skenaarioiden toteutumiselle. Skenaariot eivät siis heijasta esim. negatiivisten päästöjen tai sähköpolttoaineiden

kysynnän mahdollisesti luomaa kustannustasoa korkeampaa markkinahintaa, erityisesti tilanteessa, jossa tarjonta on niukkaa. Käytettyjen hintatasojen alapuolella toiminta kuitenkin ei olisi kannattavaa, jolloin skenaarioiden toteutumista siinä tapauksessa ei pidetä todennäköisenä. Skenaarioiden tarkemmat laskentaperusteet, kuten tuotteille käytetyt hinnat sekä tuotantomäärät on esitetty lukuina Liitteessä 2.

5. Tulokset: tulevaisuuden tuotantoa ja tuotteita

5.1 Skenaarioiden tulokset

Skenaarioiden tuottamat tulokset (arvonlisä, kumulatiiviset investoinnit ja sähkönkulutus) eri vuosina on esitetty Kuvissa 7, 8 ja 9. Tulokset on esitetty taulukoina Liitteessä 2.

Vuonna 2030 arvonlisä nousee parhaimmillaan 1,6 miljardiin euroon MAXVALUE-skenaariossa, kun skenaarioissa hyödynnetään yhteensä 5 miljoonaa tonnia bioperäistä hiilidioksidia. Tuotteina syntyy 0,8 Mt vetyä, jonka avulla tuotetaan 0,8 Mt kerosiinia, 0,6 Mt e-bensiiniä ja 0,1 Mt polyoleja. OPPORTUNITY-skenaariossa arvonlisä on noin miljardi euroa, mikä syntyy mm. vedyn ja kerosiinin 0,4 Mt tuotannoista että 2,5 Mt hiilidioksidin geologisesta varastoinnista. MAXCCS-skenaariossa arvonlisä on vastaavasti 400 miljoonaa euroa kaiken hiilidioksidin mennessä geologiseen varastointiin. Hiilidioksidin talteenoton ja pelkän vedyn tekemisen skenaario MAXCCS+H2 saavuttaa noin miljardin euron arvonlisän. Vuonna 2030

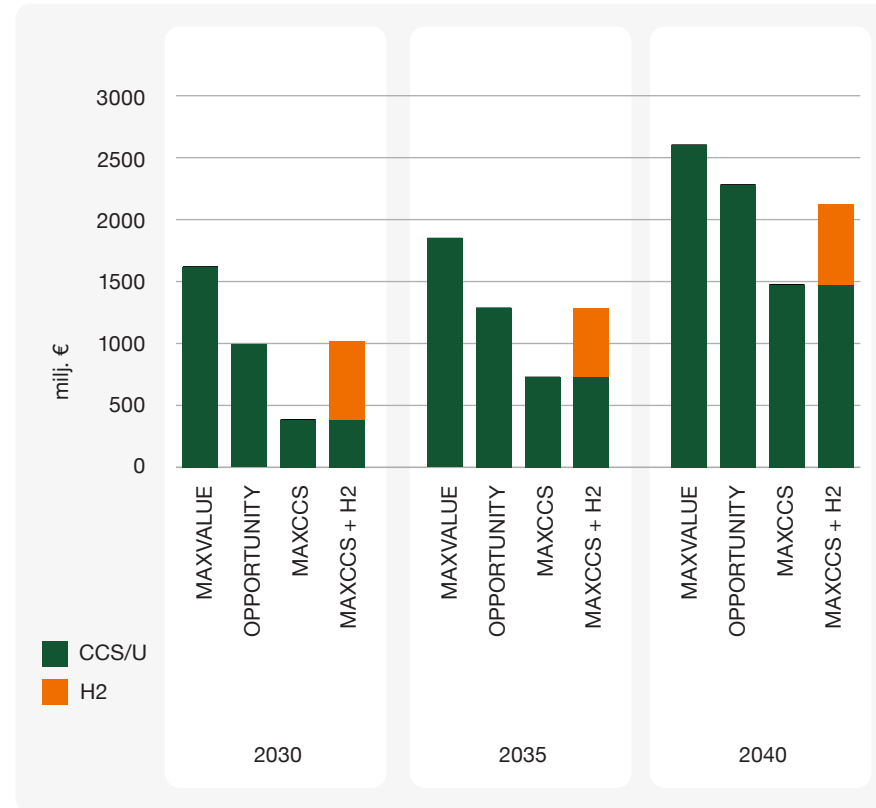
tarvittavat investoinnit kipuavat 14,5 miljardiin euroon MAXVALUE-skenaariossa, 8,5 miljardiin euroon OPPORTUNITY-skenaariossa, 3 miljardiin euroon MAXCCS-skenaariossa ja 8,5 miljardiin euroon MAXCCS+H2-skenaariossa. Uusiutuvan sähkön vuosittaiset kulutukset näissä skenaariossa ovat 53, 29, 6 ja 48 terawattituntia.

Vuonna 2035 bioperäisen hiilidioksidin käyttömäärän tuplaantuessa 10 miljoonaan tonniin vastaavat syntyvät arvonlisät ovat 1,8 miljardia, 1,3 miljardia, 0,7 miljardia euroa ja 1,3 miljardia euroa MAXVALUE-, OPPORTUNITY-, MAXCCS- ja MAXCCS+H2-skenaariossa. MAXVALUE-skenaariossa tuotetaan 1,6 Mt vetyä, josta jalostetaan hiilidioksidin kanssa 1,5 Mt kerosiinia, 1,0 Mt e-bensiiniä ja 0,6 Mt polyoleja. MAXCCS-skenaariossa oletetaan, että hiilidioksidista 9,5 Mt menee geologiseen varastointiin ja 0,5 Mt menee mineralisointiin. OPPORTUNITY-skenaariossa varastoidaan 5 Mt geologisesti. Vaikka



MAXVALUE-skenaariossa hiilidioksidin hyödyntäminen kaksinkertaistuu, arvonlisän kasvu on suhteellisesti maltillisempaa. Tämä johtuu laskelmassa oletetusta teknisestä kehityksestä, joka alentaa investointikustannuksia ja siten myös tuotteiden hintoja huomattavasti (ks. Liite 2, taulukko L2.3). Tarvittavat kumulatiiviset investoinnit nousisivat 23, 14,5, 6 ja 14 miljardiin euroon vastaavasti. Sähkönkulutukset näissä skenaariossa ovat 104, 58, 12 ja 93 terawattituntia.

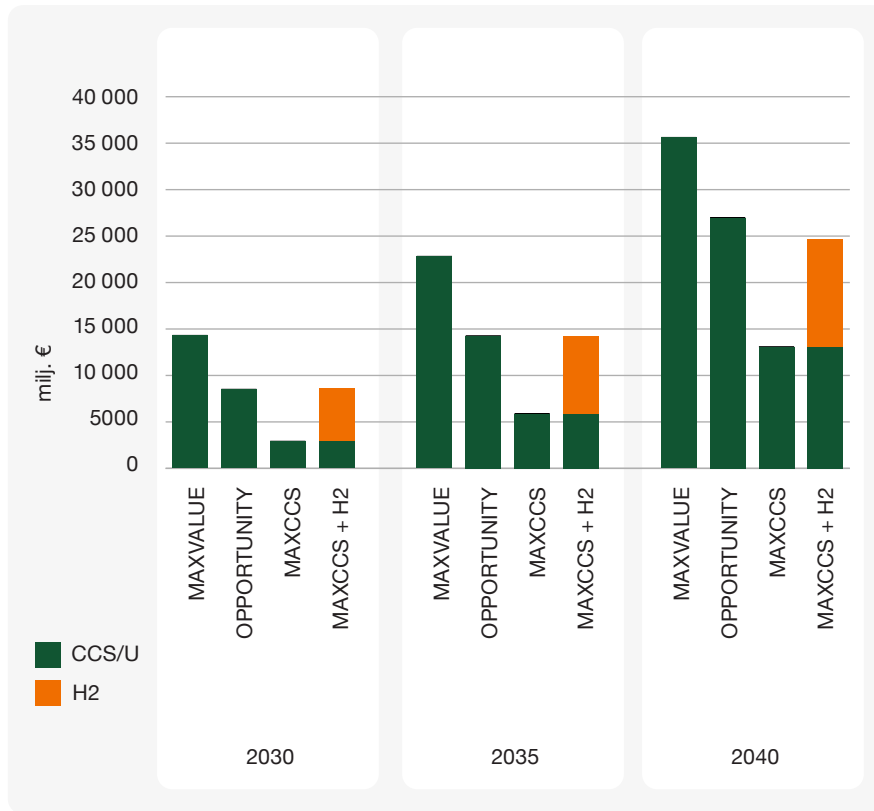
Vuonna 2040 bioperäisen hiilidioksidin käytön ollessa jo 20 miljoonaa tonnia vuodessa, arvonlisät nousevat 2,6 miljardiin, 2,3 miljardiin, 1,5 miljardiin euroon ja 2,1 miljardiin euroon MAXVALUE-, OPPORTUNITY-, MAXCCS- ja MAXCCS+H2-skenaariossa. MAXVALUE-skenaariossa tuotetaan 3,2 Mt vetyä, josta jalostetaan 2,8 Mt kerosiinia, 1,9 Mt e-bensiiniä ja 1,4 Mt polyoleja. MAXCCS-skenaariossa oletetaan, että hiilidioksidista 18 Mt menee geologiseen varastointiin ja 2 Mt menee mineralisointiin. OPPORTUNITY-skenaariossa varastoidaan 4,5 Mt geologisesti ja 0,5 mineralisoimalla. Tarvittavat kumulatiiviset investoinnit olisivat 35,5, 27, 13 ja 24,5 miljardia euroa vastaavasti. Sähkönkulutukset näissä skenaariossa ovat 205, 156, 25 ja 185 terawattituntia.



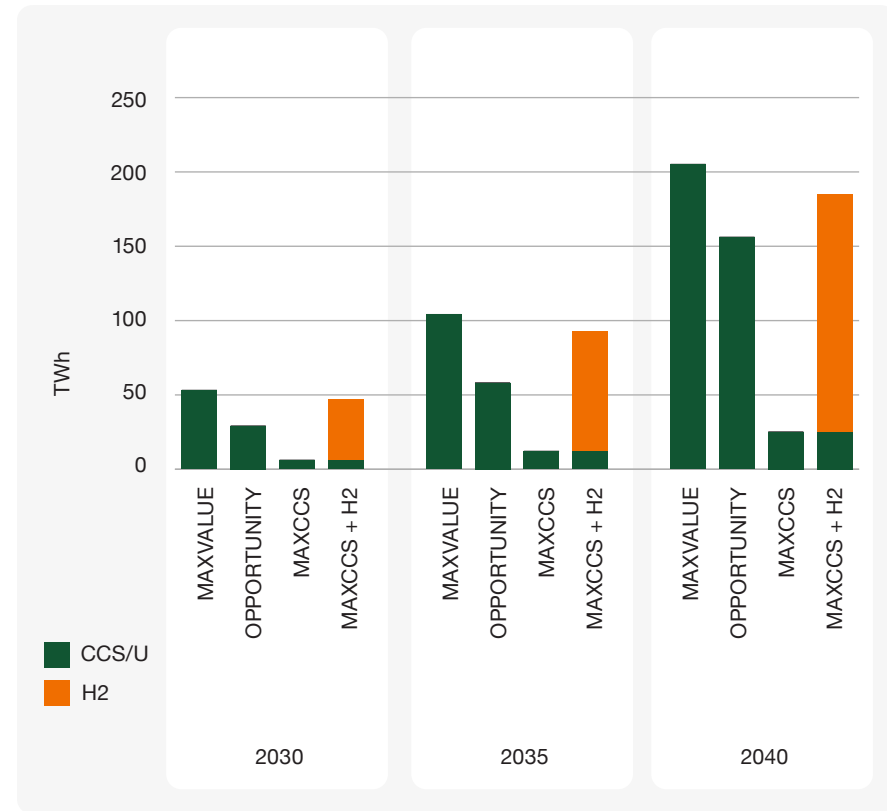
Kuva 7. Vuotuiset arvonlisäykset skenaarioissa. Peruslaskelmassa voittomarginaali on 0 prosenttia.

Eri skenaarioita vertaamalla voidaan tehdä havaintoja hiilidioksidin hyötykäyttöpainotteen ja hiilidioksidin varastointipainotteen kehityksen välillä. Samoin nähdään, kuinka merkittävän osan taloudellisesta

toiminnasta vety muodostaa. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi vaatii hyötykäyttöön verrattuna hiilidioksiditonta kohden selvästi vähemmän investointeja, sähköä ja muitakin kuluja. Näin ollen myös perustapauksessa



Kuva 8. Kumulatiiviset investoinnit eri skenaarioissa (milj. €).



Kuva 9. Vuotuinen sähkönkulutus skenaarioissa (TWh).

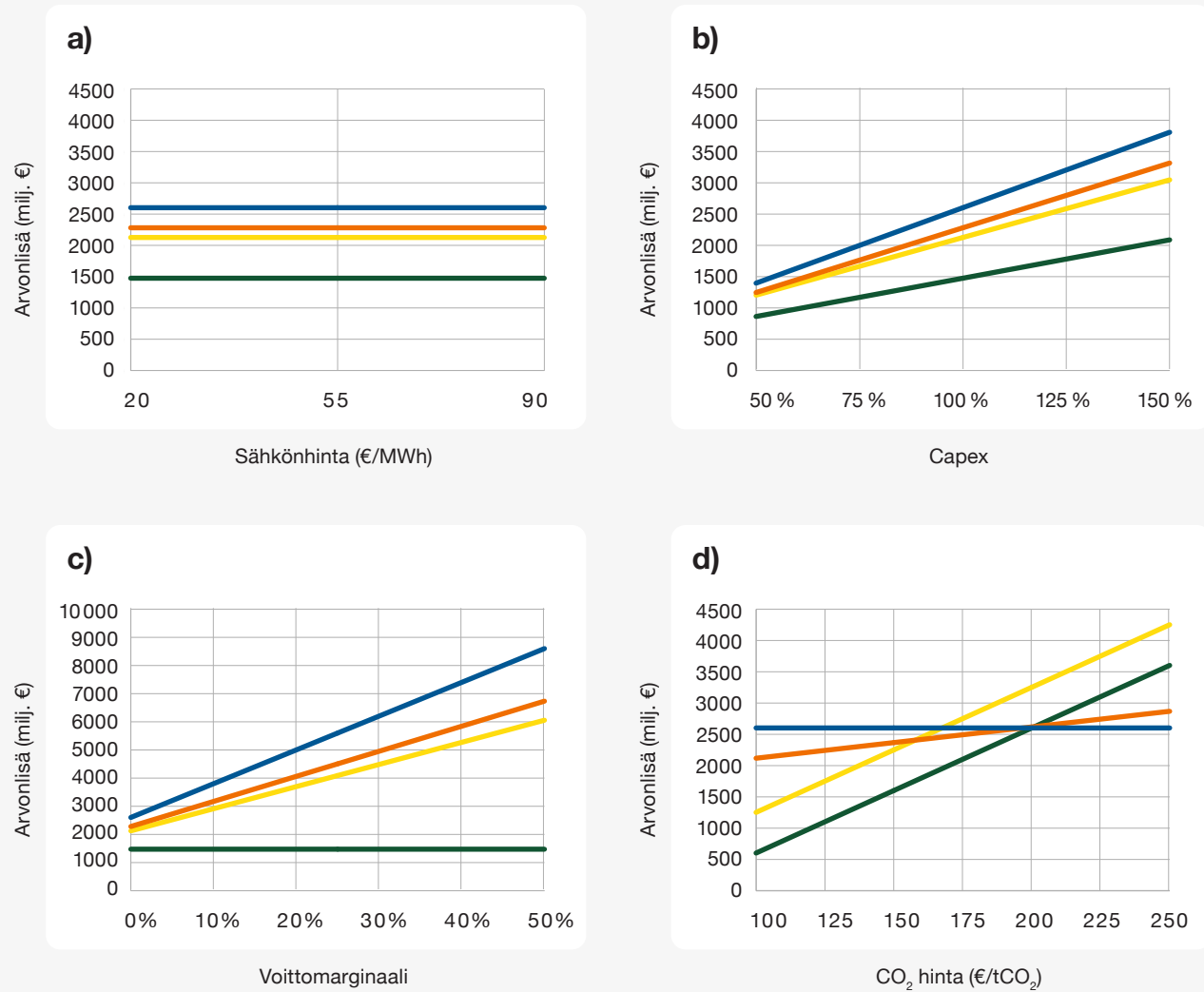
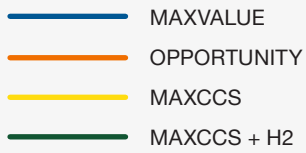
kustannusperusteisesti laskettu arvonlisä on MAXCCS-skenaariossa myös selvästi muita skenaarioita matalampi. Tuotettujen hyödykkeiden arvon vaikutusta arvonlisään eri skenaarioissa tarkastellaan herkkyystarkasteluissa voittomarginaalin ja hiilidioksidin

varastoinnista saatavan korvauksen perusteella.

5.2 Herkkyystarkastelut

Edellä esitetyt tulokset perustuvat lukuisiin oletuksiin tuotantoteknologiasta ja

-kustannuksista. Siksi on tarpeellista tehdä herkkyystarkastelua keskeisten tekijöiden suhteen. Näistä merkittävimpiä ovat sähkön hinta, pääomakustannukset, voittomarginaali/kate ja CCS:n tapauksessa hiilidioksidin varastoinnista maksettava korvaus. Herk-



Kuva 10. Arvonlisän herkkyys oletuksille (a) sähkön hinnasta, (b) pääomakustannuksista, (c) voittomarginaalista ja (d) hiilidioksidin varastoinnista maksettavasta hinnasta.

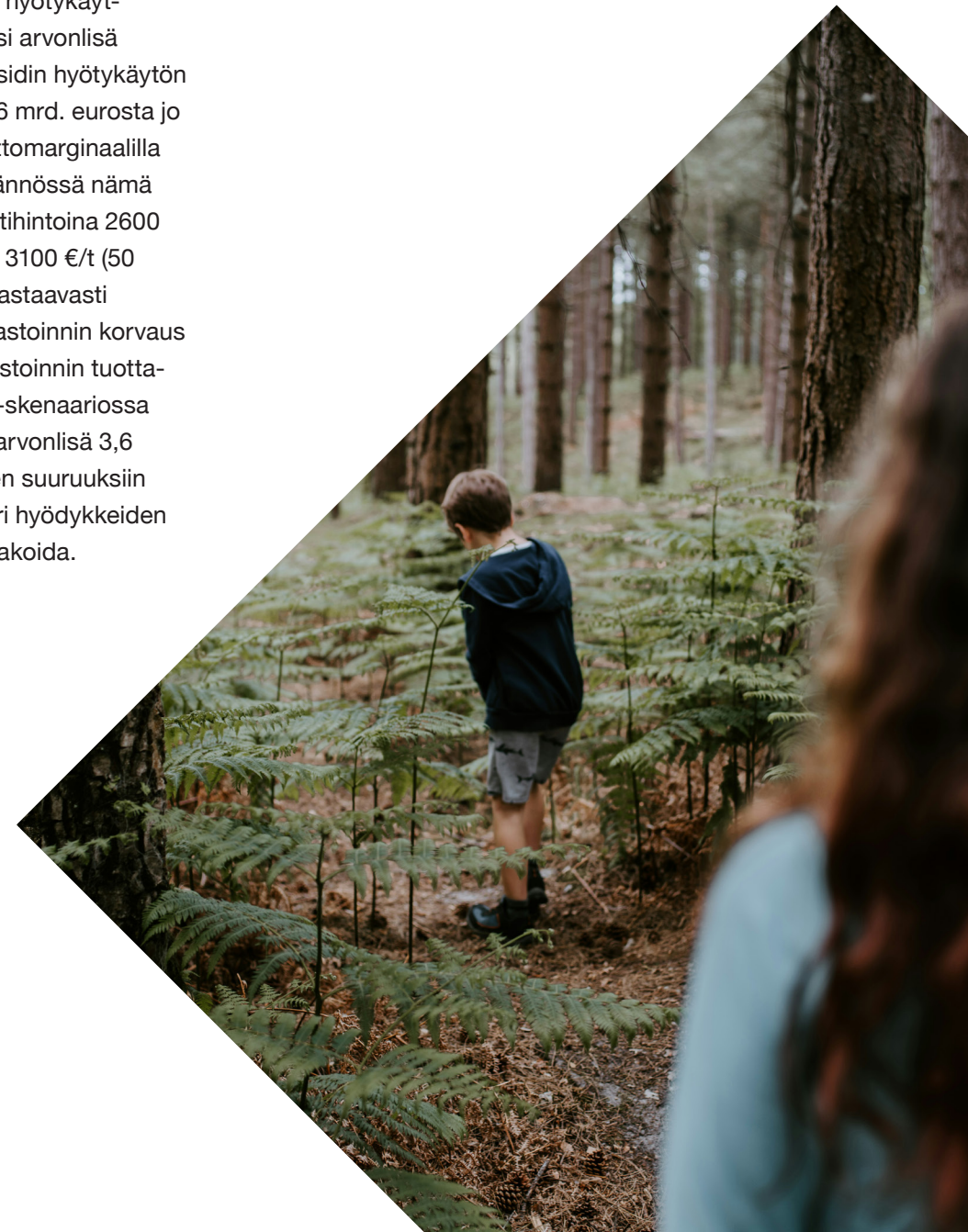
kyystarkasteluiden lähtökohtana on peruslaskelman vuoden 2040 oletukset ja tulokset. Käytettävän hiilidioksidin määrä on siis 20 Mt/a ja arvonlisän perustaso on vuoden 2040 tasolla.

Sähkön hinta vaikuttaa tuotteiden hintoihin, mutta katteen ollessa 0 % ei lainkaan arvonlisäykseen (Kuva 10 (a)). Näin siksi, että ilman voittomarginaalia arvonlisäys on pääoma- ja työvoimakustannusten summa, johon sähkökustannukset eivät vaikuta. Sähkön hinta vaikuttaa sen sijaan merkittävästi tuotantokustannuksiin ja niihin perustuviin tuotteiden hintoihin vaikuttaen merkittävästi tuotannon arvoon.

Pääomakustannuksen vaikutus tuotteiden hintoihin ja arvonlisään on suoraviivainen: pääomakustannusten kasvu johtaa sekä kustannusperusteisten hintojen että arvonlisän kasvuun (Kuva 10 (b)). Erot skenaarioiden välillä johtuvat eroista hiilidioksidin hyötykäytön ja varastoinnin erilaisista pääomakustannuksista.

Suurimmat vaikutukset arvonlisiin on tuotteista maksetuilla hinnoilla. Hiilidioksidin hyötykäytön tapauksessa tätä tarkastellaan voittomarginaalin kautta (Kuva 10 (c)) ja bioperäisen hiilidioksidin varastoinnin osalta

hiilidioksidin varastoinnista maksettavan korvauksen kautta (Kuva 10 (d)). Mikäli voittomarginaali hiilidioksidin hyötykäyttötuotteille olisi 25 %, kasvaisi arvonlisä vuonna 2040 täyden hiilidioksidin hyötykäytön MAXVALUE-skenaariossa 2,6 mrd. eurosta jo 5,6 mrd. euroon, ja 50 % voittomarginaalilla peräti 8,6 mrd. euroon. Käytännössä nämä vastaisivat e-kerosiinien myyntihintoina 2600 €/t (25 % voittomarginaali) ja 3100 €/t (50 % voittomarginaali) tasoja. Vastaavasti bioperäisen hiilidioksidin varastoinnin korvaus vaikuttaa huomattavasti varastoinnin tuottamaan arvonlisään. CCSMAX-skenaariossa hintatasolla 250 €/tCO₂ olisi arvonlisä 3,6 Mrd. €. Merkittävien arvonlisien suuruuksiin vaikuttava muuttuja on siis eri hyödykkeiden hintataso, jota on vaikea ennakoida.



6. Keskustelua

Resurssiviisaus on kiinteä osa suomalaista biotaloutta. Ottamalla talteen ja hyödyntämällä bioperäistä hiilidioksidia voidaan parantaa metsätalouden resurssitehokkuutta. Skenaarioissa otetaan talteen 20 Mt/a bioperäistä hiilidioksidia vuoteen 2040 mennessä, josta hiilen osuus olisi noin 5,5 Mt/a, mikä olisi merkittävä lisäys resurssitehokkuuteen ja raaka-ainevirtoihin.

Skenaarioissa lasketut arvonlisät kasvavat valituilla laskentaparametreilla sitä mukaan kuin bioperäisen hiilidioksidin käyttömäärät kasvavat. Eri skenaarioita vertailtaessa on päätettävä siitä, mitä tavoitteita ja prioriteetteja pidetään kulloinkin tärkeimpinä. Esimerkiksi, jos painotetaan arvonlisäystä ja investointeja, MAXVALUE-skenaario näyttäisi tuottavan suurimman hiilidioksidin pohjautuvan talouden. Jos taas tavoitteena on minimoida sähkönkulutus ja painottaa teknologisia hiilinieluja, MAXCCS-skenaario olisi tehokkain. OPPORTUNITY-skenaario on

kahden edellisen hybridi.

On huomionarvoista, että MAXCCS+H₂-skenaario tuottaa huomattavan suuren arvonlisän kunakin tarkasteluvuonna MAXVALUE- ja OPPORTUNITY-skenaarioihin verrattuna. MAXCCS-skenaarioissa tuotetaan 5, 10 ja 20 Mt/a teknologiset hiilinielut vuosina 2030, 2035 ja 2040. Kuten herkkyystarkastelu osoitti, hiilen varastoisesta saatavalla hinnalla on ratkaiseva merkitys MAXCCS-skenaariotuloksiin ja kannattavuuteen. On mielenkiintoista nähdä, millaiseksi hiilen hinta tulee kehittymään, kuinka bioperäisen hiilidioksidin varastointia tullaan kehittämään ja säätelemään tulevina vuosina sekä kuinka kannattavaksi tämä ohjaus ja säätely tämän reitin lopulta tekee.

Herkkyystarkastelussa oletettu enimmäisarvo 250 €/tCO₂ hiilidioksidin poistolle vastaa karkeasti nykyisillä vapaaehtoismarkkinoilla maksettua hintatasoa. Näistä markkinoista

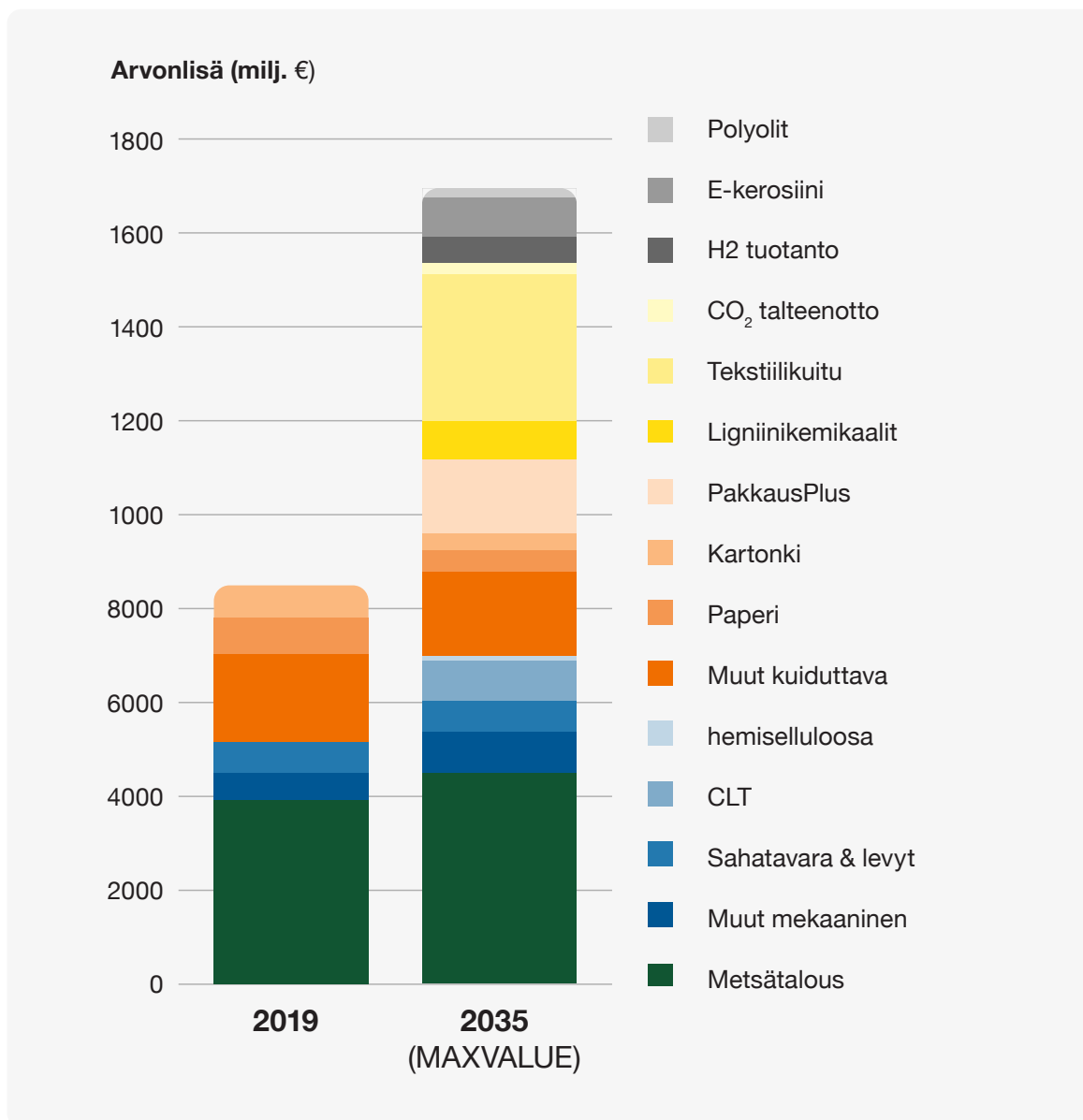
saatavan erittäin rajallisen julkisen kauppätiedon perusteella BECCS:n avulla tuotetuista hiilenpoistoista on maksettu vuonna 2023 n. 300 €/tCO₂.³⁶ On helppoa todeta, että ilman toimijoille kaupallista kannattavuutta tämä reitti ei tule toteutumaan. Toistaiseksi rahallista kannustinta bioperäisen hiilidioksidin varastoinnille ei vielä EU:ssa ole, mutta tämän kaltaisia mekanismeja ollaan parhaillaan luomassa.

Bioperäisen hiilidioksidin talteen ottaminen ja erityisesti hyödyntäminen on erittäin energiaintensiivistä. Vuonna 2023 Suomessa tuotettiin sähköä 78 TWh (Energiateollisuus, 2024).³⁷ Tähän nähden bioperäisen hiilidioksidin hyödyntäminen eri skenaarioissa vaatisi huomattavan määrän lisää sähköä, n. 2–3 kertaisesti Suomen koko nykyiseen sähköntuotantoon verrattuna, vuoteen 2040 mennessä kaikissa muissa skenaariossa, paitsi MAXCCS-skenaariossa, jonka sähkönkulutus olisi 25 TWh vuonna 2040.

Viimeaikaisten selvitysten mukaan³⁸ näin suuren uusiutuvan sähkön tuotantomäärän lisäys (pääasiassa perustuen tuulivoimaan) voidaan arvioida olevan realistinen, mutta tarvittavat uusiutuvan sähkön lisäinvestoinnit vaativat sitoumuksia sähkön hankintaan vedyn ja P2X/CCU-tuotteiden tuotantoon investoilta tahoilta.

Tarvittavien investointien suuruus voi siis rajoittaa skenaarioiden toteutumista. Metsäsektorin investoinnit vuosina 2017–2021 ovat olleet n. 1 500 M€/vuosi (Metsäteollisuus ry, 2023). Hiilidioksiditalouden arvioidut kokonaisinvestoinnit eri skenaarioissamme olivat 13–36 miljardia euroa vuoteen 2040 mennessä. Jos investointeja aloitetaan tekemään tasaisesti vuodesta 2025 alkaen, tarvittaisiin uusia investointeja 900–2 400 M€/vuosi skenaariosta riippuen bioperäisen hiilidioksidin talteenottoon ja kuljetukseen, elektrolyysereihin sekä jatkojalostuslaitteisiin sähköpolttoaineiksi.

Suomen hiilineutraalisuus ja biotalousstrategian tavoitteiden saavuttamisen kannalta bioperäisestä hiilidioksidista voidaan saada huomattava apu. MAXCCS-skenaariossa vuonna 2035 tuotettiin 10 Mt kokoinen teknologinen hiilinielu sekä 0,7 miljardin arvonlisä.



Kuva 11. Talteen otetun hiilidioksidin hyödyntämisen vaikutus metsäsektorin arvonlisäyksen.

MAXVALUE-skenaariossa 10 Mt/a hiilidioksidin jalostuksen kautta saatava arvonlisä vuonna 2035 olisi 1,8 miljardia euroa. Tämä olisi 18 % kuiduttavan teollisuuden 10 miljardin arvonlisän nousun tavoitteesta. Jos tämä sijoitetaan Luken aiempaan laskelmaan (Kuva 3), niin hiilidioksidin jalostamisen voidaan ajatella vähentävän muiden jatkojalostettujen tuotteiden, kuten uusien tekstiilikuitujen, tuotantomäärien tarvetta Suomen biotalousstrategian tavoitetta täytettäessä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 11.

Toisin sanoen, muita uusia tuotteita voitaisiin tuottaa vähemmän, ja silti saavuttaisimme arvonlisätavoitteen. Edelleen tätä voidaan tulkita myös niin, että puun saatavuuden vähentyessä syystä tai toisesta, olisi biotalousstrategian mukainen arvonlisän tuplaaminen tällöin mahdollista hyödyntäen bioperäistä hiilidioksidia.

Kun eri skenaarioita vertaillaan, MAXC-CS-skenaariossa saataisiin pienimmillä investoinneilla aikaan suurin päästövähennys. Kustannuksia syntyisi myös vähiten, mutta toisaalta tästä johtuen arvonlisä olisi myös merkittävästi pienempi – ellei sen lisäksi tuotettaisi myös uusiutuvaa vetyä.



7. Yhteenveto

Johtopäätös 1: Hiilidioksiditalous lisäisi metsäteollisuuden resurssitehokkuutta.

Metsäsektorin tuottama arvonlisä kansantalouteen jalostettua puukuutiometriä kohden on pienentynyt huomattavasti paperin kultakauden jälkeen. Tällä hetkellä suuri osa puun hiilestä katoaa sananmukaisesti savuna taivaalle hiilidioksidin muodossa. Yksi mielenkiintoinen keino parantaa metsäsektorin resurssitehokkuutta ja nostaa sen tuottamaa arvonlisää lisäämättä hakkuumääriä olisi siirtymä hiilidioksiditalouteen. Tämä tarkoittaisi metsäteollisuuden tuottaman bioperäisen hiilidioksidin sisältämän hiilen hyödyntämistä joko jatkojalostuksen raaka-aineena tai varastointia.

Bioperäisen hiilidioksidin jalostaminen korvaamaan fossiilisia tuotteita voi vähentää huomattavasti kasvihuonekaasupäästöjä. Hiilidioksidin jalostaminen tuotteiksi vaatii kuitenkin erittäin paljon vähäpäästöistä

sähköä. Suomessa bioperäistä hiilidioksidia riittää sekä varastointiin että hyötykäyttöön.

Johtopäätös 2: Hiilidioksidin hyötykäyttö voi luoda merkittävää arvonlisää.

Aiemmissa metsäsektorin arvonlisää käsittelevissä raporteissa ei ole käsitelty hiilidioksiditaloutta eli bioperäiseen hiilidioksiidiin liittyviä mahdollisuuksia arvonlisän luonnissa. Tässä työssä arvioimme bioperäisen hiilidioksidin olevan potentiaalinen arvonlisän lähde sekä jatkojalosteiden raaka-aineena että varastoituna tuotteena. Arvonlisän suuruus riippuu ennen kaikkea tuotettujen hyödykkeiden markkinahinnasta, hiilidioksidimäärän ollessa skenaarioiden välillä sama. Uusiutuvan vedyn kanssa jatkojalostettuna bioperäisten hiilidioksidituotteiden arvonlisä voisi kasvaa 2,6 miljardiin euroon (voittomarginaali 0 %) vuoteen 2040 mennessä MAXVALUE-skenaarioissa, olettaen että metsäsektorin vuotuiset 20 miljoonan

tonnin bioperäisten hiilidioksidipäästöt hyödynnetään ja näillä jalostustuotteilla on markkinakysyntää.

Vuonna 2035 arvioimme arvonlisäpotentiaaloin olevan 1,8 miljardia, jos metsäsektorin tuottamasta bioperäisestä hiilidioksidimäärästä käytettäisiin puolet eli 10 miljoonaa tonnia vuodessa. Tällä arvonlisällä olisi merkittävä vaikutus kansallisen biotalousstrategian tavoitteiden saavuttamiseen. Herkkyystar-kastelujen valossa arvonlisä voisi nousta suuremmaksikin. Arvonlisä olisi MAXVALUE-skenaariossa 8,6 miljardia vuonna 2040, mikäli voittomarginaali nousisi esimerkiksi 50 prosenttiin.

Johtopäätös 3: Bioperäinen hiilidioksidi on vetytalouteen liittyvä kansallinen vahvuutemme.

Fossiilisen öljyn korvaavat sähköpolttoaineet ovat vetytalouden jatkojalosteita. Bioperäisestä hiilidioksidista voidaan valmistaa

uusiutuvan vedyn avulla esimerkiksi sähköpolttoaineita lentoliikenteen käyttöön. Sähköttoaineista e-lentopolttoaineiden markkinan odotetaan aukeavan tulevina vuosikymmeninä EU:ssa johtuen regulaatioiden (ReFuelEu Aviation) ohjausvaikutuksesta. Merkittävintä bioperäisen hiilidioksidin kysynnän kannalta on fossiilisen hiilidioksidin käytön kielto RFNBO-polttoaineissa päästökaupan piirissä olevilta sähköntuotantolaitoksilta kaapattuna vuoden 2035 jälkeen sekä kaikista päästökaupan piirissä olevista päästölähteistä vuoden 2040 jälkeen. Suuresta bioperäisen hiilidioksidin tuotantomäärästä johtuen Suomesta voisi tulla merkittävä e-kerosiininviejä. Lisäksi merkittävää RFNBO-polttoaineiden tarvetta odotetaan olevan FuelEU Maritime -regulaation ohjaamassa meriliikenteessä.

Johtopäätös 4: Varastointi on vähiten investointeja vaativa vaihtoehto bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämiseen.

Ilmastonmuutoksen vastaisessa taistelussa fossiilisten raaka-aineiden korvaaminen uusiutuvilla on tehtävä pikimmiten. Samaten, Suomen ja EU:n ilmastoneutraalustavoitteet vaativat sekä teknologisten että luonnon hiilinielujen vahvistamista. Bioperäisen hiilidioksidin varastointi vaatii vähiten inves-

tointeja ja sähköä hiilidioksiditonnia kohden. Syntyvän nielun lisäksi teknologisten hiilinielujen luomisen arvonlisäpotentiaali on merkittävä, mutta se riippuu olennaisesti bioperäisen hiilidioksidin varastoinnista maksettavasta korvauksesta. Arvioituihin kustannuksiin pohjautuen 150 euroa hiilidioksiditonnilta korvauksella arvonlisä voisi nousta 0,7 miljardiin euroon vuoteen 2035 mennessä jos 10 miljoonaa tonnia bioperäistä hiilidioksidia varastoitaisiin vuosittain. Vuonna 2040 potentiaali voi olla jopa 1,5 miljardia euroa jos vuosittain 20 miljoonaa tonnia bioperäistä hiilidioksidia varastoitaisiin. Sen sijaan arvonlisä voisi olla vuonna 2040 jopa 3,6 miljardia, mikäli bioperäisen hiilidioksidin varastoinnista saatava korvaus olisi 250 euroa hiilidioksiditonnilta.

Johtopäätös 5: Hiilidioksiditalous ei toteudu ilman kunnianhimoista ilmastopolitiikkaa.

Hiilidioksidin talteenotto-, varastointi- ja hyödyntämisteknologiat ovat vielä tällä hetkellä erittäin kalliita, osin kehitysvaiheessa ja energiantensiivisiä. Tulevien vuosien haasteena on saada näistä teknologisesti kypsiä ja taloudellisesti kannattavia. Hiilidioksidi on kuitenkin kustannustehokkaampaa kaapata savukaasusta kuin suoraan ilmasta.

Skenaariossamme investointien rahallinen arvo vaihteli 13–36 miljardin euron haarakassa vuoteen 2040 mennessä, eli kyse on erittäin suuresta investointitarpeesta. Onko Suomi riittävän kilpailukykyinen maa kilpailemaan näistä investoinneista?

EU-regulaatio näyttäisi jo rakentavan e-polttoainemarkkinaa. Onkin mielenkiintoista nähdä, kuinka bioperäisen hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia tullaan kehittämään ja sääntelemään tulevina vuosina. Kehitykseen vaikuttaa se, kuinka korkealla varastoitavan hiilen hinta nousee eli kuinka kannattavaksi ohjaus ja sääntely tämän vaihtoehdon lopulta tekee. Ilman kaupallista kannattavuutta tämänkään vaihtoehdon on vaikea nähdä toteutuvan.

Uusien ratkaisujen soveltamisessa kannattaa pitää mielessä teknologiakehityksen ja siihen liittyvien ratkaisujen potentiaali globaaleilla markkinoilla. Jos Suomessa onnistutaan kehittämään teknologioita ja palveluita globaalin murroksen tarpeeseen, sen kansantaloudellinen arvonlisä ja globaali hiilikädenjälki, joita tämän työn puitteissa ei tarkasteltu, on todennäköisesti erittäin merkittävä. Tämä näkökulma on erittäin tärkeä pitää keskustelussa ja mukana kansallisia toimenpiteitä harkittaessa.

Johtopäätös 6: Toivoa on, onko tarmoa?

Avainkysymys on, saammeko bioperäisestä hiilidioksidista ja vedystä tuotettujen tuotteiden sekä hiilidioksidin varastoinnin arvoketjut ja markkinat syntymään viimeistään 2030-luvulla Suomessa? Onko meillä riittävästi tarmoa vaikuttaa sääntelyyn siten, että resurssiviisaalle hiilidioksiditaloudelle syntyy toimiva markkina korvaamaan fossiilisiin raaka-aineisiin perustuva talous? Varsinkin sähköpolttoaineiden kohdalla kysyntää näyttäisi jo syntyvän vuoden 2030 jälkeen nykyisen EU:n sääntelykehityksen vaikutuksesta. Oleellinen, vielä ratkaisematon osa on, millaiseksi muodostuu teknologisiin hiilinieluihin vaikuttava sääntely.

Olemmeko siis viemässä hiilidioksiditaloutta aktiivisesti edelläkävijänä eteenpäin vai seuraammeko sen kehittymistä passiivisesti taustalla odottaen? Raportin kirjoittajien mielestä olisi sääli, jos Suomesta kehittyisi ainoastaan vetytalouden raaka-ainelähde. Tuottaisimme kyllä puhdasta sähköä ja kenties vihreää vetyäkin, mutta sen jatkojalostus tuotteiksi tapahtuisi muualla. Mielestämme meidän pitäisi panostaa kansallisesti hiilidioksiditalouteen käsi kädessä vetytalouden kanssa. Toivomme, että Suomeen rakentuisi uusiutuvan energian ja

vetytalouden ympärille merkittävä arvonlisää luova klusteri, joka hyödyntäisi bioperäistä hiilidioksidia jatkojalostuksen raaka-aineena tai varastoinnin kautta hiilinieluna. Bioperäistä hiilidioksidia riittää Suomen mittakaavassa sekä hyötykäytön tarpeisiin että varastoitavaksi pysyvästi synnyttäen teknologisia hiilinieluja.



Liite 1: Laskennan toteutus

Yksikkötuotantokustannukset voidaan esittää muodossa

$$C_U = \sum_i p_i x_i + C_L + C_{NL},$$

missä p_i on panoshinta ja x_i on tuotantopanosen määrä yhtä tuotettua päätuoteyksikköä kohden. Loput yksikkökustannukset on jaettu työvoimakustannuksiin C_L ja muihin yksikkökustannuksiin C_{NL} . Pääomakustannukset tuotettua yksikköä kohden ovat

$$C_K = \frac{uC_I}{s},$$

missä tulo uC_I muodostaa investointikustannuksen C_I vuotuisen tasamaksuerän (annuiteetti) ja tekijä s skaalaa investointikustannukset yhtä tuotettua yksikköä kohden huomioiden mm. kapasiteetin käyttöasteen.

Laskennassa oletetaan, että tarkastellut tuotantolinjat ovat taloudellisesti kannattavia eli saatu hinta kattaa yksikkökohtaiset tuotanto- ja pääomakustannukset. Tämä on toteutettu niin, että päätuotteiden hinnat on laskettu kustannusten perusteella:

$$p = \left(C_U + C_K - \sum_j p_j y_j \right) (1 + m),$$

missä taloudellisesti kannattavassa minimihinnassa on huomioitu tuotantoprosessista myytäväksi saatavat muut tuotteet y_j ja niiden myyntitulot $p_j y_j$. Osalle tuotteista on lisäksi määritelty positiivinen voittomarginaali m .

Tuotettua päätuotetta kohden syntyvä arvonlisä V lasketaan, määritelmän mukaisesti, vähentämällä yksikkömyyntituloista yksikköväliuotekustannukset (eli yksikkötuotantokustannukset ilman työvoimakustannuksia):

$$V = p + \sum_j p_j y_j - \sum_i p_i x_i - C_{NL}.$$

Jos päätuotteen voittomarginaali $m=0$, arvonlisä vastaa tuotannon työvoima- ja pääomakustannusten summaa, $V=C_K+C_L$, kuten sen pitääkin. Voittomarginaalin ollessa positiivinen, toimintaylijäämä ylittää laskennassa käytetyt pääomakustannukset ja investoinnin tuotto ylittää tuottovaatimuksen.

Liite 2: Skenaarioiden tulokset lukuina

2030		Arvonlisäys (milj. €)	Investoinnit (milj. €)	Sähkönkulutus (TWh)
	MAXVALUE	1600	14000	55
	OPPORTUNITY	1000	8000	30
	MAXCCS	400	3000	5
	MAXCCS + H2	1000	9000	50
2035		Arvonlisäys (milj. €)	Investoinnit (milj. €)	Sähkönkulutus (TWh)
	MAXVALUE	1800	23000	105
	OPPORTUNITY	1300	14000	60
	MAXCCS	700	6000	10
	MAXCCS + H2	1300	14000	95
2040		Arvonlisäys (milj. €)	Investoinnit (milj. €)	Sähkönkulutus (TWh)
	MAXVALUE	2600	36000	205
	OPPORTUNITY	2300	27000	155
	MAXCCS	1500	13000	25
	MAXCCS + H2	2100	25000	185

Taulukko. L2.1 Skenaario-tulokset peruslaskelmassa. Arvonlisäys ja sähkönkulutus ovat vuotuisia tasoja ja investoinnit ovat kumulatiivinen summa yli ajan.

	MAXVALUE			OPPORTUNITY		
	2030	2035	2040	2030	2035	2040
talteen otettu CO ₂	5000	10000	20000	5000	10000	20000
H2	800	1600	3200	400	800	2400
E-kerosiini	800	1500	2800	400	700	1900
E-bensiini	600	1000	1900	300	500	1300
Polyolit	100	600	1400	100	300	1400
varastoitu CO ₂ geol.				2500	5000	4500
varastoitu CO ₂ miner.						500
	MAXCCS			MAXCCS + H2		
	2030	2035	2040	2030	2035	2040
talteen otettu CO ₂	5000	10000	20000	5000	10000	20000
H2				800	1600	3200
E-kerosiini						
E-bensiini						
Polyolit						
varastoitu CO ₂ geol.	5000	9500	18000	5000	9500	18000
varastoitu CO ₂ miner.		500	2000		500	2000

Taulukko. L2.2. Tuotantomäärät skenaarioien peruslaskelmassa (tuhansia tonneja)

Hinnat (€/t)	2030	2035	2040
H2	3000	2600	2400
E-kerosiini	2700	2300	2100
E-bensiini	2400	2000	1800
Polyolit	2500	2100	1900
Tuotantokustannukset (€/t)	2030	2035	2040
CO ₂ (talteen otto)	90	80	80
CO ₂ (geol. sisämaa)	160	150	150
CO ₂ (geol. rannikko)	140	140	140
CO ₂ (min. sama paikka)	120	110	110
CO ₂ (min. kiveä siirretään)	230	230	230
CO ₂ (min. CO ₂ siirretään)	210	200	200

Taulukko. L2.3. Tarkasteltujen tuotteiden hinnat (€/t) ja hiilidioksidin talteen oton ja varastoinnin tuotantokustannukset (€/t) peruslaskelmassa

Lähteet

- 1 Euroopan Parlamentti, 2023, Mitä hyötyä EU:lle on uusiutuvasta vedystä?, <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20210512S-TO04004/vetyenergian-hyodyt-eu-lle> , ladattu viimeksi: 3.6.2024
- 2 European Commision, 2023, Final adoption of ReFuelEU Aviation completes 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets, https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/final-adoption-refueleu-aviation-completes-fit-55-legislation-putting-eu-track-exceed-2030-targets-2023-10-09_en, ladattu viimeksi 3.6.0224.
- 3 Työ - ja elinkeinoministeriö, 2023, Hallitus hyväksyi periaatepäätöksen vedystä - Suomella edellytykset valmistaa 10 prosenttia EU:n vihreästä vedystä 2030, <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/hallitus-hyvaksyi-periaatepaatoksen-vedysta-suomella-edellytykset-valmistaa-10-prosenttia-eu-n-vihreasta-vedysta-2030>, ladattu viimeksi: 3.6.2024.
- 4 Valtioneuvosto, 2023, Vahva ja välittävä Suomi, Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023, Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165042/Paaministeri-Petteri-Orpon-hallituksen-ohjelma-20062023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 5 Petja Pelli, 2024, Saako Suomi vihreästä siirtymästä hyödyn irti? Sen ratkaisevat lähikaudet, sanoo EK, Helsingin Sanomat. <https://www.hs.fi/talous/art-2000010335190.html>
- 6 Clic Innovation, 2023, Suomesta Euroopan johtava vetytalous – Vetyklusteri julkistaa vetytalousstrategian, Suomesta Euroopan johtava vetytalous – Vetyklusteri julkistaa vetytalousstrategian | CLIC Innovation Oy (sttinfo.fi), ladattu viimeksi 3.6.2024. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/69995413/suomesta-euroopan-johtava-vetytalous-vetyklusteri-julkistaa-vetytalousstrategian?publisherId=69819494&lang=fi>
- 7 Suomen Ilmastopaneeli, 2023, Teknologiset hiilinielut tarjoavat Suomelle mahdollisuuksia – strategian ja kannustimien luominen kiireellistä, <https://ilmastopaneeli.fi/teknologiset-hiilinielut-tarjoavat-suomelle-mahdollisuuksia-strategian-ja-kannustimien-luominen-kiireellista/>, ladattu viimeksi: 3.6.2024.
- 8 Kujanpää, L., Koponen, K., Linjala, O., Mäki-kouri, S., Arasto, A. 2023. Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa. Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2023. <https://ilmastopaneeli.fi/hae-julkaisuja/teknologisten-hiilinielujen-mahdollisuudet-ja-niiden-edistaminen-suomessa/>
- 9 Kujanpää, L., Koponen, K., Linjala, O., Mäki-kouri, S., Arasto, A. 2023. Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa. Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2023. <https://ilmastopaneeli.fi/hae-julkaisuja/teknologisten-hiilinielujen-mahdollisuudet-ja-niiden-edistaminen-suomessa/>
- 10 Teir, S., Arasto, A., Sormunen, R., Jussila-Suokas, Saari, P., 2017, HIILIDIOKSIDIN TALTEEN-OTTO JA VARASTOINTI, CCSP-ohjelman loppuraportti, CCSP_Summary_Report_FIN.pdf (finalreports.fi), viitattu 12.4.2024.
- 11 TEM Toimialaraportit Kaivosala 2023, Vasara, H., Pokki, J., Långbacka, Bo., Kivinen, M. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165277/TEM_2023_4_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y Viitattu 12.4.2024
- 12 Extraction of magnesium from mine tailings for carbon dioxide mineralization: A preliminary study of the effect of ammonium sulfate to tailings ratio on products and yield, Mälkki, M., Mäkikouri, S. <https://doi.org/10.1016/j.hydro-met.2024.106268> Viitattu 12.4.2024.
- 13 Aqueous mineral carbonation of ultramafic material: a pre-requisite to integrate into mineral extraction and tailings management operation, Veetil, S. K. P., Hitch, M. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12481-0> Viitattu 12.4.2024

- 14 A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂, Olajire, A. A. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013> Viitattu 12.4.2024
- 15 Metsäbiotalouden tiedepaneelin asiantuntijalausunto, Eduskunnan maa- ja metsätalousvaliokunta, <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2024-AK-4682.pdf> Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 16 Komissio esittelee keinoja ottaa talteen, varastoida ja hyödyntää hiiltä kestävästi ilmastonneutralisuuden saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä, Euroopan komissio, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/ip_24_585 Viimeksi ladattu 4.6.2024
- 17 EU commission delegated regulation 2023/1185, Euroopan komissio, Delegated regulation - 2023/1185 - EN - EUR-Lex (europa.eu) ladattu viimeksi 4.6.2024
- 18 Current landscape and future of SAF industry, European Union Aviation Safety Agency, Current landscape and future of SAF industry | EASA Eco (europa.eu) Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 19 REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC, Euroopan komissio, eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0562 Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 20 Arvonlisäys, Tilastokeskus, <https://stat.fi/meta/kas/arvonlisays.html> Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 21 Bruttokansantuote, Tilastokeskus, <https://stat.fi/meta/kas/arvonlisays.html> Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 22 Kolmannes biotalouden arvonlisästä tulee metsäsektorilta, LUKE, <https://www.luke.fi/uu-tiset/kolmannes-biotalouden-arvonlisasta-tulee-metsasektorilta> Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 23 Suomi elää metsästä myös 2035 – Keskustelunavaus metsäsektorin arvonlisän kaksinkertaistamiseen, Lintunen, J., Kohl, J., Buchert, J., Asikainen, A., Jyske, T., Maunuksela, J., Lehto, J. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/553146> Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 24 Lankusta lääkkeisiin: tuoteportfolion arvonnoususta uutta arvonlisää metsäsektorille, 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. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-65456-0-8> Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 25 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, Teir, S., Sormunen, R., Saari, P. https://finalreports.fi/wp-content/uploads/2023/12/CCSP_Summary_Report_FIN.pdf Viitattu 12.4.2024
- 26 Visio bioperäisen hiilidioksidin hyödyntämiseksi, Kärki, J. <https://projectsites.vtt.fi/sites/BioCO2/www.vtt.fi/sites/BioCO2/PublishingImages/loppuseminaari-30-8-2018/1.%20K%c3%a4rki.pdf> Viitattu 19.4.2024
- 27 Carbon dioxide use and removal : Prospects and policies, Kujanpää, L., Reznichenko, A., Saastamoinen, H., Mäkikouri, S., Soimakallio, S., Tynkkynen, O., Lehtonen, J., Wirtanen, T., Linjala, O., Similä, L., Keränen, J., Salo, E., Elfving, J., Koponen, K. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-197-1> Viitattu 19.4.2024
- 28 CCU Projects Europe, The European Association dedicated to the conversion of CO₂ into valuable products, <https://database.co2value.eu/projects> Viitattu 19.4.2024
- 29 Facilities Database, Global CCS Institute, <https://co2re.co/FacilityData> Viitattu 19.4.2024
- 30 Carbon dioxide use and removal : Prospects and policies, Kujanpää, L., Reznichenko, A., Saastamoinen, H., Mäkikouri, S., Soimakallio, S., Tynkkynen, O., Lehtonen, J., Wirtanen, T., Linjala, O., Similä, L., Keränen, J., Salo, E., Elfving, J., Koponen, K. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-197-1> Viitattu 19.4.2024
- 31 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2023/2413, Euroopan unioni, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/2413, annettu 18 päivänä lokakuuta 2023, direktiivin (EU) 2018/2001, asetuksen (EU) 2018/1999 ja direktiivin 98/70/EY muuttamisesta uusiutuvi- sta lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisen Viimeksi ladattu 4.6.2024
- 32 EU commission delegated regulation 2023/1184, Euroopan komissio, Publications Office (europa.eu) Ladattu viimeksi 4.6.2024
- 33 Pasquier, L. C., Mercier, G., Blais, J. F., 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>
- IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-295-6
- Parkhi, A., Cremaschi, S., & Jiang, Z. (2022). Techno-economic analysis of CO₂ capture from pulp and paper mill Limekiln. *IFAC-PapersOnLine*, 55(7), 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.458>

- Martin, J., Neumann, A., & Ødegård, A. (2023). Renewable hydrogen and synthetic fuels versus fossil fuels for trucking, shipping and aviation: A holistic cost model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186, 113637. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113637>
- 34 Hiilivetyjen reformointi sähköreaktorissa, Levo, L. <https://www.theseus.fi/handle/10024/496560> Viimeksi ladattu 4.6.2024
- Mass transfer efficiency for CO₂ capture using soda solutions, Narayanasamy, M. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/163424> Viimeksi ladattu 4.6.2024
- Modelling atomic layer deposition overcoating formation on a porous heterogeneous catalyst, Heikkinen, N., Lehtonen, J., Kesiväli, L., Yim, J., Shetty, S., Ge, Y., Reinikainen, M., Putkonen, M. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/11106.1639ecst> Viimeksi ladattu 4.6.2024
- Electrofuel Concept of Diesel and Oxygenate Fuels Reduces Engine-Out Emissions, Aakko-Saksa, P., Järvinen, A., Karppanen, M., Koponen, P. et al. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-24-0090/> Viimeksi ladattu 4.6.2024
- 35 List of publications in BECCU project, <https://www.beccu.fi/publications/>, Viimeksi ladattu 4.6.2024
- 36 Trending on Track? - CDR.fyi 2023 Year in Review, CDR.fyi, <https://www.cdr.fyi/blog/2023-year-in-review>, Viimeksi ladattu 4.6.2024
- 37 Sähkövuosi 2023: Puhdas sähköntuotanto kasvoi, päästöt ja hinnat romahtivat, *Energiateollisuus*, Sähkövuosi 2023: Puhdas sähköntuotanto kasvoi, päästöt ja hinnat romahtivat - *Energiateollisuus* Viimeksi ladattu 4.6.2024
- 38 Pre-study on transition to hydrogen economy, specifically in Northern Ostrobothnia, Kiviranta, K., Hopsu, J., Kanto, T., Saarikoski, A., Kärki, J., Lehtonen, J. Pre-study on transition to hydrogen economy, specifically in Northern Ostrobothnia (vtt.fi) Viimeksi ladattu 4.6.2024.



Yhteystiedot

Antti Arasto

energia- ja vetytutkimuksen johtaja, VTT
antti.arasto@vtt.fi

Jani Lehto

Biotalous ja ympäristö
-yksikön johtaja, Luke
jani.lehto@luke.fi

