

Esiselvityksen ensimmäinen versio

osat 11 / 11

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>SISÄLLYSLUETTELO</b>	<b>1</b>
1 Johdanto	3
2 Kirjallisuuskatsaus aiempiin selvityksiin	4
2.1 Puun kiertotalouden merkitys ja tavoitteet	5
2.2 Puujätevirrat ja niiden hyödyntäminen	5
2.3 Kierrätetyn puun soveltuvuus ja markkinapotentiaali	6
2.4 Taloudelliset ja operatiiviset edellytykset	7
2.5 Keskeiset suositukset ja jatkotutkimustarpeet	7
2.6 Yhteenveto	7
3 Haastatteluaineiston esittely	8
4 Tavoitetila	9
5 Rakennuksista purettavan puun käytön nykytila	11
6 Kuilu tavoitetilaan pääsemiseksi	15
7 Onnistumisen keinot	18
7.1 Prosessien sopeuttaminen	18
7.2 Black Box -vaihe	20
7.3 Hinta	23
7.4 Potentiaaliset tuotokset	23
7.5 Teknologiat	25
8 Skenaariot/polut	33
8.1 Kierrätyspuun integrointi rakennusalan kiertotalouteen	37
8.2 Matalalla roikkuvat hedelmät	38
8.3 Teknologiapolku	41
9 Analysointi	43
9.1 Liiketoiminnan edellytykset ja mahdollisuudet	43
9.2 Arvoketjussa tarvittavat toimijat	45
9.3 Teknologia	47
9.4 Ekologiset ja ympäristölliset vaikutukset kierrätyspuun hyödyntämisessä	48
10 Johtopäätökset	49
11 Jatkotutkimuskysymykset	52
12 Liitteet	54

# 1 Johdanto

Tässä esiselvityksessä tarkastellaan kierrätyspuun jatkojalostusta ja uusiokäyttöä puutuoteteollisuudessa. Selvityksen tarkoituksena on kartoittaa nykytilaa, tunnistaa mahdollisia kehityskohteita ja ehdottaa toimenpiteitä tavoitetilan saavuttamiseksi. Esiselvitys on jaettu osiin, jotka käsittelevät eri näkökulmia ja tarjoavat kokonaisvaltaisen kuvan aiheesta.

Esiselvityksen ensimmäisessä osassa esitellään käytetyt menetelmät. Menetelmissä kuvataan tiivillä kirjallisuuskatsauksella aiempien selvitysten keskeiset tulokset ja huomiot, jotka taustoittavat ja perustelevat tarvetta saada lisäymmärrystä kierrätyspuun jalostusprosesseista käytännön tasolla. Pääasiallisena aineistona esiselvityksessä käytetään kattavaa haastatteluaineistoa, joka toteutettiin eri kierrätyspuun prosessoinnin arvoketjuun kuuluvien toimijoiden kanssa.

Menetelmien jälkeen kuvataan hankkeen asettamaa tavoitetilaa, jossa määritellään, millainen olisi optimaalinen tilanne kierrätyspuun uusiokäytölle puutuoteteollisuudessa. Tavoitetilan jälkeen esitellään myös nykytilan kuvaus, joka tarjoaa ajankohtaisen kuvan alan tilanteesta, käytettävistä menetelmistä ja kohdatuista haasteista kierrätyspuun prosessoinnissa. Tavoitetilan ja nykytilan välinen kuilu analysoidaan yksityiskohtaisesti, ja pohditaan, mitä kehitystoimia tarvitaan, jotta tavoitetilaan päästäisiin.

Tämän jälkeen tarkastellaan onnistumisen keinoja ja toimenpiteitä, joilla tavoitetilaan voidaan päästä. Esiteltyt skenaariot hahmottelevat eri polkuja, jotka voisivat johtaa menestyksekkääseen siirtymiseen kohti kierrätyspuun tehokkaampaa uusiokäyttöä. Erilaiset skenaariot arvioivat esimerkiksi teknologisia, taloudellisia ja yhteistyöperusteisia ratkaisuja.

Seuraavassa osassa keskitytään tarkempaan analyysiin liiketoiminnallisesta näkökulmasta. Tämän osion aikana käsitellään eri toimijoiden roolit ja vastuut, teknologian merkitys sekä liiketoiminnan mahdollisuudet ja haasteet kierrätyspuun jalostuksessa. Erilaiset toimijat, kuten puutuoteteollisuuden valmistajat, purkupalvelut ja kierrätyksestä vastaavat tahot, tuodaan esiin ja heidän yhteistyömahdollisuuksiaan arvioidaan.

Lopuksi esitetään esiselvityksestä vedettävät johtopäätökset ja syntyneet jatkotutkimuskysymykset. Jatkotutkimuskysymykset keskittyvät niihin alueisiin, jotka vaativat tarkempaa selvitystä ja kokeilua, jotta kierrätyspuun uusiokäyttö voidaan vakiinnuttaa osaksi puutuoteteollisuuden arkea.

## 2 Kirjallisuuskatsaus aiempiin selvityksiin

Lehtosen (2024) selvityksessä tarkasteltiin Suomessa syntyviä puujätevirtoja hyödyntämällä tilastoja, kirjallisuutta sekä jätehuoltoalan toimijoilta ja purkuyrityksiltä saatuja haastattelutietoja. Haastatteluiden avulla selvitettiin muun muassa puujätteen laatua, työmailla tapahtuvaa erilliskeräystä, käsittelytapoja, kustannuksia ja mahdollisuuksia puujätteen kierrätyksen kehittämiseksi.

Selvityksessä todettiin, että kierrätysmateriaalien kysyntä on yksi merkittävimmistä tekijöistä kierrätyksen onnistumisessa. Kierrätetyn puun käytön lisäämiseksi tulee huomioida, että Suomessa neitseellisen puun saatavuus on ollut verrattain hyvä, mikä ei ole luonut painetta etsiä vaihtoehtoja kierrätetylle puulle. Tämä tilanne on kuitenkin muuttumassa lähitulevaisuudessa, erityisesti EU-taksonomian ja rakennuslain tiukentumisen seurauksena. Tällöin rakennuttajien ja rakennusten omistajien kiertotalousvaatimukset tiukentuvat, mikä lisää painetta kierrätetyn puun käytölle. (Lehtonen 2024, 4.) Tätä havaintoa tukee myös aiempi PuuLOOP-hankkeessa toteutettu markkinatutkimus, jonka mukaan lähes kaikki tilaajat olivat suunnitelleet käyttävänsä kierrätettyjä tuotteita. Etenkin kunnat olivat asettaneet itselleen strategisia kiertotaloustavoitteita rakentamisen osalta.

Puujätevirtojen hyödyntämisessä on Lehtosen mukaan ollut kuitenkin useita haasteita. Yksi merkittävä este on puujätteiden epähomogeenisuus ja rajalliset määrät sekä pitkät kuljetusmatkat, jotka tekevät kierrätyksestä kustannustehottoman. Tällä hetkellä puujäte kerätään erilleen muusta jätteestä purkutyömailla, mutta jätteitä ei erikseen jaotella tarkasti, koska se ei vaikuta vastaanottohintaan. Kustannustehokkuus on ratkaiseva tekijä, ja tarkempi lajittelu ei ole tällä hetkellä taloudellisesti perusteltua. (Em. 11-12.) Lehtosen toteuttamien haastattelujen perusteella purkuyritykset ovat valmiita parantamaan työmaiden jätteiden lajittelua, mikäli siitä maksetaan enemmän kuin energiapolttopaineeksi päätyvästä puujätteestä. Kustannusten lisääntyminen kuljetusmatkojen pidentyessä tai jätelavojen kuljetusmäärien kasvun myötä on kuitenkin otettava huomioon (Em.13).

PuuLOOP-hankkeen kiertotaloustuotteiden kysyntää tarkastelevassa markkinatutkimuksessa tuli kustannusten maltillisuuden lisäksi esille se, että kierrätyspuusta valmistettujen tuotteiden saatavuus ja tilausaika pitäisi pysyä samana kuin neitseellistä puusta valmistettujen tuotteiden.

Lehtosen selvityksen perusteella voi myös todeta, että purkuyritysten tilaajien kiinnostus puujätteen kierrätyksestä on tähän asti ollut vähäistä. Tyypillisesti tilaajat kiinnittävät huomiota hankkeen kokonaiskierrätysasteeseen, jolloin raskaammat jakeet, kuten betoni, tiili

ja metalli, ovat merkittävämpiä kuin puujäte. Tähän vaikuttaa myös se, että Suomessa puujäte hyödynnetään pääsääntöisesti energiantuotannossa, koska kierrätykselle ei ole riittävästi vaihtoehtoja (s.13). Tulevaisuudessa kierrätysmateriaalien ja -ratkaisujen kysyntää voitaisiin siis lisätä, jos kiertotalouskriteerejä otetaan käyttöön hankinnoissa. Taloudellisuus on kuitenkin edelleen keskeinen tekijä, erityisesti rakentamisessa, jolloin kiertotalousratkaisujen on oltava kilpailukykyisiä myös kustannuksiltaan. (Em. 21.)

## 2.1 Puun kiertotalouden merkitys ja tavoitteet

Puun kiertotalous on kasvava ilmiö, jota ohjaa EU:n ja Suomen lainsäädäntö, vihreä rahoitus ja markkinoiden kysyntä. Rakennusalalla puun kiertotalous liittyy erityisesti kierrätetyn puun hyödyntämiseen uusien rakennusmateriaalien valmistuksessa. Keskeisiä tavoitteita ovat:

- Rakennusjätteen kierrätysasteen nostaminen (puujätteen uudelleenkäyttö ja kierrätys materiaalina).
- Hiilijalanjäljen pienentäminen (kierrätetyn puun hiilijalanjälki on laskennallisesti lähes nolla).
- Uusien liiketoimintamallien kehittäminen, kuten kierrätettyjen puutuotteiden markkinoiden luominen.

Euroopan unionin taksonomian mukaiset kiertotalouskriteerit ovat vahvistamassa suuntausta, jossa kierrätetyn materiaalin osuus kasvaa. Esimerkiksi EU-asetus 2023/2486 määrittää, että rakennushankkeessa enintään 80 % biopohjaisista materiaaleista saa olla neitseellistä, mikä tarkoittaa, että 20 % puumateriaalista tulisi olla kierrätettyä.

## 2.2 Puujätevirrat ja niiden hyödyntäminen

### **Puujätteen syntylähteet**

Puujätettä syntyy pääasiassa rakentamisessa, purkamisessa ja teollisuuden sivuvirroissa. Suurimmat jätevirrat ovat:

- Rakennus- ja purkutyömaat (sisältäen rakennuspuun, muottipuut, eristeet ja puurakenteet).
- Sahatavaran ja puutuotteiden valmistus (sivutuotteet kuten lastut ja puru).
- Pakkausjäte (kuormalavat ja muut puiset pakkausmateriaalit).
- Infrarakentamisen puiset muotti- ja telinerakenteet.

### **Kierrätyspuun jalostusprosessi**

Kierrätyspuun hyödyntäminen edellyttää sen puhdistamista ja käsittelyä, jotta se täyttää rakennusmateriaalien laatuvaatimukset. Tärkeimmät vaiheet ovat:

1. Metallien ja epäpuhtauksien poisto (naulat, maalit, lakat ja kyllästysaineet).
2. Haketus ja kuidutus (puujäte prosessoidaan hakkeeksi tai kuitumateriaaliksi).
3. Kuivaus ja laadunvarmistus (kosteuspitoisuuden säätely ja epäpuhtauksien tarkistus).
4. Jalostus uusiksi tuotteiksi, kuten puukuitueristeiksi, liimapuuksi tai komposiittituotteiksi.

Puun uudelleenkäyttö on haasteellista erityisesti pakkas- ja kosteusvaurioiden sekä kyllästettyjen puumateriaalien osalta, joita ei voida turvallisesti hyödyntää kiertotaloudessa ilman erityiskäsittelyä.

### 2.3 Kierrätetyn puun soveltuvuus ja markkinapotentiaali

#### **Potentiaaliset tuotteet**

Kierrätetylle puulle tunnistettiin useita sovelluskohteita:

- Ei-kantavat rakenteet (höylätty paneeli, puukuitueristeet, ulkoverhousmateriaalit).
- Kantavat rakenteet (CLT, hirsi, rankarunkoiset elementit), joissa kierrätettyä puuta voidaan käyttää välilamelleissa.
- Puulavat ja pakkaukset, joiden valmistuksessa kierrätetyn puun käyttö on suhteellisen yksinkertaista.

#### **Markkinahaasteet**

Markkinoilla ei ole vielä vakiintuneita kierrätettyjä puutuotteita, ja siksi tilaajien kiinnostus perustuu teoreettisiin arvioihin. Keskeisiä haasteita ovat:

- Laatu- ja turvallisuusvaatimukset: Asiakkaat pitävät tärkeänä, että kierrätetty puu on puhdasta ja turvallista käyttää. Sisätiloissa käytettäville tuotteille asetetaan erityisen tiukat vaatimukset.
- Hinta: Kierrätetyn puun odotetaan olevan ainakin samanhintaista kuin neitseellinen puu. Joissain tapauksissa asiakkaat ovat valmiita maksamaan lisähintaa matalasta hiilijalanjäljestä.

- **Sertifiointi ja laatu järjestelmät:** Kansainväliset sijoittajat edellyttävät rakennusmateriaalien täyttävän LEED- tai BREEAM-sertifioinnin, mikä voi hidastaa kierrätettyjen puutuotteiden käyttöönottoa.

## 2.4 Taloudelliset ja operatiiviset edellytykset

### **Kiertotaloustuotteiden rahoitus ja investoinnit**

Kiertotaloustuotteet liittyvät yhä enemmän vihreään rahoitukseen, jossa matala hiilijalanjälki voi tuoda edullisempia rahoitusehtoja. Rakennushankkeissa kiertotaloustuotteiden käyttöä voidaan edistää pisteytysjärjestelmien avulla (RTS, LEED).

### **Väljalostajien rooli**

Väljalostajat ovat keskeisessä roolissa kierrätysprosessissa, koska:

- Ne voivat varmistaa kierrätysmateriaalien laadun ennen toimitusta tuotantolaitoksille.
- Ne optimoivat materiaalivirrat, jotta ne vastaavat teollisuuden tarpeita.
- Ne voivat tarjota valmiita tuotteita, mikä helpottaa asiakkaiden päätöksentekoa.

## 2.5 Keskeiset suositukset ja jatkotutkimustarpeet

Kiertotalouspuutuotteiden kehittäminen vaatii sekä rakenteellisia muutoksia markkinoilla että uusien liiketoimintamallien kehittämistä. Keskeisiä suosituksia ovat:

1. Tuotteiden sertifiointimenettelyjen kehittäminen, jotta kierrätetyt puutuotteet voivat kilpailla neitseellisten tuotteiden kanssa.
2. Materiaalivirtojen ohjaaminen korkeampaan jalostusasteeseen, jotta puu päätyy kiertotaloustuotteeksi eikä suoraan polttoon.
3. Väljalostusprosessien kehittäminen, jotta kierrätetty puu saadaan teollisuuden käyttöön ilman laadullisia esteitä.
4. Rakennusalan toimijoiden koulutus ja tietoisuuden lisääminen, jotta kiertotaloustuotteiden kysyntä kasvaa ja niiden käyttöön liittyvät ennakkoluulot vähenevät.

## 2.6 Yhteenveto

Puun kiertotalous on strateginen mahdollisuus rakentamisen vähähiilistämiseksi, mutta sen laajamittainen käyttöönotto vaatii sertifiointia, markkinoiden kehittämistä ja operatiivisten esteiden poistamista. Välijalostajien rooli, vihreä rahoitus ja rakennusalan sääntelyn kehittyminen ovat avaintekijöitä, jotka voivat mahdollistaa kiertotalouspuutuotteiden laajamittaisen käyttöönoton Suomessa.

### 3 Haastatteluaineiston esittely

Tämän selvityksen pääasiallisena aineistona on käytetty kierrätyspuun käsittelyketjuun kuuluvien toimijoiden kanssa toteutettuja haastatteluja. Haastateltavat yritykset edustivat purkualaa, jätelajittelua sekä puunjalostusteollisuutta. Haastattelujen tavoitteena oli kartoittaa kierrätyspuun arvoketjuun kuuluvat vaiheet sekä tunnistaa arvoketjun keskeisimmät toimijat. Haastattelut toteutettiin kahdessa kierroksessa: ensimmäisellä kierroksella keskityttiin kierrätyspuun prosessoinnin nykytilan hahmottamiseen sekä kattavampaan lajitteluun ja uusiokäyttöön liittyvien haasteiden selvittämiseen. Toisella kierroksella pyrittiin täydentämään haastattelijan tekemää alustavaa analyysia ja laskelmia tavoitetilaan vaadittavista toimenpiteistä.

Haastattelut valittiin pääasialliseksi aineistoksi, sillä käytännön tieto ja yritysten näkemykset ovat tässä tapauksessa keskeisiä. Kierrätyspuun käsittelyketjun potentiaalisten esteiden ja mahdollisuuksien kartoittaminen vaatii syvällistä ymmärrystä käytännön toiminnasta, jota tieteellinen tutkimuskirjallisuus ei yksin tarjoa. Tavoitteena on esiselvityksen tarjoaman tiedon avulla toteuttaa käytännön demoja ja kokeiluja yhteistyössä mukana olevien toimijoiden kanssa, mikä ei ole mahdollista pelkästään tieteellistä kirjallisuutta tarkastelemalla.

## 4 Tavoitetila

Puutuoteteollisuuden tavoitetilana on, että puutuoteollisuudessa voidaan ostaa kierrätettyä raaka-ainetta eli kierrätyspuuta väljalosteena ja korvata neitseellinen raaka-aine muuttamatta puutuoteteollisuuden prosesseja. Tässä selvityksessä keskitytään erityisesti sahatavaraan väljalosteena. Tavoitetilan saavuttamisessa onnistumisen edellytykset ovat seuraavat:

1. Kierrätyspuuta voidaan tarjota sahatavarana markkinoille korkeintaan neitseellisen puun hinnalla (200 €/m<sup>3</sup>).
2. Kierrätyspuun käsittelyprosessille saadaan varmennus- ja tuotehyväksyntämenttely.
3. Prosessin aiheuttama ympäristökuormitus ei ylitä neitseellisen puun kuormitusta.

Ensimmäinen ehto on kaikkein tärkein, sillä hankkeen aiempien selvitysten perusteella kierrätyspuusta ei todennäköisesti olla raaka-aineena valmiita maksamaan neitseellistä korkeampaa hintaa. Kierrätyspuun käyttöä oltaisiin valmiita jopa priorisoimaan raaka-aineena neitseelliseen puuhun verrattavalla hinnalla erityisesti silloin, kun sen käyttö edistää esimerkiksi rakennuksen hiilijalanjäljen pienentämistä. Sisätiloissa kierrätyspuuhun suhtaudutaan vielä varauksella, mutta sen puhtauden varmentaminen voi lisätä luottamusta ja käyttömahdollisuuksia. Ulkokäyttökohteissa asenne on jo myönteisempää, ja tulevaisuudessa kierrätyspuun odotetaan yleistyvän esimerkiksi sahatavarana, puukuitueristeissä ja kuormalavojen puristetolpissa

Toinen ehto linkittyy vahvasti ensimmäiseen, sillä kierrätyspuun tuominen markkinoille vapaasti hyödynnettäväksi edellyttää purkupuun jätestatuksen poistamista ja tuotehyväksyntämerkinnän saamista. “(..) [K]ierrätysmateriaalilla pitää olla tuotehyväksyntä, sen pitää olla puhdasta ja siinä ei saa olla jäämiä esimerkiksi haitta-aineista tai homeista. Kun raaka-aineen vaatimukset esimerkiksi toleranssien suhteen vastaavat neitseellistä, on kierrätettyjen tuotteiden käyttöönottoon vain vähän teknisiä esteitä” (Ylinen, X). Siksi tässä esiselvityksessä keskitytään tunnistamaan väljalosteiden kannalta kelpollisia puujakeita. Siitä huolimatta menettely jätestatuksen poistamiseksi ja tuotehyväksyntämerkinnän saamiseksi voi kuitenkin koitua kustannusmielessä hankkeen tavoitteen saavuttamiselle joko keskeiseksi esteeksi tai mahdollistajaksi.

Kolmas ehto käsittää vuorostaan ekologisen kestävyuden. Lähtökohtaisesti kierrätettyjä raaka-aineita pidetään neitseellisiä ekologisempina, koska ne edistävät materiaalien uudelleenkäyttöä taloudessa, vähentävät uusien materiaalien tarvetta ja siten säästävät luonnonvaroja. Raaka-aineen ekologisuutta tarkasteltaessa tulisi kiinnittää aina huomiota koko elinkaaren aikaisiin ympäristövaikutuksiin. Kierrätysmateriaali voi esimerkiksi olla samanaikaisesti päästöiltään neitseellistä kuormittavampaa ja silti materiaalikulutukseltaan neitseellistä kevyempää. Ympäristökuormittavuuden vertailu onkin moniulotteista ja haasteellista, minkä vuoksi siinä joudutaan nojaamaan yksinkertaisuuksiin, kuten hiilidioksidipäästöekvivalenteihin ja luonnonvarojen kulutukseen. Tässä selvityksessä ekologisuutta tarkastellaan puutavaran elinkaaren pituuden näkökulmasta, mikä on suoraan kytköksissä luonnonvarojen käyttöön.

Kierrätyspuun lähteitä voi käytännössä olla useita, mutta tässä esiselvityksessä keskitytään rakennuksista purettavan puun kierrättämiseen raaka-aineeksi.

### **Potentiaalisia tuotteita tavoitetilassa**

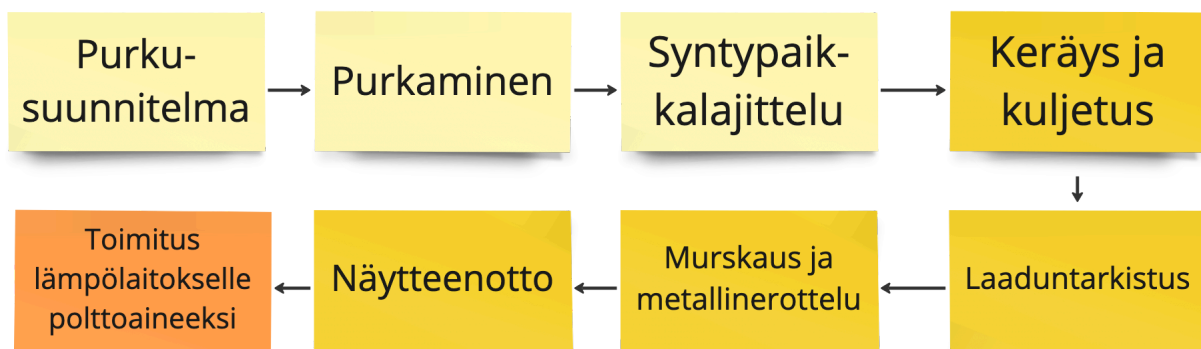
Aiempien esiselvitysten perusteella kierrätyspuun potentiaalisiksi käyttökohteiksi on tunnistettu sahatavara, sekä erilaiset kuitu- tai lastupohjaiset tuotteet kuten puukuitueristeet ja kuormalavojen puristetolpat, mikä vahvistettiin myös tässä esiselvityksessä purkupuun osalta. Näiden rinnalle nousivat lisäksi raakaponttilauta, sekä erilaiset puupohjaiset levyt.

Tavoitetilan saavuttamiseksi purkupuun on saatava väljalostukseen ominaisuuksiltaan soveltuvana näihin käyttökohteisiin. Sahatavara ja raakaponttilauta, jotka soveltuvat mm. painumattoman hirren ja CLT:n välilamelleiksi, vaativat hyväkuntoista ja puhdasta massiivista puutavaraa, kun taas puukuitueristeeksi ja puristelevyiksi soveltuu puhdas pienempi tai hajonnut puutavara. Puristetolppien tai muiden sekundäärituotteiden valmistukseen voidaan puolestaan hyödyntää myös huonokuntoisempaa ja epäpuhtaampaa puuta. Se, kuinka helposti purkupuun voidaan jalostaa näihin käyttötarkoituksiin, riippuu pitkälti purkupuun nykyisestä käytöstä ja saatavuudesta.

## 5 Rakennuksista purettavan puun käytön nykytila

### Tiivis katsaus nykyiseen arvoketjuun, prosesseihin ja teknologiaan

Nykyisellään rakennuksista purettavan puun arvoketju on optimoitu puun energiakäyttöä varten. Arvoketjun vaiheet ovat tyypillisesti purkusuunnitelma, purkaminen, syntypaikkalajittelu, keräys, kuljetus, lajittelu, murskaus ja erottelu sekä kuljetus polttoon. Käytetyt teknologiat palvelevat näitä nimenomaisia vaiheita.



Kuva 1. Geneerinen prosessikuvaus purkupuun nykykäytölle.

Purkusuunnitelma on asiakirja, joka määrittelee yksityiskohtaisesti, kuinka rakennuksen purkaminen toteutetaan turvallisesti, tehokkaasti ja ympäristöystävällisesti.

Purkusuunnitelma on olennainen osa purkulupahakemusta.

Purkamista edeltää aina purkukartoitus. Purkukartoitus on prosessi, jossa selvitetään purettavan rakennuksen rakenteet, materiaalit, haitta-aineet ja muut purkutyöhön vaikuttavat tekijät. Sen tavoitteena on varmistaa purkutyön turvallisuus, tehokkuus ja ympäristöystävällisyys. Purkukartoitus on tärkeä osa purkusuunnitelmaa ja monissa tapauksissa lakisääteinen vaatimus Suomessa. Purkukartoitus sisältää myös mahdolliset ehdotukset materiaalin hyödyntämiseen. Purkutoimijalle tulevassa tarjouspyynnössä voi myös olla mukana materiaalin hyödyntämiseen liittyviä asioita.

Rakennus puretaan tyypillisesti koneellisesti. Tavoitteena on mahdollisimman nopea ja turvallinen purku. Purkamisen alkuun tehdään tarpeen mukaan haitta-ainepurku, jolla saadaan asbesti ja muut haitta-aineet turvallisesti pois muovitetussa ja alipaineistetussa tilassa. Betonirakennukset puretaan ensin sisältä tyhjäksi eli rungolle asti. Tämä tapahtuu pitkälti käsin, mutta isommissa rakennuksissa voidaan hyödyntää pienkoneita sisätiloissa. Betonirakennuksista saatavan puun määrä on vähäinen, ja suurin osa siitä koostuu kattotuoleista. Puurakennukset on helppo purkaa, sillä ne voidaan purkaa kokonaan koneellisesti. Poikkeuksena ovat haitta-aineita sisältävät osat, jotka on poistettava käsin. Suurin osa saatavasta materiaalista on luonnollisesti puuta.

Purkaminen kestää päivästä kuukauteen riippuen rakennuksen koosta. Purettu puu lajitellaan 2-3 keräyslavalle polttoa varten a-, b- ja c-luokan puihin, joista a- ja b-luokan puut voidaan lajitella samaan jakeeseen, mikäli niistä maksettava hinta on sama.

Seuraavaksi keräyslavat kuljetetaan kierrätysyritykselle, joka tarkistaa puun laadun, murskaa a- ja b-luokan puut, ottaa niistä näytteet ja toimittaa puun lämpölaitokselle polttoaineeksi. Murskauksessa käytetään nopeakierroksista vasaramurskainta, joka on varustettu tehokkaalla magneetilla. Magneetti erottaa metallin puusta jo murskauksen aikana. Kiertotalousyrityksille puu on materiaalina erittäin helposti käsiteltävä.

C-puun (lukuunottamatta kyllästetty) käsittelymenetelmä sama kuin a- ja b-puussa, mutta energiahyödynnys tapahtuu laitoksessa jolla on lupa jätteen polttoon.

### **Kustannukset ja hyödyt**

Rakennuksista puretun puun polttoon liittyvä arvoketju on toimijoille kustannustehokas, sillä prosessi on nopea ja vaivaton. Purkaminen ja murskaaminen voidaan toteuttaa karkeilla,

koneellisilla menetelmillä, mikä tehostaa käsittelyä. Lisäksi suurin osa puretusta puusta soveltuu suoraan polttoon. Kierrätysyritykset maksavat purkuyrityksille puusta keskimäärin 5–20 €/tonni. Lämpölaitokset maksavat puolestaan kierrätysyritykselle keskimäärin 75–100 €/tonni. Rahtikustannukset ovat tyypillisesti 10–15 €/tonni per kuljetus.

## **Ekologisuus**

Nykyisellään puun materiaaliarvo muutetaan lämpöarvoksi. Vaihtoehtoisena ovat neitseellisten raaka-aineiden käytön lisääntyminen, joka lisää painetta metsien käytölle.

## **Asenneilmapiiri**

Haastateltujen suhtautuminen kierrätyspuun mahdollisuuksiin on varovaisen toiveikas. Välitöntä liiketoiminnallista hyötyä ei alkuun odotettavissa olevilla volyyymeilla koeta vielä kovin suureksi. Toisaalta jätepuun hyödyntämissuhteen kasvaessa myös volyymit kasvavat, jolloin välittömät hyödytkin paranevat. Erityisesti arvoketjun alkupäässä koetaan kierrätysasteen nostaminen tärkeimmäksi ajuriksi. Kierrätysastetta nostamalla ja kiertotalousmalleja kehittämällä halutaan myös ennakoida liiketoimintaympäristön muutosta. Lisäksi jätepuun polttamisen odotetaan muuttuvan vähemmän kannattavaksi, mikäli sen sääntelyä tiukennetaan ilmastotavoitteiden edistämiseksi. Tämä puolestaan voisi lisätä jätepuun kierrätystä..

Kierrätyspuun liiketoimintamahdollisuuksien edistämiseksi on tärkeää muuttaa asenteita myös tilaajien keskuudessa, erityisesti purku-urakoissa. Nykyisin purkajat eivät juuri pääse vaikuttamaan purkusuunnitelman laatimiseen, sillä sen määrittelee pääsääntöisesti tilaaja. Tällöin urakkaan liittyy etukäteen määritellyt hinta ja aikarajat, ja urakoitsijan valinnassa painotetaan usein edullisimman hintaa ja nopeinta toimitusaikaa.

Nykyisessä toimintatavassa purkuliike ei voi itsenäisesti toteuttaa esimerkiksi tarkempaa puujätteiden lajittelua, sillä se ei mahdu sovittuun aikarajaan tai budjettiin. Tämän vuoksi on tärkeää, että myös tilaajat ymmärtävät kierrätyspuun hyödyntämisen merkityksen ja tukevat sitä valinnoillaan. Ostajien tulisi ottaa huomioon muut tekijät kuin pelkkä hinta ja nopeus, kuten materiaalien laatu ja kierrätysmahdollisuudet.

Mikäli ostajien asenteiden muutos ei ole mahdollista, toinen vaihtoehto on etsiä yhteistyökumppaneita, joilla on varastointitilaa ja jotka voivat ottaa vastaan hyödynnettävät

puumateriaalit suoraan purkupaikoilta. Haastatellun purkuyrityksen mukaan tällainen käytäntö on jo yleistynyt esimerkiksi rakenneosapuolella ja tiilien käsittelyssä, jolloin purkaja saa jopa korvausta hyödynnettävistä materiaaleista.

## 6 Kuilu tavoitettiin pääsemiseksi

### **Nykyprosessit ja väljalostaminen**

Kun tavoitetta verrataan nykytilaan, selkeäksi kuiluksi muodostuu rakennuksista puretun puun nykykäytön ja tavoitekäytön erilaisuus ja jopa ristiriitaisuus. Tavoitetilassa puun arvo on

tarkoitus säilyttää prosessoimalla se puutuoteteollisuudessa hyödynnettäväksi väljalosteeksi, kun taas nykytilassa jo purkamismenetelmät rajaavat merkittävästi purkupuun hyödyntämispotentiaalia kierrätysraaka-aineena. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että nykyiset karkeat purkumenetelmät vaurioittavat puuta, mikä rajaa siitä jalostettavien lopputuotteiden vaihtoehtojen määrää ja voi myös lisätä käsittelyn tarvetta.



Kuva 2. Nyky- ja tavoitetilan välinen kuilu.

Tästä seuraa luonnollisesti, että nykyisestä arvoketjusta puuttuvat myös prosessit ja teknologiat, jotka pyrkisivät säilyttämään puun arvon ja käsittelemään siitä väljalosteita puutuoteteollisuudelle. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi, että niin purku- kuin lajitteluvaiheessa tarvitaan keinoja säilyttää puun eheys, erotella puut toisistaan ja mahdollisista kiinnikkeistä sekä ohjata kierrätysraaka-aineeksi kelpaava puu sopivaan jakeeseen.

Lisäksi nykyiseen arvoketjuun tarvitaan mukaan vaiheita, joissa puusta käsitellään väljalosteita puutuoteteollisuudelle. Tämä tarkoittaa käytännössä esimerkiksi sitä, että kierrätystoimijan lajiteltua puut tarkoituksenmukaisiin jakeisiin, kuten sahatavaraksi tarkoitettuun, puu tulee todennäköisesti vielä katkaista määrämittaan ja mitallistaa.

Edellä mainittuja tavoitetilaa pääsemiseksi puuttuvia arvoketjun vaiheita, prosessin osia ja potentiaalisia teknologioita kutsutaan hankkeessa nimellä **Black Box**. Tämän lisäksi on tunnistettava, miten olemassa olevia prosesseja, kuten purkamista ja lajittelua voitaisiin muuttaa ja hyödyntää niin, että ne tukisivat purkupuun jalostamista kiertotaloustuotteiksi.

### **Teknologinen kuilu**

Nykyiset käytössä olevat puun käsittelyyn liittyvät teknologiat, kuten murskaus, ovat keskittyneet pääasiassa jätepuun polttoon liittyvään laadunvarmistukseen ja erotteluun, jolloin prosessipolulta nykyisellään puuttuu monia teknologioita erityisesti prosessin alkupäässä, joiden avulla jätepuun jalostaminen arvokkaammiksi jakeiksi voisi mahdollistua.

Tämä teknologinen kuilu liittyy erityisesti jätejakeiden tunnistus- ja erottelumenetelmiin sekä purkusuunnitelman laadintavaiheessa että itse purkuprosessissa. Erilaisten kuvantamistekniikoiden hyödyntäminen voisi auttaa tunnistamaan jalostuskelpoiset jakeet jo varhaisessa vaiheessa.

Toinen merkittävä teknologinen kuilu koskee kiinnikkeiden automatisoitua tunnistamista ja poistamista purkumateriaalista. Tämä on yksi eniten aikaa vievistä ja kalleimmista prosessivaiheista jätepuun hyödyntämisessä ja jalostamisessa.

### **Taloudellinen kuilu**

Taloudellisesta näkökulmasta kuiluksi voi muodostua myös nykyisten prosessien kustannustehottomuus kiertotaloustuotteiden näkökulmasta. Kun prosessit ja teknologiat on optimoitu puun polttamisen kannalta, puun arvon säilyttäminen nostaa väistämättä kustannuksia. Lisäksi lämpölaitosten maksama hinta puusta (75–100 €/tonni) määrittää vähimmäishinnan, jonka kierrätysyrityksen tulisi saada, myydessään puuta Black Box -toimijalle. Lopuksi jatkossa olisi myös hyvä keskittyä toimijoiden välisiin sopimuksiin, joilla voidaan ohjata arvoketjun toimintaa.

### **Ekologinen kuilu**

Ekologinen kuilu muodostuu puuttuvista toimenpiteistä, jotka mahdollistavat puun elinkaaren pidentämisen kierrätyskäytössä lämpöarvoksi polttamisen sijaan. Toisin sanoen kuilu muodostuu nykyprosessien muutostarpeista ja puuttuvista vaiheista arvoketjussa, joita on jo kuvattu edellä. Siksi ekologisen kuilun ylittäminen mahdollistuu teknisten ja taloudellisten ratkaisujen myötä.

Seuraavaksi tarkastellaan keinoja, joilla kuilun ylittämisessä voidaan onnistua.

## 7 Onnistumisen keinot

Tässä esiselvityksessä esitellään useita tunnistettuja keinoja, joiden avulla ja yhdistämällä niitä voidaan saavuttaa hankkeen tavoite: kierrätysraaka-aineen hyödyntäminen puutuoteteollisuudessa. Alla on kuvattu haastatteluaineistojen pohjalta, kuinka nykyiset toimijat voivat sopeuttaa prosessejaan palvelemaan paremmin purkupuun kierrättämistä puutuoteteollisuudelle.

### 7.1 Prosessien sopeuttaminen

#### 1. Purkusuunnitelma

Rakennusten purkusuunnitelmalla voidaan tukea puun kierrätyskäyttöä, mutta se ei vaikuta merkittävästi suunnitteluvaiheeseen. Tärkeintä on, että purkusuunnitelmassa tehtävät laskelmat määräistä, kuluista ja hyödyistä pitävät paikkansa, mihin alalla onkin jo totuttu. Arvoketjun tehokkuuden näkökulmasta katsottuna, mitä paremmin purkukohteesta on tietoa, sen paremmin purkamiseen ja sitä seuraaviin arvoketjun vaiheisiin voidaan varautua.

#### 2. Purkaminen

Purkukoneella voitaisiin suorittaa nykyistä varovaisempaa purkua, jolloin puu saataisiin talteen ilman kustannusten merkittävää nousua. Yksittäisiä puukappaleita voi purkukoneella kuitenkin olla vaikea irrottaa muista. Se on hyvin tilannekohtaista ja varmempaa toteuttaa käsin. Käsin purkamalla voidaan irrottaa jopa yksittäisiä puukappaleita, mutta työ voi olla hidasta ja maksaa useamman kymmenen euroa tunnilta. Näin ollen ainoastaan korkea-arvoisimmat ja helposti irrotettavat kappaleet kannattanevat irrottaa käsin.

#### 3. Syntypaikkalajittelu

Syntypaikkalajittelu tarkoittaa purkumateriaalien lajittelua suoraan työmaalla, jolloin jätteet erotellaan eri jätejakeisiin heti purkutyön yhteydessä. Tämä parantaa kierrätysastetta, vähentää jätteiden käsittelykustannuksia ja edistää ympäristöystävällistä purkutoimintaa.

Purkutyökoneen kuljettaja voi lajitella puut silmämääräisesti ja on helposti koulutettavissa tunnistamaan, mitkä puukappaleet soveltuvat jatkojalostukseen. Kuljettaja voi erotella puut tyyppin ja kunnan perusteella sekä ottaa huomioon epäpuhtaudet tietyssä määrin.

Hyödyntämällä käsinlajittelua koneellisen lajittelun ohessa voidaan parantaa lajittelun tarkkuutta. Näin puuta on mahdollista lajitella syntypaikalla esimerkiksi dimension, laadun ja eheyden sekä käyttötarkoituksen perusteella. Lavojen tullessa täyteen, tieto lavan sisällöstä voidaan siirtää kierrätystoimijalle esimerkiksi hyödyntämällä qr-koodeja, jotka skannaamalla voidaan ilmoittaa lavan sisältö ja täyttöaste.

#### **4. Kuljetus kierrätystoimijalle**

Logistinen tehokkuus on enimmäkseen kiinni lavojen täyttöasteesta. Mitä tiiviimmin puu on lavalla, sen kustannustehokkaammaksi logistiikka tulee. Siksi lavalla olevan puutavaran kannattaa olla mahdollisimman homogeenistä sekä siinä kiinni olevan muun puun ja materiaalin vähäistä. Suhteessa puun polttamiseen sen kierrättämisestä voi koitua logistisia haasteita, sillä lavoja tarvitaan todennäköisesti useampia, eikä niitä voida tiivistää kauhalla painamalla, kuten nykyään, koska silloin puutavara usein hajoaa.

#### **5. Lajittelu ja niputus**

Kun rakennus- ja purkujätteet on kerätty ja kuljetettu työmaalta, ne saapuvat kierrätystoimijalle, jossa jätteiden käsittely ja lajittelu tapahtuu teollisessa mittakaavassa. Kierrätystoimijan tehtävänä on erotella materiaalit tehokkaasti, jotta mahdollisimman suuri osa jätteistä voidaan kierrättää tai hyödyntää uudelleen. Puun kierrätyskäyttöä varten voidaan hyödyntää sekä koneellista että käsin toteutettua linjastolajittelua.

Koneellinen esilajittelu tarkoittaa lavoilla olevan materiaalin lajittelua kouran avulla kevyempiin ja painavampiin jakeisiin. Operoija voi lajitella puuta silmämääräisesti samaan tapaan kuin purkutyömaalla. Tässä vaiheessa etenkin suuremmat, yli kymmenen kiloa painavat puukappaleet täytyy lajitella omiin jakeisiinsa. Ne voidaan lajitella jo suoraan

nippuihin, mikäli puu on sopivassa muodossa, eikä esimerkiksi toisissaan kiinni. Tarkempi lajittelu dimension perusteella edellyttää käsin työskentelevän työparin apua.

Linjastolajittelu tarkoittaa käsinlajittelua, joka tapahtuu kuljetuslinjastoa hyödyntäen. Puu tulee linjastolle yhtenä jakeena ja voidaan lajitella neljään eri jakeeseen per linjasto. Lajittelu voidaan tehdä esim. dimension, tyypin, kunnan ja epäpuhtauksien perusteella.

Lajittelukriteerinä kannattanee olla tietyn arvon sijaan haarukka, jotta lajittelu on tehokkaampaa ja saavutetaan tarvittavat viikkovolyymit (väh. 50 tonnia). Tyypillisesti linjastolla työskentelee kaksi henkilöä, joista molemmat voivat lajitella arviolta tonnin puutavaraa tunnissa. Linjastolta voi syntyä 20-40 % jätettä. Tuntikustannukset ovat arviolta 25-30 euroa henkilö kohden sekä 10-20 euroa linjan käyttötuntia kohden. Nämä tarkentuvat lajittelutestin myötä.

## 6. Kuljetus Black Box -toimijalle

Kierrätysraaka-aineeksi kelpaava puu voitaisiin seuraavaksi toimittaa väliljalostalle, jonka tehtäviä kuvataan alla kohdassa Black Box -vaihe. Keskeiseksi haasteeksi logistiikan näkökulmasta muodostuu mahdollisimman tiiviit ja täydet kuormat. Haasteen taklaamiseksi kuorman sisällön tulisi olla mahdollisimman homogeenista ja korkeavolyymista.

### 7.2 Black Box -vaihe

Kun kierrätyskelpoiset puut on saatu purettua, lajiteltua ja niputettua, ne tulee käsitellä halutun mukaiseksi väliljalosteeksi, kuten sahatavaraksi tai murskeeksi puukuituja varten. Black Box -vaiheeseen sisään tuleva puutavara voi olla hyvin moninaisessa muodossa ja kunnossa, joten tarvittu käsittely voi vaihdella suuresti.

**Naulojen, kiinnikkeiden ym. poisto** täytyy todennäköisesti tehdä kaikelle puutavaralle, josta halutaan väliljalosteita, ellei puuta saada purettua rakennuksista riittävästi ilman niitä. Se tarkoittaisi käytännössä puun leikkaamista kiinnikkeiden ympäriltä. Ainoastaan puristeissa saisi olla jonkin verran metallia seassa.

Tällä hetkellä ainoa tarjolla oleva vaihtoehto purkamisen jälkeisessä käsittelyssä vaikuttaisi olevan tehdä se käsin erilaisten työkalujen avulla. Joidenkin koneiden, kuten puun vikoja tunnistavan katkontasahan ja sormijatkoskoneen, hyödyntäminen voisi olla mahdollista, mutta sen kannattavuus on iso kysymysmerkki. Puussa olevat naulat ja kiinnikkeet tekevät lautojen syötön katkaisusahalle haasteelliseksi, koska laudat pitäisi saada suoraa pöytää vasten. Viimeistelyssä onnistuminen on myös iso kysymysmerkki.

Toisaalta yksi mahdollisuus olisi tietyissä tapauksissa sahata puutavara vain pienempään dimensioon tai mittaan. Jos tämä olisi riittävä toimenpide, silloin puu voitaisiin saada uudelleenkäytettyä koolauksissa, jopa lujuuslajiteltuna.

Joka tapauksessa tämä vaihe näyttäytyy haastattelujen valossa kaikkein haastavimmalta koneistaa ja automatisoida sekä työläimmältä käsityön näkökulmasta. Se lisää myös helposti kustannuksia useita kymmeniä euroja per kuutio käsiteltyä puutavaraa.

**Viottuneiden kohtien poisto** tarkoittaa sitä, että puumateriaalia käsitellään ja muokataan niin, että käyttökelvottomat, heikentyneet tai vaurioituneet osat poistetaan, ja jäljelle jäävä puu voidaan hyödyntää uudelleen rakennusmateriaaleina tai muissa käyttötarkoituksissa. Se edellyttää todennäköisesti myös käsityötä materiaalin ollessa heterogeenistä, eli käytännössä erityyppisiä puokappaleita on vaikeaa tai jopa mahdotonta saada linjastolla koneellisesti käsiteltyä. Tämän vaiheen kustannukset voiva olla useita kymmeniä euroja.

**Sahaus** (määrämittaan katkaiseminen) voidaan tehdä puokappaleelle missä tahansa suunnassa. Sen avulla voidaan muuttaa kappaleen dimensiota ja esimerkiksi halkaista suuren dimension kappale kahdeksi pienemmän dimension kappaleeksi. Edellytyksenä koneellisessa sahauksessa on, että kappale voidaan asettaa tasaiselle pinnalle. Lisäksi sahauksen avulla voidaan poistaa nauvoja, kiinnikkeitä ja vioittuneita kohtia, mikäli puokappaleen dimension tai pituuden muuttuminen ei haittaa. Sahauksen kustannusarvio on muutamia kymmeniä euroja per kuutio.

**Höyläyksellä** mitallistetaan halutut puukappaleet valittuihin mittoihin 5 mm leikkuuvaralla. Höyläyksellä voidaan myös poistaa epäpuhtaudet, kuten maalikerrokset ja mitallistaa puukappale. Se voidaan tehdä puukappaleille, jotka voidaan asettaa tasaiselle pinnalle. Tyypilliset höylän terät eivät kestä metallin tai välttämättä edes muovin palasia, joten materiaalin tulee olla puhdasta ennen höyläystä. Höyläyksen kustannusarvio on muutamia kymmeniä euroja per kuutio.

**Sormijatkaminen** voidaan tehdä sahatavaralle, kun siitä halutaan normaalia pidempää tai sille halutaan tietyt ominaisuudet. Sormijatkoksia käyttämällä voidaan tuottaa esimerkiksi sahatavarakappaleita, jotka ovat kokonaan valitusta puun osasta tai erittäin suorina. Tämä on muihin käsittelyvaiheisiin suhteutettuna erittäin kallis työstövaihe, joka voi maksaa toistasataa euroa kuutiolta.

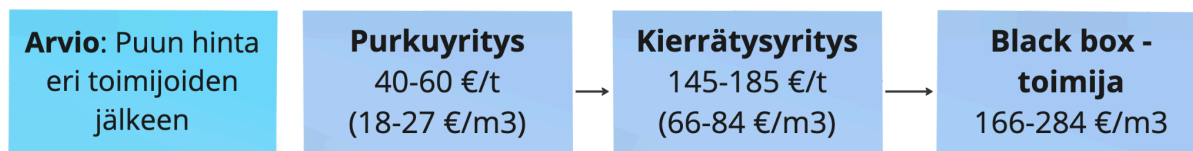
**Kuivaus** voidaan tehdä puukappaleille, jotka ovat kastuneet esimerkiksi purkutyömaalla tai jossain myöhemmässä vaiheessa. Kuivauksen kustannus, joka alkaa parista kymmenestä eurosta, riippuu luonnollisesti puun kosteudesta. Turhien kustannusten välttämiseksi olisi kuitenkin syytä pyrkiä pitämään puut kuivana.

### **Labratestit ja sertifiointit - varmennukset ja tuotehyväksynät**

Valmistettavien lopputuotteiden näkökulmasta niiden vaatimustenmukaisuus, kuten lujuus, on pystyttävä osoittamaan ennen markkinoille vientiä. Jotta jätepuulta voidaan poistaa jätetestatus ja käyttää sitä raaka-aineena puutuoteteollisuudessa, sen turvallisuus pitää ensin varmentaa. Käytännössä puutuoteteollisuuden toimijat hankkivat tuotehyväksynät tuotteiden valmistuksen yhteydessä, ja heidän pitää voida luottaa käyttämäänsä raaka-aineeseen, eli puulla tulee olla varmennustodistus. Sen mahdollistamiseksi puun ominaisuuksia voidaan testata laboratorioissa tai erilaisten kannettavien teknologioiden avulla kentällä. Vielä on kuitenkin epäselvää esimerkiksi se, riittääkö todistus raaka-aineelle, vai tarvitaanko se erikseen jokaiselle lopputuotteelle. Lisäksi keskeisiä haasteita ovat esimerkiksi, että esimerkiksi rakennustuotteita koskevien perusvaatimusten (BWR) mukaisten ominaisuuksien todentamiseen ei ole olemassa tapaa ja samaa hyväksymisprosessia pitäisi voida hyödyntää eri tuotehyväksynnöissä.

### 7.3 Hinta

Alla on arvioitu toteutettujen haastattelujen perusteella puun hintaa arvoketjun eri toimijoiden vaiheiden jälkeen perustuen nykyisiin prosesseihin ja teknologioihin. Hinta on ilmoitettu haarukkana, sillä se riippuu useasta muuttujasta, kuten prosessin jälkeen jäljellä olevan puun sekä kussakin vaiheessa toteutettujen toimenpiteiden määrästä.

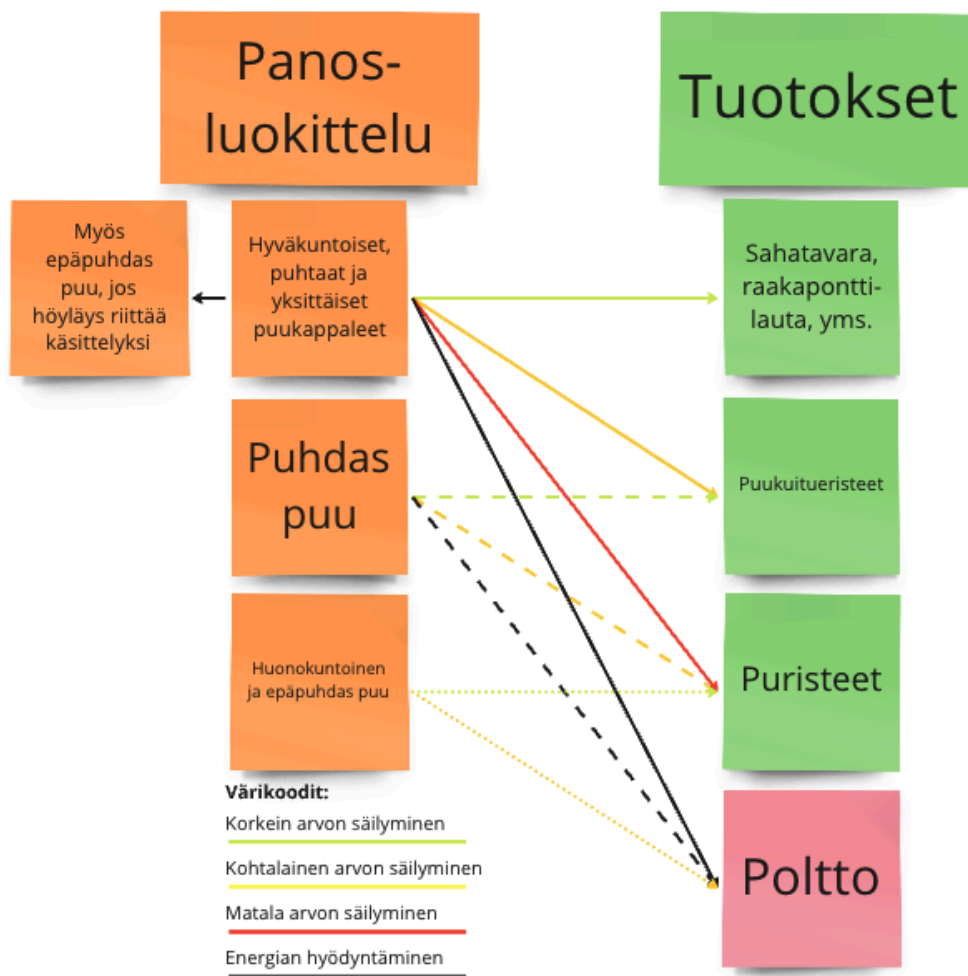


Kuva 3. Arvio puun hinnasta eri toimijoiden jälkeen.

Hinta-arvion pohjalta voidaan todeta, että hankkeen tavoitteisiin pääseminen on yhtäältä ainakin kustannusnäkökulmasta mahdollista. Toisaalta kuten arviosta nähdään, neitseellisen sahatavaran markkinahinnan (200 €/m<sup>3</sup>) ylittäminen käy toteen, mikäli kierrätysyrityksen tai Black Box -toimijan kustannukset puun prosessoinnissa osuvat arvion yläpäähän. Siksi hankkeen tavoitteiden toteuttamisen kannalta kierrätyspuun arvoketjussa on ainakin aluksi perusteltua keskittyä puukappaleisiin, joiden käsittelytarve on mahdollisimman vähäinen suhteessa siitä valmistettavaan väljalosteeseen.

### 7.4 Potentiaaliset tuotokset

Kuvassa 4 on kuvattu panos-tuotos -ajattelun kautta potentiaalisia purkupuun lähtötiloja sekä väljalostuksen jälkeisiä lopputuloksia. Panos-tuotos -ajattelua varten on pyritty tunnistamaan, minkä laatusena puuta voitaisiin rakennuksista purkaa ja mihin niitä olisi järkevä jalostaa hankkeen tavoitteiden saavuttamiseksi.



Kuva 4. Black Boxin mahdollisia tuotteita.

Tavoitteena on materiaalitehokkuuden ja ekologisuuden vuoksi säilyttää puun arvo mahdollisimman korkealla eli säilyttää puun rakenne niissä tapauksissa, joissa se on käytössä olevien teknologioiden avulla mahdollista ja taloudellisesti järkevää. Tätä on kuvattu nuolten värikoodeilla. Lisäksi kuvaa varten on pyritty tunnistamaan tuotteita, joiden avulla mahdollisimman suuri osa puretusta puusta voitaisiin ylipäänsä hyödyntää kierrätystuotteina.

Sahatavara ja raakaponttilauta sekä niihin verrannolliset väljalosteet ovat tuotosten hierarkian yläpäässä, sillä niiden kohdalla puun rakenne säilyy muihin verrattuna parhaiten. Lisäksi ne ovat puutuoteteollisuuden näkökulmasta kiinnostavin kierrätyspuun käyttökohde,

jota voidaan hyödyntää esimerkiksi rakentamisen kiertotalousasteiden saavuttamiseksi. Niitä on realistista valmistaa, mikäli purkupuu saadaan työstöön yksittäisinä kappaleina, hyväkuntoisena ja puhtaana. Myös pinnallisesti epäpuhdas puu, kuten maalattu, sopii raaka-aineeksi, mikäli sille riittää pelkkä höyläys.

Puukuitueristeet ja puristeet tarvitsevat raaka-aineekseen hakkeen tai murskeen muodossa olevaa puuta. Puukuitueristeiden tapauksessa riittää, että puu on puhdasta, sillä esimerkiksi murskaimet pystyvät erottelemaan magneetilla metallit puun seasta. Mahdollisesti myös huonokuntoinen puu kelpaisi raaka-aineeksi. Puukuitueristeitä hyödynnetään ekologisessa rakentamisessa ja niiden raaka-aineena käytetään esimerkiksi sanomalehtipaperia ja Puristeiden kohdalla myös epäpuhdas ja huonokuntoinen puu voi olla hyvää raaka-ainetta. Puristepalikan hinta on tällä hetkellä noin 240 €/m<sup>3</sup> ja ne tuodaan suurelta osin Saksasta.

Tarkastellaan seuraavaksi, mitä teknologioita arvoketjussa voitaisiin hyödyntää.

## 7.5 Teknologiat

Jätejakeen laatu ja koko määrittää sen jatkokäytön mahdollisuudet ja optimaalisen prosessipolun

- **Uudelleen käyttöön** sopii isoimmat jätejakeet, jotka voivat soveltua uusien tuotteiden valmistamiseen, jatkeiksi tai höyläyksen jälkeen pienemmiksi standardituotteiksi (esim. 23mm/21mm puulankut katteisiin tai vastaaviin sovelluksiin, vanerin, lastulevyn, liimapuun tai muun jatkojalosteen raaka-aineeksi).
- **Komposiittimateriaalien raaka-aineeksi** tarvitaan tasalaatuista ja hienompaa mursketta
- **Energiakäyttöön** sopii karkeampi hake ja muut prosessin ylijäämät

### Jätepuun erottelu ja puhdistus

#### 1. Manuaalinen lajittelu

- Käytetään erityisesti rakennus- ja purkujätteen käsittelyssä.

- Ihmistyönä tehdään karkea erotus, jossa poistetaan metallit, muovit ja muut vierasaineet.
- Tehokas erityisesti silloin, kun jätevirta on monimuotoista ja vaatii tarkkaa arviointia.

## 2. Mekaaninen seulonta

- Puujäte syötetään seulontalaitteeseen, jossa se erotellaan koon mukaan.
- Käytetään esimerkiksi irtonaisen purun, hakkeen ja hienoaineksen erotteluun.
- Sopii erityisesti esikäsittelyvaiheeseen ennen jatkojalostusta.

## 3. Murskaus ja haketus

- Jätepuu murskataan tai haketetaan, jolloin materiaalin koko pienenee ja se on helpommin käsiteltävissä.
- Kyllästetty puu tai likaantunut puu voidaan murskata ennen energiapolttota tai erikoiskäsittelyä.
- Suuritehoiset murskaimet soveltuvat myös seka-aineksen käsittelyyn.

## 4. Magneettinen erottelu

- Murskauksen jälkeen puujätteestä poistetaan magneettisia metalleja (naulat, ruuvit, metalliosat).
- Käytetään erityisesti rakennus- ja purkupuujätteen käsittelyssä.

## 5. Ilmateräsu (pneumaattinen erotus)

- Puujätteen seasta erotellaan kevyempiä materiaaleja, kuten muovia ja paperia.
- Toimii hyvin, kun jätevirta sisältää kevyitä epäpuhtauksia.

## 6. Optinen lajittelu

- Optiset skannerit ja kamerajärjestelmät tunnistavat eriväriset ja erilaatuiset puujakeet.
- Hyödyllinen erityisesti silloin, kun halutaan erottaa maalattu, kyllästetty tai käsittelemätön puu.

## 7. Tiheyserottelu

- Perustuu puun ja vierasaineiden eri tiheyksiin, jolloin esimerkiksi kiviä ja betonia sisältävä jätevirta voidaan puhdistaa.

- Veden tai ilman avulla toimiva tiheyserotin.

Jätepuujakeen jatkojalostamiseksi tarvittavat menetelmät riippuvat jätepuujakeen tyypistä ja laadusta, jonka vuoksi on tarpeen tarkastella eri jättejakeiden käsittelyä teknologian näkökulmasta. Puun laadun varmistamiseksi eri prosessivaiheissa tulee jätepuun laatu testata ja mitata sopivien käsittelymenetelmien tunnistamiseksi. Jätepuun laadun varmistukseen soveltuvia testausmenetelmiä on listattu tässä.

### 1. Visuaalinen tarkastelu

Visuaalinen arviointi on yksinkertainen ja nopea tapa jätepuun laadun mittaamiseen erityisesti lajitteluvaiheessa.

- **Pintapuhtaus:** Tarkistetaan, onko pinnalla likaa, maalia, lakkaa, öljyä tai muita epäpuhtauksia.
- **Rakenne:** Tarkastellaan puun mekaanista kuntoa, kuten halkeamia, lahoa tai muodonmuutoksia.
- **Epäpuhtauksien läsnäolo:** Silmämääräisesti tunnistetaan kiinnikkeet, kuten naulat, ruuvit ja metalliosat.
- **Värimuutokset:** Poikkeavat värit voivat viitata kyllästettyyn tai kemiallisesti käsiteltyyn puuhun.

### 2. Kosteuspitoisuuden mittaus

Puun kosteuspitoisuus vaikuttaa suoraan sen jatkokäyttöön:

- **Mittaustavat:**
  - **Kosteusmittarit (sähköinen resistiivinen tai kapasitanssi):** Mittaavat kosteuden määrää puun pinnassa tai syvemmällä materiaalissa.
  - **Uunikuivausmenetelmä:** Tarkka mutta hitaampi laboratorioanalyysi, jossa punnitaan näytteen massa ennen ja jälkeen kuivaamisen.
- **Merkitys:**
  - Rakennusmateriaaleissa kosteuden tulee olla alhainen (<15–20 %).
  - Energiana hyödynnettäessä alhainen kosteus lisää polton tehokkuutta.

### 3. Kemiallinen analyysi

Kemiallisilla menetelmillä voidaan tunnistaa haitta-aineet ja muut epäpuhtaudet, jotka vaikuttavat puun käyttökelpoisuuteen:

- **Raskasmetallianalyysit:**
  - Esimerkiksi lyijy, kupari, kromi tai arseeni maalatuista tai kyllästetyistä puista.
  - Käytetään laboratorioanalyyssejä, kuten **XRF (röntgenfluoresenssi)** tai ICP-MS (induktiivisesti kytketty massaspektrometria).
- **Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) mittaus:**
  - Maalatuista tai lakatuista puista vapautuvien haitallisten aineiden pitoisuus mitataan kaasuanalyysillä.
- **Spektrometrit ja FTIR-analyysi (infrapunaspektroskopia):**
  - Tunnistaa erilaiset kemialliset yhdisteet ja puumateriaalin koostumuksen.

#### 4. Mekaaniset testit

Mekaanisia testejä voidaan käyttää erityisesti silloin, kun jättepuuta halutaan hyödyntää uudelleen rakennus- tai kalustekäytössä:

- **Puristuslujuus:** Mittaa puun kykyä kestää kuormitusta.
- **Taivutuslujuus:** Testaa, miten puu kestää taivutusta tai joustoa.
- **Tiheysmittaukset:** Tiheys antaa viitteitä puun laadusta ja kosteuspitoisuudesta.

#### 5. Metallien ja epäpuhtauksien tunnistus

- **Optiset anturit ja robottitekniikka:**
  - Kamerajärjestelmät tunnistavat visuaalisesti epäpuhtauksia, kuten maalattuja tai lakattuja kappaleita.
- **Röntgenkuvaus (X-ray):**
  - Auttaa tunnistamaan sisäisiä epäpuhtauksia, kuten nauloja tai haitallisia materiaaleja.

#### 6. Puun koostumuksen mittaus ja lajittelu

- **NIR-teknologia (Near-Infrared):**
  - Lähi-infrapunateknologian avulla voidaan tunnistaa puulaji, pinnan käsittelyaineet ja kosteus.

- **Spektroskooppiset menetelmät:**

- Tunnistavat puun pinnan koostumuksen, kuten maalit, kyllästysaineet ja lakat.

## 7. Biologisen kunnan arviointi

- **Homeen ja lahon tunnistus:**

- Puun biologista kuntoa voidaan arvioida visuaalisesti tai mikrobiologisilla testeillä, joissa selvitetään homeitiöiden tai lahottajasienten esiintymistä.

- **Lahovauriot:** Testataan pinnan ja sisäosan kovuuden tai tiheyden avulla.

## 8. Partikkelikoon mittaus murskauksen jälkeen

Jos jätepuu murskataan hakkeeksi tai lastuiksi:

- **Seulontakokeet:** Määrittävät partikkelikoon jakauman ja tasalaatuisuuden.
- **Kamerapohjaiset mittalaitteet:** Automaattiset järjestelmät arvioivat partikkelien koon ja muodon.

## Pintakäsittely

Mikäli raaka-aineen hyödyntäminen sellaisenaan on mahdollista on tarpeen laadun varmistamiseksi suorittaa tuotteelle jonkinlainen pintakäsittely.

- **Hionta:**

- Tarvittaessa pinnan lika, kuten betoni- tai maaperäjäämät, voidaan poistaa kevyellä hionnalla tai harjauksella.

- **Höyläys:**

- Jatkokäsiteltävä jätepuu voidaan höylätä mahdollisten pintavaurioiden poistamiseksi ja standardoidun tuotteen valmistamiseksi hiontarobotilla tai vastaavalla teknologialla

- **Leikkaus:**

- Jatkokäsiteltävä jätepuu leikataan jatkokäytön kannalta sopivan kokoisiksi kappaleiksi saharobotilla tai CNC-työstökoneella, käyttötarkoituksen mukaisesti.

## Jätejakeiden hyödyntäminen laadun mukaan:

### A-luokan puujäte (puhdas puu):

Puhtaan puun kierrätys ja uudelleenkäyttö on suoraviivaisinta eri jätepuun jakeista, sillä sen hyödyntäminen sellaisenaan ei tarvitse mitään erityisiä toimenpiteitä edellä mainittujen erottelumenetelmien soveltamisen lisäksi. Puhtaan jätepuun tuotteistaminen standardoiduksi tuotteeksi edellyttää lähinnä jonkin tai useamman pintakäsittelymenetelmän hyödyntämistä, sekä yhden tai useamman testausmenetelmän käyttöä laadun varmistamiseksi.

- **Hyödyntäminen (noudattaen EU:n jätehierarkiaa)**
  - Laudat, palkit, liimapuu
  - Kalusteet
  - Lavat ja pakkaukset
  - Puulevyt (lastulevy, vaneri, kuitulevyt)
  - Puukuidun hyödyntäminen eristeiden, selluloosatuotteiden ta biokomposiittien valmistuksessa
  - Biohiili

### B-luokan puujäte (pintakäsitelty puu)

Maalattun tai lakatun puun uudelleenkäytön parantaminen vaatii innovatiivisia menetelmiä, joilla voidaan paremmin tunnistaa pintakäsittelyaineet, sekä vähentää haitallisten aineiden vaikutuksia ja hyödyntää materiaali mahdollisimman tehokkaasti. Tämä edellyttää sekä testausmenetelmiä, että fyysisiä että kemiallisia käsittelymenetelmiä ja uusia kierrätyssovelluksia.

- **Pintakäsittelyn poistaminen**
  - Mekaaninen hionta tai kuorinta
    - Hiomakoneiden, teräsharjojen tai höylien hyödyntäminen pintakerroksen poistamiseksi
    - Työläs prosessi
  - Terminen käsittely
    - Lämpöaltistuksella helpotetaan pintakäsittelyn puun puhdistusta
    - Mahdollinen menetelmä, kun pinnoitteen kemialliset vaikutukset estävät uudelleenkäyttöä
  - Biologiset menetelmät
    - Jotkin mikrobit voivat soveltua haitta-aineiden hajottamiseen
  - Kemiallinen liotus
    - Lakka tai maalipinta liuotetaan sopivaan liuottimeen

- Ympäristövaikutukset liuottimien käytöstä huomioitava
- **Hyödyntämispotentiaali**
  - Hyödyntäminen sellaisenaan rakenteissa tai pakkauksissa, joissa pinnoite ei haittaa uudelleenkäyttöä
  - Murskattu pintakäsitelty puu voidaan potentiaalisesti hyödyntää sideaineiden kanssa rakennelevyiksi (ei-näkyvät rakenteet)
  - Puukomposiitit kierrätetyn muovin kanssa (kapseloi mahdolliset haitta-aineet)
  - Poltto energiaksi tarkoitukseen soveltuvassa polttolaitoksessa, mikäli materiaalia ei voi muuten hyödyntää.

### **C- ja D-luokan puujäte (kyllästetty puu ja vaarallinen jäte)**

Kyllästetty puu sisältää kemiallisia aineita, kuten raskasmetalleja (esim. kromi, kupari ja arseeni) tai orgaanisia kyllästysaineita, jotka tekevät siitä ongelmajätettä. Sen vuoksi kyllästetyn puun käsittelyssä suurimman lisäarvon säilyttäminen keskittyy ympäristövastuullisiin ratkaisuihin, turvalliseen käsittelyyn ja teknologisiin innovaatioihin. Tavoitteena on löytää käyttökohteita, joissa puun kemialliset käsittelyominaisuudet voidaan hyödyntää ja haitta-aineiden leviäminen estää ja tämä voi edellyttää uusien teknologisten ratkaisuiden kehittämistä. Suorassa uudelleenkäytössä on tärkeää, että kyllästetty puu säilyy alkuperäisessä muodossaan mahdollisimman pitkään.

- Hyödyntämispotentiaali
  - **Rakennusmateriaalina ulkokäytössä:**
    - Palkit, tolpat, ja laudat voidaan käyttää uudelleen esimerkiksi:
      - Ulkorakenteissa, kuten terasseissa, aidoissa, siltojen osissa ja rungoissa.
      - Puutarharakenteissa, kuten penkeissä tai pergoloissa.
    - Uudelleenkäytön edellytyksenä on hyväkuntoisuuden tarkistus sekä haitta-aineiden tunnistaminen.
  - **Mekaaninen ja kemiallinen kierrätys**
    - Kehitteillä olevat uuttoon perustuvat menetelmät, joissa haitta-aineet pystyttäisiin erottelemaan puumateriaalista
  - **Komposiittituotteet**

- Murskattu ja seulottu puumateriaali voidaan yhdistää muovimateriaaleihin, joita voidaan hyödyntää ulkorakentamisessa soveltuvien osien
- Kapseloi haitta-aineet rakenteeseen
- **Betonin lisäaineena**
  - Murskattu ja seulottu puumateriaali voidaan käyttää myös betonin sekoitteena parantamaan betonin lujuusominaisuuksia
  - Kapseloi haitta-aineet rakenteeseen
- **Pyrolyysi**
  - Bioöljy, biohiili tai kaasumaiset polttoaineet
  - Suljettu prosessi voi mahdollistaa haitta-aineiden poiston tuotteesta
- **Hyödyntäminen energiana (nykyinen menetelmä)**
  - Poltto edellyttää tarkoitukseen suunniteltuja polttolaitoksia haitallisten päästöjen ja kiinteiden haitta-aineiden kontrolloimiseksi

Haasteena on kyllästetyn puun laadullinen vaihtelu, jonka vuoksi edullisten materiaalin testausmenetelmien ja uusien tuotteiden kehitys yhdessä lainsäädännöllisen kehityksen kanssa on tarpeen kyllästetyn puun turvallisen käytön mahdollistamiseksi.

## 8 Skenaariot/polut

Onnistumisen keinoja analysoimalla ja yhdistelemällä voidaan tunnistaa erilaisia arvoketjun skenaarioita, joissa hankkeen tavoitteet saadaan toteutumaan. Tarkastellaan seuraavaksi ensin arvoketjua ja onnistumisen keinoja vaihe vaiheelta ymmärtääksemme, miten valinnat arvoketjun eri vaiheissa voisivat vaikuttaa hankkeen tavoitteisiin.

## **Purkusuunnitelma**

Kuten edellä todettiin, kierrätyskäyttöön purkamisen huomiointi on kriittistä jo suunnitteluvaiheessa. Purkuyrityksen kannalta onnistunut suunnittelu on urakan kannattavuuden avaintekijä. Vaiheen toteutustapa ei kuitenkaan haastattelun perusteella vaikuta muutoin arvoketjuun merkittävästi. Toisaalta suunnitelmaa varten tehtävä arvio kohteen sisältämistä materiaaleista ja niiden määrästä voi ohjata purkamista, mikä puolestaan voi vaikuttaa esimerkiksi purettavan puun eheyteen ja sitä kautta koko arvoketjuun.

## **Purkaminen**

Purkamisen keskeisimmät valinnat tehdään koneellisen ja käsin purkamisen välillä sekä purkamisen nopeuden ja varovaisuuden välillä. Nämä myös vaikuttavat toisiinsa. Sekä koneellisesti että käsin voidaan purkaa nopeammin tai varovaisemmin. Varovaisella koneellisella purkamisella saadaan purettua tehokkaasti isompia kokonaisuuksia, kuten kattotuoleja, melko ehjinä. Toisaalta isot kokonaisuudet joutuu seuraavaksi purkamaan käsin osiksi. Käsin purkaminen on puolestaan hidasta, mutta sillä saadaan purettua puuta, kuten paneeleja ja koolauksia, yksittäin ja säilyttäen niiden eheyden.

Arvoketjun seuraavien vaiheiden näkökulmasta purkamisella on suuri merkitys sille, mitä siitä pystytään vielä jalostamaan ja kuinka paljon toimenpiteitä siihen vaaditaan. Yksittäiset ja ehjät puukappaleet on kaikkein helpoin lajitella ja väljalostaa, eli puun arvo säilyy silloin parhaiten. Rikkinäiset ja toisissaan kiinni olevat puukappaleet kaipaavat puolestaan enemmän käsittelyä, mikäli niistä pyritään väljalostamaan vielä esimerkiksi sahatavaraa. Toisaalta ne voidaan kustannustehokkaasti murskata puukuitueristeitä ja puristeita varten, ja murskaaminen onkin tyypillinen toimintamalli jo tällä hetkellä. Näin ollen puujakeen tila purkamisen jälkeen ohjaa vahvasti sen jatkohyödyntämistä. Hankkeen tavoitteiden kannalta puu tulisi pyrkiä purkamaan mahdollisimman ehjänä ja yksittäisinä kappaleina niin kauan kuin se on vielä taloudellisesti järkevää, mikä selviää tarkemmin, kun sitä testataan käytännössä.

## Syntypaikkalajittelu

Syntypaikkalajittelu voidaan tehdä kuormalavoille käsin ja koneellisesti. Sen keskeisimmät valinnat koskevat jakeiden määrää ja luokittelua, jotka myös vaikuttavat siihen, täytyykö se tehdä käsin, vai riittääkö koneellinen lajittelu. Mitä useampaan jakeeseen puuta lajitellaan, sitä suoraviivaisempaa sen jatkokäsittely on, sillä jakeet voidaan luokitella käyttötarkoitusta palvelevan. Esimerkiksi sahatavarksi kelpaava puu voi olla oma jakeensa, tai se voidaan jaotella vielä tarkemmin esimerkiksi eri dimensiohaarukoihin. Mitä tarkemmin puu saadaan luokiteltua käyttötarkoituksen perusteella, sitä enemmän vältetään lajittelukustannuksilta myöhemmissä käsittelyvaiheissa. Lajin tarkkuuden noustessa myös tarvittavan käsityön ja jätelavojen määrä kuitenkin nousee, mikä nostaa kustannuksia. Lisäksi se vähentää jakeiden volyymia. Keskeinen kysymys onkin, kuinka tarkkaan puu kannattaa lajitella syntypaikalla.

Lajittelun tarkkuutta ja sen kannattavuutta ohjaavat käytännössä purkutyömaalle mahtuvien jätelavojen määrä, tarvittavat volyymit ja kustannukset. Haastattelujen perusteella työmaille voisi mahtua järkevästi kahdesta neljään lavaa. Lavat tulisi myös saada logistisen tehokkuuden näkökulmasta mahdollisimman täyteen eli jaekohtaisen volyymin tulisi vastata mahdollisimman tarkasti lavan kokoa. Lajittelun tarkkuuden nostaminen myös nostaa käsin tehtävän lajittelun tarvetta, mikä on hitaampaa kuin koneellisesti tehtävä lajittelu ja siten myös kalliimpaa. Haastattelujen perusteella arvoketjua voisi parhaiten palvella alkuun se, jos puut lajiteltaisiin mahdollisuuksien mukaan syntypaikalla neljään jakeeseen esimerkiksi seuraavasti:

- Kierrätysmateriaaliksi kelpaavat
  - sahatavaraksi / raakaponttilaudaksi: yksittäiset, kiinnikkeettömät ja vaurioitumattomat tai vähävaurioiset kappaleet, joiden pituus vähintään X.
  - puukuitueristeiksi: toisissaan kiinni olevat ja puhtaat kappaleet, jotka saavat olla myös vaurioituneita
  - puristeiksi: vaurioituneet, kiinnikkeelliset ja epäpuhtaat kappaleet
- Kierrätysmateriaaliksi kelpaamaton
  - toisissaan kiinni olevat, kiinnikkeelliset, vaurioituneet, epäpuhtaat

Kierrätysmateriaaliksi kelpaavat jakeet voitaisiin ohjata Black Box -prosessiin, kun taas kelpaamaton jae voitaisiin ohjata polttoon. Tarvittaessa voitaisiin toteuttaa myös vähemmän

tarkkaa lajittelua kahteen jakeeseen kierrätysmateriaalikelpoisuuden perusteella, milloin tarkempi lajittelu käyttötarkoituksen perusteella tapahtuisi kiertotalousyrityksessä.

### **Lajittelu ja niputus**

Kiertotalousyrityksessä tapahtuva lajittelu ja sitä seuraava niputus toimivat pitkälti samojen lainalaisuuksien perusteella kuin syntypaikkalajittelukin. Toisin sanoen lajittelun tarkkuus helpottaa arvoketjun seuraavia vaiheita, mutta nostaa se kustannuksia. Kierrätysyrityksen etuna on kuitenkin jätteenlajittelun ydinosaaminen ja siihen erikoistuneet prosessit, joiden ansiosta lajittelu on kustannustehokkaampaa kuin syntypaikalla. Lisäksi kierrätysyritys voi kerätä verrattaen pieniäkin volyymeja puuta per purkutyömaa ja kerryttää tarvittavat kokonaisvolyymit (arviolta väh. 50 tonnia viikossa) keräämältä usealta työmaalta. Kun otetaan vielä huomioon, että Black Box -vaiheessa puuta on jo tarkoitus käsitellä väljalosteeksi mahdollisimman kustannustehokkaasti, kierrätystoimijalta lähtiessään puun olisi hyvä olla lajiteltuna mahdollisimman käsittelyvalmiisiin jakeisiin.

Oletetaan, että puu saapuu kierrätysyritykseen joko kahtena tai neljänä jakeena, kuten edellisessä kohdassa esitettiin. Kierrätysyritys lajittelee tyypillisesti sisääntulevat jakeet kahdesta neljään ulosmenevään jakeeseen per käsittelylinjasto. Kahden jakeen tapauksessa kierrätyskelpoiset -jake voitaisiin lajitella esimerkiksi sahatavaraksi, raakaponttilaudaksi puukuitueristeiksi ja puristeiksi kelpaaviksi jakeiksi. Sahatavaraksi ja raakaponttilaudaksi kelpaava puu voi olla lisäksi tarpeen ajaa vielä yhden linjaston läpi, jossa ne lajitellaan tietyn dimensiohaarukan mukaan.

Puukuitueristeiden ja puristeiden tapauksessa kierrätysyritys voi toki toimia itsekin väljalostajan roolissa, sillä se voi murskata puun ja toimittaa sen lämpölaitoksen sijasta puutuoteteollisuuden valmistajille.

### **Black Box**

Black Box -vaiheessa puuta työstetään väljalosteeksi, kuten sahatavarksi ja raakaponttilaudaksi. Sen merkittävimmät valinnat liittyvät sisääntuleville puukappaleille

tehtävän työstämisen tapoihin ja määrään. Ensinnäkin mitä useampia käsittelyvaiheita tehdään, sitä enemmän puun kustannukset nousevat. Puun käsittelyvaiheet nostavat puun kuutiokustannuksia kymmeniä euroja per käsittelyvaihe ja sormijatkamisen tapauksessa jopa toista sataa euroa. Toiseksi käsittelyn avulla puusta voidaan poistaa väljalosteeseen kelpaamattomat kohdat, kuten maali ja kiinnikkeet. Kolmanneksi valinnat käsittelyn suhteen ohjaavat puusta mahdollisesti työstettäviä väljalosteita. Esimerkiksi murtuneiden kohtien poistaminen sahaamalla voi pienentää kierrätyspuusta jalostettavan sahatavaran dimensiota kohdan sijainnista riippuen.

Nämä valinnat vaikuttavat kustannusten ja syntyvien väljalosteiden lisäksi siihen, kuinka paljon hukkaa, tai sivuvirtaa, arvoketjussa syntyy. Väljalosteeksi työstämisessä syntyvä sivuvirta, kuten murtuneen kohdan sahausessa menetetty puuainees, voidaan kuitenkin ohjata sen luonteesta riippuen esimerkiksi puukuitueristeiden tai puristeiden valmistukseen.

Hankkeen tavoitteiden saavuttamisen näkökulmasta nykyteknologian keinoin Black Box -vaiheessa tehtävän käsittelyn tulisi olla minimaalinen, esimerkiksi vain sahaus ja höyläys, jotta kierrätyspuun loppuhinta ei kasva yli neitseellisen. Sen saavuttamiseksi vaiheeseen sisääntulevan puun tulisi olla mahdollisimman helposti työstettävissä

## 8.1 Kierrätyspuun integrointi rakennusalan kiertotalouteen

Kierrätyspuun käyttö osana laajempaa rakennusalan kiertotaloutta vaatii paitsi teknisiä ja logistisia ratkaisuja myös kulttuurista ja rakenteellista muutosta koko rakennusteollisuudessa. Tällä hetkellä rakennusala perustuu pitkälti lineaariseen materiaalivirtaan, jossa puu käytetään kerran ja sen jälkeen joko poltetaan tai hävitetään muulla tavoin. Siirtyminen kiertotalousmalliin tarkoittaa, että puu suunnitellaan ja käsitellään jo alusta alkaen uudelleenkäytettäväksi, jolloin sen elinkaari pitenee ja ympäristövaikutukset pienenevät merkittävästi.

Kierrätyspuun integrointi kiertotalousajatteluun alkaa jo **rakennusprosessin suunnitteluvaiheessa**, jossa materiaalivalinnoilla, rakenneratkaisuilla ja purettavuuden huomioimisella voidaan mahdollistaa puun tehokas uudelleenkäyttö. Modulaarinen rakentaminen ja elementtirakenteet tarjoavat tähän hyviä mahdollisuuksia, sillä niiden avulla

voidaan suunnitella rakennuksia, joissa materiaalit voidaan elinkaaren lopussa purkaa ja hyödyntää uudelleen ilman merkittävää laadun heikkenemistä.

Toinen keskeinen osa kiertotaloutta on **rakennusten purkumenetelmien kehittäminen**, sillä perinteiset purkutavat, kuten koneellinen murskaus, tekevät kierrätysmateriaalien talteenoton vaikeaksi. Purkuteollisuudessa tulisi siirtyä hallittuun purkamiseen, jossa käyttökelpoinen puumateriaali irrotetaan ja lajitellaan jo työmaalla. Tämä vaatii kuitenkin uusia toimintamalleja, joissa purkutyöstä ei ajatella vain hävittämisprosessina, vaan arvokkaiden materiaalien erotteluna ja talteenottona.

Kierrätyspuun täysimittainen hyödyntäminen kiertotaloudessa edellyttää myös **rakennusalan toimijoiden sitoutumista ja lainsäädännön tukea**. EU:n kiertotaloustavoitteet ja kansalliset ympäristöstrategiat tukevat tätä kehitystä, mutta pelkkä sääntely ei riitä – tarvitaan myös markkinaehtoisia kannustimia, kuten taloudellisia tukia ja verohelpotuksia, jotka rohkaisevat yrityksiä investoimaan kierrätysmateriaalien käyttöön.

Lopulta kierrätyspuun integrointi rakennusalan kiertotalouteen ei ole vain tekninen tai taloudellinen kysymys, vaan myös kulttuurinen muutos, jossa rakennusmateriaalien arvo ja niiden elinkaariajattelu otetaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Tällä hetkellä kierrätyspuun hyödyntäminen on vasta alkuvaiheessa, mutta jos rakennusala siirtyy laajemmin kiertotalouteen, kierrätyspuu voi muodostua keskeiseksi osaksi kestäväää ja resurssitehokasta rakentamista.

## 8.2 Matalalla roikkuvat hedelmät

Kierrätyspuun laajamittainen käyttöönotto vaatii aikaa ja investointeja, mutta lyhyellä aikavälillä on mahdollista hyödyntää niin sanottuja **"matalalla roikkuvia hedelmiä"** – eli kohteita, joissa kierrätyspuun käyttö on helposti toteutettavissa ja joissa taloudelliset, tekniset ja markkinalähtöiset esteet ovat vähäisiä. Tällaiset kohteet voivat toimia ponnahduslautana laajemmalle kierrätyspuun hyödyntämiselle, kun markkinat kehittyvät ja teknologiat kehittyvät.

Ensimmäisiä ja selkeimpiä matalalla roikkuvia hedelmiä kierrätyspuun hyödyntämisessä ovat **puukuitueristeet sekä erilaiset murske- tai hakkeen pohjalta valmistettavat rakennustuotteet**. Näissä tuotteissa puun mekaaniset ominaisuudet eivät ole kriittisiä, vaan ratkaisevaa on materiaalin puhtaus ja kemiallisten jäämien vähäisyys.

Puukuitueristeiden valmistuksessa puuainees hajoitetaan joka tapauksessa kuiduiksi, joten myös kierrätyspuun vaihteleva rakenne on hyväksyttävissä, kunhan materiaali täyttää laatuvaatimukset. Tällaiset eristeet voisivat korvata neitseellisestä puusta valmistettuja eristemateriaaleja ja tarjota samalla kilpailukykyisen vähähiilisen vaihtoehdon mineraalivillalle ja muille synteettisille eristeille.

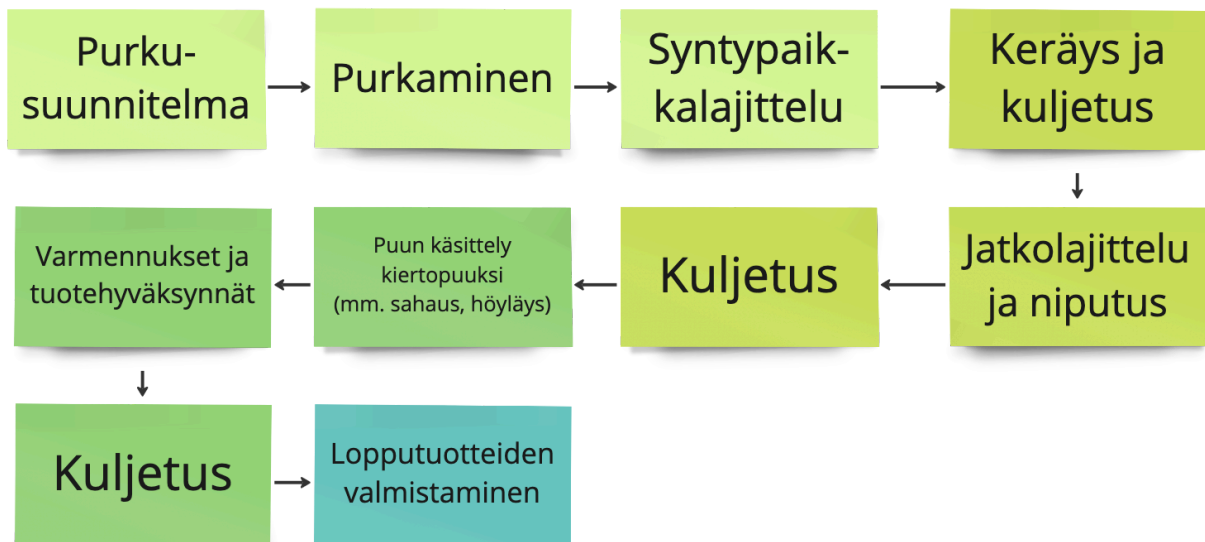
Vastaavasti **murskeesta tai hakkeesta valmistettavat rakentamisen puristetut tuotteet**, kuten **tuulensuoja- ja puukuitueristelevyt**, mahdollistavat kierrätyspuun hyödyntämisen käyttökohteissa, joissa alkuperäisen puun mitta, lujuus tai rakenne eivät ole ratkaisevia. Näissä tuotteissa puu toimii sitovana kuitumassana, ja prosessointi voidaan toteuttaa siten, että lopputuote täyttää tekniset vaatimukset ilman, että puun alkuperäinen muoto tai rakenne vaikuttavat käyttökelpoisuuteen.

Toisena matalalla roikkuvana hedelmänä voidaan pitää **hyvälaatuisesta kierrätyspuusta valmistettavaa sahatavaraa ja raakaponttilautaa**. Mikäli purkupuusta saadaan eroteltua riittävän pitkiä, ehjiä ja puhtaita kappaleita, niitä voidaan höylätä uudelleen ja sahata standardimittoihin esimerkiksi ulkovuorauslaudoiksi, tuulensuojaksi tai sisäverhouksiin tarkoitetuiksi paneeleiksi. Näissä käyttökohteissa ei aina edellytetä kantavuutta tai lujuusluokitusta, ja siten ne tarjoavat mahdollisuuden hyödyntää kierrätyspuuta arvokkaampina tuotteina ilman raskaita jalostusvaiheita. Tässä mielessä sahatavara ja ponttilauta edustavat käyttöalueita, joissa puun alkuperäinen rakenne ja mitat ovat hyödyksi ja joissa kierrätyspuu voi saavuttaa korkeamman markkina-arvon kuin kuitu- tai murskepohjaisissa tuotteissa.

Kolmas matalalla roikkuva hedelmä on **rakentamisessa ja logistiikassa käytettävät ei-kantavat puurakenteet ja pakkaukset**. Monet teollisuudessa ja rakennustyömailla käytettävät **puulavat, suojarakenteet ja muottipuut** eivät vaadi korkeaa mekaanista lujuutta, ja niissä kierrätyspuuta voidaan hyödyntää ilman merkittäviä teknisiä haasteita. Kierrätyspuun käyttö näissä sovelluksissa voi vähentää neitseellisen puun kulutusta ja samalla auttaa yrityksiä täyttämään kestävä kehityksen tavoitteensa ilman, että se vaatii monimutkaisia sertifiointiprosesseja tai mittavia investointeja tuotantoteknologiaan.

Matalalla roikkuvien hedelmien skenaario tarjoaa siis nopeita ja saavutettavissa olevia mahdollisuuksia kierrätyspuun hyödyntämiseen, ilman että se vaatii merkittäviä rakenteellisia muutoksia rakennusalaan tai massiivisia teknologisia investointeja. Näiden varhaisvaiheen sovellusten kautta voidaan kehittää toimintamalleja, laatuvaatimuksia ja logistiikkaketjuja, jotka mahdollistavat kierrätyspuun käytön laajenemisen myös teknisesti haastavampiin sovelluksiin, kuten kantaviin rakenteisiin ja puurakentamisen moduuleihin.

Edellä kuvatun perusteella voidaan tunnistaa nk. matalalla roikkuvien hedelmien toimintamalli hankkeen tavoitetilan saavuttamiseksi nykyisiä toimijoita ja teknologioita hyödyntämällä sekä prosesseja sopeuttamalla. Toimintamalli on ensin kuvattu tiiviisti alla kuvassa 5 ja avattu sen jälkeen hieman tarkemmin. Malli keskittyy erityisesti sahatavaraan, vaikka siinä käsitellään muitakin väljalosteita.



Kuva 5. Matalalla roikkuvien hedelmien toimintamalli sahatavaralle.

1. Purkusuunnitelmassa huomioidaan purkaminen puun kierrätyskäyttöä varten.
2. Purkaminen toteutetaan yhdistelmällä koneellista ja käsinpurkua, jolla osa puusta saadaan purettua ehjänä ja yksittäisinäkin kappaleina.
3. Puu lajitellaan syntypaikalla kierrätysyrityksen toimittamille lavoille mielellään neljään neljään, mutta tarvittaessa kahteen jakeeseen. Jakeet ovat:
  - a. Kierrätysmateriaaliksi kelpaava puu
    - i. sahatavaraksi / raakaponttilaudaksi: yksittäiset, kiinnikkeettömät ja vaurioitumattomat tai vähävaurioiset kappaleet, joiden pituus vähintään X.
    - ii. puukuitueristeiksi / eristelevyiksi: toisissaan kiinni olevat ja puhtaat kappaleet, jotka saavat olla myös vaurioituneita
    - iii. puristeiksi: vaurioituneet, kiinnikkeelliset ja epäpuhtaat kappaleet
  - b. Kierrätysmateriaaliksi kelpaamaton puu
    - i. toisissaan kiinni olevat, kiinnikkeelliset, vaurioituneet, epäpuhtaat
4. Kierrätysyritys noutaa lavat ja ottaa ne tarkempaan lajitteluun.

5. Jakeet esilajitellaan painon perusteella koneellisesti. Kevyet puut siirretään linjastolajitteluun, jossa sahatavaraksi ja raakaponttilaudaksi kelpaava puu lajitellaan tarkemmin neljään eri dimensiohaarukkaan. Raskaammat puut lajitellaan mahdollisuuksien mukaan suoraan nippuihin. Tarvittaessa puita voidaan katkoa lajittelun yhteydessä, jos se on tarpeen lajittelun ja niputtamisen kannalta. Muu kuin sahatavaraksi tai raakaponttilaudaksi tarkoitettu puu voidaan mahdollisesti murskata ja erotella metalleista kierrätysyrityksen murskaimilla ja toimittaa näistä puutuotteita valmistaville toimijoille.
6. Sahatavaraksi ja raakaponttilaudaksi tarkoitettu puu toimitetaan Black Box -toimijalle, joka voi olla esimerkiksi puutuoteteollisuuden toimija, jolla on mahdollisuus sahata ja höylätä heterogeenistä puumassaa.
7. Sahauksen ja höyläyksen jälkeen valmistuvalla sahatavaralla ja raakaponttilaudalle tarvitaan vielä varmennukset ja tuotehyväksynät, joiden tarkempi käsittely jää tämän esiselvityksen ulkopuolelle. Varmennukset ja tuotehyväksynät voivat edellyttää toimenpiteitä jo ennen puun käsittelyä Black Box -vaiheessa, esimerkiksi kun kierrätysyritys ottaa puuta vastaan purkutyömaalta ja tarkastaa sen.
8. Lopuksi kierrätysrahatavara myydään markkinoilla kuin mikä tahansa muu sahatavara neitseellisen hinnalla.

On huomioitava, että tämä toimintamalli edellyttää kuitenkin testaamista käytännössä, mikä on haastateltujen toimijoiden mukaan kriittistä kierrätyspuun potentiaalin realistiselle arvioimiselle taloudellisesta ja teknisestä näkökulmasta.

Tarkastellaan seuraavaksi, mitä arvoa vielä hyödyntämätön teknologia voisi tarjota arvoketjulle.

### 8.3 Teknologiapolku

Tarvittavat teknologiat mahdollisimman tehokkaan jätepuun hyötykäytön mahdollistamiseksi on kuvattu alla prosessivaiheittain. Teknologioiden osalta on huomioitu käytössä olevat teknologiat ja potentiaaliset teknologiat erikseen

Kun tarkastellaan jätepuun käsittelyn prosessointivaiheita ja erilaisten teknologisten ratkaisujen soveltuvuutta jätepuun käsittelyyn tulee kiinnittää erityistä huomiota käytännöllisiin ratkaisuihin ja niiden kustannustekijöihin, teknologioiden soveltuvuuden lisäksi. Jätepuun prosessoinnin alkupäässä huomio kiinnittyy materiaalien tunnistamiseen jo purkusuunnitelmaa tehdessä, jolloin voidaan jo alustavasti tunnistaa materiaaleja ja löytää suurin osa käyttökelpoisista rakenteista, jotka voivat soveltua uudelleenkäytettäväksi.

Purkusuunnitelmaa tehdessä voisi olla jo mahdollista visuaalisen tarkastusta, sekä konenäköä ja tekoälyä hyödyntämällä löytää optimaaliset tavat rakenteiden purkamiseksi lisäarvo säilyttäen. Tarvittaessa tässä vaiheessa voidaan hyödyntää myös spektrianalyysiä valittujen rakenteiden tutkimiseksi.

Mitä ehjempänä materiaalit saadaan käsittelyyn, sitä paremmin jätepuun arvo saadaan säilymään. Tällöin erityistä huomiota tulisikin kiinnittää siihen, miten potentiaalisesti arvokkaimmat rakenteet saataisiin säilytettyä ehjinä ja näiden osalta käsinpurku tai isommassa skaalassa konenäköä hyödyntävän purkurobotin hyödyntäminen voivat tulla kyseeseen. Tällaiset rakenteet tulisi irrottaa ja erotella syntypaikalla mahdollisimman tehokkaan ja arvon säilyttävän prosessoinnin varmistamiseksi, samalla kun vähempiarvoiset ja prosessointia vaativat rakenteet tulisi käsitellä erikseen materiaalivirtojen käsittelyyn tehdyn suunnitelman mukaisesti. Syntypaikalta materiaalit tulisi suojata ja saattaa jatkokäsittelyyn mahdollisimman pian mahdollisten kosteus ja mikrobivaurioiden välttämiseksi.

Erottelulaitoksessa materiaalivirrat tulisi linjastolla erotella konenäköä ja spektrimenetelmiä hyödyntäen puun laadun mukaisesti puhtaaseen, pintakäsiteltyyn ja kyllästettyyn puuhun ja nämä jakeet edelleen tulisi lajitella koon mukaisesti optimaalisen jatkokäytön varmistamiseksi.

Tarkastellaan mitä teknologioita on nykyisellään käytettävissä ja mitä teknologioita pitäisi ottaa käyttöön jalostamisen saannon maksimoimiseksi mahdollisimman

kustannustehokkaasti. Alla on vertailtu nykytilaa ja jätepuun käyttöasteen kasvattamisen kannalta potentiaalista teknologiapolkua.

- Purkusuunnitelma:
  - Käytössä olevat teknologiat: visuaalinen tarkastelu, laboratoriotestaukset mm. vaarallisten aineiden ja jakeiden tunnistamiseksi.
  - Potentiaaliset menetelmät: Kohteiden kuvannus hyödyntäen NIR-kuvannusta materiaalien laadun kartoittamiseksi ja purkukohteen materiaalikartan laatimiseksi.
- Purkaminen:
  - Käytössä olevat teknologiat: purkukone, käsin purkaminen.
  - Potentiaalisimmat menetelmät: Digitaalinen tuotepassi (aikanaan) tuotteiden ja materiaalivirtojen jäljitettävyyden ja laadun varmistamiseksi, Purkurobotit, joiden avulla lisäarvolliset jätepuujakeet voidaan erotella jo purkuvaiheessa hyödyntäen purkusuunnitelman aikana laadittua materiaalikartoitusta. Purkurobotti ohjelmoitaisiin irrottamaan purkusuunnitelman kartoitusvaiheen aikana tunnistetut lisäarvolliset materiaalit erilleen.
- Syntypaikkalajittelu:
  - Käytössä olevat teknologiat: Jätelavat ja jätteen murskaus
  - Potentiaalisimmat menetelmät: Jätelavat, jättejakeiden erottelu käyttökelpoisuuden mukaisesti jakeisiin, niputtaminen kuljetustiiviiden parantamiseksi.
- Logistiikka: seuranta
  - Käytössä olevat teknologiat: Ajosuunnitelmat
  - Potentiaaliset teknologiat: RFID- tai QR-koodien hyödyntäminen logistiikkatilausten luomiseksi purkupaikalla logistisen tehokkuuden maksimoimiseksi. Osana purkusuunnitelmaa ja purkurobotin käytön suunnittelua voitaisiin huomioida myös jäterobotin erottelemien jättejakeiden kuljetuksen logistiset tarpeet robotin käytön tehokkuuden maksimoimiseksi.
- Lajittelu ja niputus:
  - Käytössä olevat teknologiat: erottelu mahdollista dimensioiden mukaan
  - Potentiaaliset teknologiat: koneellinen lajittelulinjasto purkukohteessa, teknologioita on kehitteillä.
- Black box käsittely ja tuotteistus:
  - Käytössä olevat teknologiat: erottelulinjastot, hionta ja sahausautomaatiikka

- Potentiaaliset teknologiat: spektraalianalyysiä, konenäköä ja tekoälyä hyödyntävät menetelmät purkukohteiden kartoituksessa, purkurobotiikka, automatisoidut [kiinnikkeidenpoistolinjastot](#), automatisoidut erottelulinjastot.

## 9 Analysointi

### 9.1 Liiketoiminnan edellytykset ja mahdollisuudet

Vaikka kierrätyspuun hyödyntämisen tulevaisuudenkuvaan liittyy merkittäviä mahdollisuuksia, sen käytännön toteutettavuus edellyttää tarkkaa tarkastelua liiketoiminnallisista lähtökohdista. Teollisen mittakaavan toiminta ei synny pelkän teknologisen valmiuden tai markkinakysynnän perusteella, vaan sen on nojaututtava kannattavaan, kustannustehokkaaseen ja volyyymiin perustuvaan toimintamalliin.

Edellä kuvattujen onnistumisen keinojen ja niitä hyödyntävien skenaarioiden perusteella kierrätyspuun tuominen markkinoille vaikuttaisi mahdolliselta, mutta ei suinkaan helpolta. Kun kierrätyspuun hinnan yläraja on asetettu neitseellisen tasolle, liiketoiminnan kannattavuus perustuu kustannustehokkuuteen, jotta myytyä puukuutiota kohti saadaan mahdollisimman suuret katteet. Samaten liiketoiminnan tuottavuus perustuu arvoketjun läpi virtaavan puun määrään kerrottuna sen katetuotolla.

Tässä vaiheessa on aiheellista siirtyä strategisista skenaarioista ja kehityspoluista kohti konkreettisia edellytyksiä, joiden täytyessä kierrätyspuun hyödyntäminen voisi muodostaa kestävä ja elinkelpoisen liiketoimintamallin. Alla esitetty analyysi pohjautuu siihen oletukseen, että kierrätyspuun myyntihinta on sidoksissa neitseellisen puun markkinahintaan, ja että kannattavuus on saavutettavissa vain riittävän tehokkaalla prosessilla ja tasaisella materiaalivirralla.

Seuraavassa jäsennetään ne keskeiset ehdot ja volyymivaatimukset, joiden perusteella kierrätyspuun jalostus- ja hyödyntämismahdollisuuksia voidaan arvioida panos–tuotos-ajattelun kautta.

Näin ollen liiketoimintamahdollisuuksien näkökulmasta houkuttelevimpia puujakeita ovat sellaiset, jotka täyttävät seuraavat ehdot:

1. jakeen saatavuus (volyyymi) ja hyödynnettävyys on mahdollisimman suuri
2. tarvittu käsittely/prosessointi väljalosteeksi on mahdollisimman vähäinen
3. jakeesta valmistettävien väljalosteiden kysyntä on tasaista.

Ensimmäisen ehdon täyttämiseksi rakennuksista purettavasta puusta on pyrittävä hyödyntämään mahdollisimman suuri osa. Rakennuksista on keskiarvolta saatavissa seitsemänkymmentä kiloa puujätettä per kerrosneliometri. Kierrätystoimija tarvitsee puolestaan haastatteluissa annetun arvion mukaan vähintään viisikymmentä tonnia puujätettä viikossa prosessiinsa, jotta volyyymi on riittävää. Tämä tarkoittaisi vähintään yli seitsemänsadan kerrosneliön purkumäärää viikossa, mikäli kaikki puujäte voitaisiin hyödyntää. Todellisuudessa hyödynnettävän puun osuus voi olla paljon pienempi, jolloin purettavaa tarvitaan vastaavasti enemmän. Hyödyntämistason laskiessa purettavien kerrosneliöiden tarve nousee vastaavasti. Ehdon täyttämistä voidaan edistää keräämällä puuta mahdollisimman usealta eri purkuyritykseltä.

Toisen ehdon täyttämiseksi tarvitaan joko sopiva määrä väljalosteita, joihin jakeet ovat helposti jalostettavissa tai yksi väljaloste, johon kaikki hyödynnettävät jakeet on helposti jalostettavissa. Tämä johtuu siitä, että käsittely- ja prosessointivaiheiden lisääntyessä kierrätyspuun kustannukset luonnollisesti kasvavat. Yksi tämän esiselvityksen keskeinen havainto oli, että tavoitehintataso ei siedä kovin montaa käsittelyvaihetta (ks. kohta työvaiheiden kustannuksista) ennen kuin se ylittyy. Sopiva määrä väljalostevaihtoehtoja, esimerkiksi kahdesta neljään, voi vähentää tarvittavien työvaiheiden määrää, jos jae ja lopputuote ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Näin myös materiaaliin sitoutunut arvo pysyy mahdollisimman korkealla.

Toinen vaihtoehto on valita yksi väljaloste, kuten murska tai hake, johon useita eri jakeita voidaan työstää, koska prosessiin kelpaavat monentyyppiset puujakeet. Tällöin kuitenkin osa puuhun sitoutuneesta arvosta saatetaan kuitenkin hukata, mikäli esimerkiksi suuridimensioinen, hyväkuntoinen, puhdas ja pitkä puupalkki murskataan, kun se olisi voitu käyttää lähes sellaisenaan uudestaan. Toisaalta puun murksaaminen puukuitueristettä on kaskatointiperiaatteen näkökulmasta parempi vaihtoehto kuin polttoa varten murskaaminen, koska puuta voidaan silloin vielä hyödyntää materiaalina energiankäytön sijasta.

Kolmannen ehdon täyttämiseksi lopputuotteiden tulee olla riittävän yleisesti hyödynnettyjä, jotta niiden menekki on tasaista. Loppuasiakkaiden asenneilmapiiri kierrätystuotteita kohtaan on myös ratkaisevassa asemassa tämän suhteen. Aiempien selvitysten perusteella asenneilmapiiri voisi olla suotuisa tuotteita kohtaan, jotka eivät ole sisäilman kanssa kosketuksissa.

Edellä mainittujen ehtojen täyttämiseksi tässä esiselvityksessä on jo esitetty "Potentiaaliset tuotokset", jossa kuvataan panos-tuotos -ajattelun kautta hyödynnettävissä olevia jakeita ja

niistä valmistettavia väljalosteita. Mikään jae tai väljaloste ei todennäköisesti riitä tällä hetkellä yksinään kannattavaan liiketoimintaan, sillä volyymit jäävät todennäköisesti liian pieniksi. Sen vuoksi maltillinen yhdistelmä erilaisia jakeita ja niihin sopivia väljalosteita vaikuttaisi houkuttelevimmalta vaihtoehdolta tässä kohtaa. Tätä ajatusta tulee luonnollisesti testata vielä käytännössä.

## 9.2 Arvoketjussa tarvittavat toimijat

Yhtäältä Black Box -prosessi voi olla haastattelujen perusteella mahdollista toteuttaa nykyisten toimijoiden kesken. Tarvittava osaaminen ja prosessit löytyvät suurimmilta osin nykyisiltä toimijoilta esimerkiksi jätepuun kierrättämiseksi uudeksi sahatavaraksi. Toisaalta tarvittavat toimijat määräytyvät sen perusteella, mihin väli- ja lopputuotteisiin kierrätyspuuta on tarkoitus käyttää ja kuinka iso osa jätepuusta pyritään kierrättämään.

Arvoketju voi esimerkiksi koostua purku-, kierrätys- ja puunjalostusalan yrityksistä, jotka tuottavat markkinoille kierrätyspuusta valmistettua sahatavaraa. Tällainen arvoketju voi kuitenkin hyötyä ulkopuolisesta avusta puun labratestaamisessa sekä yhteenkiinnittyneiden puukappaleiden erottelussa ja kiinnikkeiden, naulojen ja muiden vastaavien poistamisessa puusta, sillä ainakaan haastatellut yritykset eivät pitäneet näitä vaiheita itselleen houkuttelevina. Vaikka esimerkiksi yhteenkiinnittyneiden puukappaleiden erottelu toisistaan voi onnistua keneltä tahansa, sen tekeminen kustannustehokkaasti, puun kunnan säilyttäen ja hukkan minimoiden voi edellyttää korkeaa osaamista ja teknologian tasoa.

Näin ollen kehittyneemmissä kierrätyspuun arvoketjuissa, joissa jätepuusta tavoitellaan hyödynnettäväksi suurin osa, saatetaan tarvita teknologiatoimijoita, jotka perehtyvät puun kierrätyksen haasteisiin, ja kehittävät niihin ratkaisuja. Lisäksi arvoketjussa voi olla tarve uudelleenkäyttöön, joka fasilitoi muiden toimijoiden toimintaa ja ottaa hoitaakseen muille kannattamattomia arvoketjun vaiheita.

### **Arvoketjun yhteistyön merkitys kierrätyspuun hyödyntämisessä**

Yksi keskeinen este kierrätyspuun laajamittaiselle hyödyntämiselle on se, että täysin integroitunutta ja vakiintunutta arvoketjua ei vielä ole olemassa. Vaikka purkupuuta syntyy suuria määriä, materiaali päättyy pääosin energiakäyttöön, koska uudelleenkäyttöön tai materiaali kierrätykseen perustuva toimitusketju on vielä hajautunut ja epäkypä.

On kuitenkin tärkeää huomata, että nykyiset toimijat eivät ole lähtökohtaisesti kyvyttömiä hyödyntämään purkupuuta. Useilla teollisilla ja pienemmillä valmistajilla on jo nyt valmiuksia

sopeuttaa tuotantoprosessejaan siten, että ne voivat käsitellä ja hyödyntää kierrätyspuuta. Tämä onnistuu esimerkiksi valikoimalla hyväkuntoista materiaalia, hyödyntämällä käsityöpainotteisia ratkaisuja, tai käyttämällä kierrätyspuuta tuotteissa, joissa sen mitta- tai lujuusvaatimukset eivät ole kriittisiä.

Silti ongelmana on se, että yhtenäistä, toimivaa arvoketjua ei ole vielä rakentunut. Puun kiertotalouden näkökulmasta purkuryitykset, materiaalinkäsittelijät ja tuotevalmistajat toimivat vielä erillään, eikä materiaalivirtaa ohjata systemaattisesti kierrätystarkoituksiin. Puuttuu selkeästi määritelty prosessi siitä, kuka lajittelee, kuka vastaanottaa, kuka jalostaa ja kuka hyödyntää kierrätyspuun, ja millä ehdoilla tätä materiaalia liikkuu toimijalta toiselle.

Arvoketjun rakentaminen edellyttääkin uudenlaista yhteistyötä ja koordinaatiota. Ensivaiheessa tämä voisi tarkoittaa pilottihankkeita, joissa alueellisesti tai toimialakohtaisesti kokeillaan purkupuuhun perustuvia tuotantoketjuja. Näissä voidaan yhdistää nykytoimijoiden osaamista ja tuotantokykyä uudenlaiseen materiaalivirtaan. Tavoitteena olisi tunnistaa, missä kohtaa ketjua syntyy pullonkauloja – ja miten ne voidaan ratkaista esimerkiksi logistiikan, laadunvarmistuksen tai sopimus pohjan avulla.

Toisin sanoen: vaikka purkupuuta osataan jo käsitellä, materiaalin virtaaminen tehokkaasti ja kannattavasti läpi tuotantoketjun edellyttää uudenlaista yhteispeliä ja luottamusta. Kierrätyspuun hyödyntäminen ei ole pelkästään tekninen tai käsityötaidollinen kysymys – vaan ennen kaikkea liiketoiminnallisen yhteistyön ja roolien jakamisen haaste, jonka ratkaiseminen voi luoda kokonaan uuden kiertotalouteen perustuvan arvoketjun rakennusmateriaalien kentälle.

### 9.3 Teknologia

Kierrätyspuun hyödyntäminen rakennusmateriaalina edellyttää kehittyneitä teknologisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat puun tehokkaan purkamisen, erottelun, puhdistuksen ja jatkojalostuksen. Tällä hetkellä suurin osa rakennus- ja purkujätteestä saatavasta puusta päättyy energiantuotantoon, koska puujakeiden purkaminen, lajittelu ja prosessointi uudelleenkäyttöä varten on kallista ja teknisesti vaativaa. Erityisesti ongelmia aiheuttaa kierrätyspuun epäpuhtauksien poistaminen, sillä puun joukossa voi olla nauloja, ruuveja, maalijäämiä tai muita kemiallisia käsittelyaineita, jotka tekevät sen uudelleenkäytöstä haasteellista.

Teknologian osalta olemassa olevien kuvantamisteknologioiden käyttöönotolla voisi olla merkittäviä mahdollisuuksia purkukohteiden kartoituksen osalta. Mikäli purkukohteiden

uudelleenkäytön kannalta arvokkaimmat osat pystytään selvittämään lähtökohtaisesti osana purkusuunnitelman laatimista, tarjoaa tämä mahdollisuuden ennakoita jo toteutussuunnittelun osalta käytettävissä olevan jätetuun määriä, laatua ja arvonlisää nykyistä tarkemmin. Tarkemmalla tiedolla voidaan tehdä päätöksiä käytettävistä purkumenetelmistä, teknologioista ja syntypaikkajaoitteusta purkukohdekohtaisesti. Nykyisellään iso osa jätetuun lisäarvopotentialista menetetään jätetuun murskauksessa jo purkukohteessa.

Purkamisen automatisointi ja mahdollisten purkurobottien käyttö jätetuun kierrättämiseksi edellyttää purkukohteeseen liittyvän materiaalitiedon hyödyntämistä, jotta mahdollisimman suuri osa lisäarvolla jätetuusta voidaan kerätä talteen.

Eroteltujen jätetuujakeiden käsittelyssä haasteita liittyy erityisesti jätetuussa olevien kiinnikkeiden poistamiseen, jotka heikentävät jätetuun laatua uudelleenkäytön kannalta ja jotka voivat vahingoittaa käsittelylaitteistoja. Kiinnikkeiden irrottaminen jätetuusta vaatii nykyisellään manuaalisia prosessivaiheita, joiden automatisointi on tarpeen esimerkiksi kiinnikkeiden tunnistuksen, irrottamisen (sahaus, leikkaus, irrotus) ja erottelun (magneetti) osalta, jotta erottelukustannukset olisivat kilpailukykyisiä suhteessa neitseelliseen puuhun. Jotta jätetuun käsittelyn automatisointi olisi nykyisellään kannattavaa, tulisi jätetuun käsittelylaitosten olla maantieteellisesti keskitettyjä riittävien volyymien mahdollistamiseksi.

Kehittyneet optiset ja mekaaniset lajittelumenetelmät voivat ratkaista osan näistä ongelmista. Esimerkiksi konenäköön perustuva tunnistusteknologia voi auttaa erottelemaan maalatut ja käsittelemättömät puumateriaalit toisistaan, mikä nopeuttaa kierrätyskelpoisen puun käsittelyä. Samoin metallien poistamiseen voidaan käyttää tehokkaita magneetti- ja pyörrevirtaerottimia, jotka automaattisesti irrottavat naulat ja ruuvit suuremmista puukappaleista.

Toinen tekninen haaste liittyy puun kosteuspitoisuuden hallintaan. Kierrätyspuun kosteustaso voi vaihdella merkittävästi riippuen sen alkuperästä ja säilytysolosuhteista, mikä vaikuttaa sen jatkojalostukseen. Puukuitueristeiden valmistuksessa tai uusien rakennusmateriaalien tuotannossa on tärkeää, että puun kosteus on vakioitu tietylle tasolle, jotta materiaalin laatu säilyy ja se täyttää teollisuuden laatuvaatimukset. Tässä voivat auttaa tehokkaat kuivausteknologiat, jotka optimoivat puun kosteuden ennen sen jatkojalostusta.

Vaikka teknisiä ratkaisuja on jo kehitetty ja niitä sovelletaan osittain puuteollisuudessa, kierrätyspuun käsittelyprosessit eivät ole vielä täysin integroituneet rakennusalan arvoketjuun. Jotta kierrätyspuu voisi korvata neitseellistä puuta laajamittaisesti, tarvitaan

lisää investointeja automatisoituihin lajittelujärjestelmiin, kosteudenhallintaan ja puhdistusteknologioihin. Lisäksi olisi tärkeää kehittää skaalautuvia prosesseja, jotka mahdollistavat kierrätyspuun käsittelyn kustannustehokkaasti suurissa erissä ilman, että materiaalin laatu kärsii.

#### 9.4 Ekologiset ja ympäristölliset vaikutukset kierrätyspuun hyödyntämisessä

Kierrätyspuun laajamittainen hyödyntäminen ei ainoastaan tarjoa taloudellisia ja teknologisia etuja, vaan sillä on myös merkittäviä ympäristöhyötyjä. Rakennus- ja purkupuujätteen kierrättäminen vähentää neitseellisen puun tarvetta, mikä auttaa säästämään luonnonvaroja ja vähentämään metsien hakkuupainetta. Lisäksi kierrätyspuun käyttö voi alentaa rakennusmateriaalien tuotannon hiilijalanjälkeä, mikä on keskeinen tavoite sekä EU:n vihreän siirtymän ohjelmassa että Suomen kansallisissa ilmastotavoitteissa.

Merkittävä ympäristöetu syntyy siitä, että kierrätyspuu voi sitoa hiiltä pidemmäksi aikaa. Neitseellisen puun käyttö esimerkiksi kertakäyttöisissä rakenteissa tai polttoaineena vapauttaa hiilidioksidia ilmakehään nopeammin, kun taas kierrätettynä puu voi säilyä osana rakennuksia tai muita tuotteita jopa vuosikymmeniä. Tämä pidentää materiaalin elinkaarta ja siirtää hiilen vapautumista, mikä tukee rakennussektorin hiilineutraaliustavoitteita.

Toisaalta kierrätyspuun ympäristövaikutuksiin liittyy myös haasteita, erityisesti **kemiallisten jäämien ja saasteiden hallinnassa**. Rakennuspuun elinkaaren aikana siihen on voinut kertyä maalijäämiä, liimoja, kyllästysaineita ja muita kemikaaleja, jotka voivat olla haitallisia sekä ihmisten terveydelle että ympäristölle. Jos kierrätyspuuta ei käsitellä asianmukaisesti, se voi vapauttaa epäpuhtauksia esimerkiksi poltossa tai hajoamisprosessissa.

Ympäristövaikutusten minimointi edellyttää tehokkaita lajittelu- ja puhdistusprosesseja, joissa kemiallisesti käsitelty puu erotetaan turvallisesti uudelleenkäytettävästä materiaalista. Lisäksi kierrätyspuun käyttöön liittyvä logistiikka on optimoitava niin, että kuljetukset ja käsittelyprosessit eivät aiheuta tarpeettomia päästöjä. Mikäli nämä haasteet pystytään ratkaisemaan, kierrätyspuusta voi tulla yksi tärkeimmistä keinoista vähentää rakennusalan ympäristökuormitusta ja edistää kestävästä kehitystä.

Tulevaisuudessa kierrätyspuun ekologinen rooli voi korostua entisestään, kun rakennusteollisuus siirtyy yhä vahvemmin kiertotalousmalliin. Sääntely, yritysten vapaaehtoiset vastuullisuusohjelmat ja kuluttajien lisääntyvä tietoisuus kestävästä

materiaaleista voivat kaikki vauhdittaa kierrätyspuun käyttöä ja tehdä siitä keskeisen osan vähähiilistä rakentamista.

## 10 Johtopäätökset

Siirtyminen rakennuksista puretun puun polttamisesta sen kierrättämiseen on merkittävä muutos, joka edellyttää sekä teknologisia ratkaisuja että liiketoimintamallien uudistamista.

Nyky- ja tavoitetilan ero on merkittävä

Rakennuksista puretun puun siirtyminen poltosta materiaalkierrätykseen vaatii huomattavia muutoksia nykyisiin toimintamalleihin. Nykytilanteessa suurin osa purkupuumateriaalista päätyy energiantuotantoon, koska sen erottelu ja käsittely kierrätystarkoituksiin on kallista ja työvoimavaltaista. Tavoitetilassa kierrätyspuusta tulisi laajasti hyödynnettävä rakennusmateriaali, joka voisi korvata neitseellistä puuta eri sovelluksissa.

Tämän muutoksen toteuttaminen edellyttää, että kierrätyspuun **hintaa, laatua ja prosessointikustannukset ovat kilpailukykyisiä neitseellisen puun kanssa**. Laadun varmistamiseksi tarvitaan tehokkaampia lajittelu- ja käsittelymenetelmiä, jotka pystyvät takaamaan, että kierrätyspuu täyttää teollisuuden laatuvaatimukset.

Prosessointikustannusten osalta materiaalin logistiikka ja jalostus täytyy optimoida, jotta kierrätyspuun tuotantokustannukset pysyvät kilpailukykyisinä. Lisäksi asiakkaiden ja teollisuuden toimijoiden on saatava riittävästi tietoa kierrätyspuun mahdollisuuksista ja sen käytön hyödyistä, jotta kysyntä kasvaa ja markkinat kehittyvät.

Teknologiat kehittyvät, mutta standardit puuttuvat

Vaikka kierrätyspuun käsittelyyn liittyvät teknologiat, kuten optinen lajittelu, automatisoitu purkaminen ja mekaaninen puhdistus, ovat kehittyneet, niiden laajamittainen käyttöönotto on vielä kesken. Yksi suurimmista haasteista on **standardoinnin puute** – ilman yhtenäisiä laatuvaatimuksia ja varmennusmenettelyjä kierrätyspuun käyttö teollisuudessa on epävarmaa ja hidasta.

Tällä hetkellä ei ole kattavia kansainvälisiä tai kansallisia standardeja, jotka määrittäisivät, miten kierrätyspuun laatua arvioidaan ja mitä sertifiointimenettelyjä sen on läpäistävä, jotta se voidaan hyväksyä rakennusmateriaaliksi. Esimerkiksi CE-merkintä tai muut rakennusmateriaaleihin liittyvät hyväksyntäprosessit eivät vielä sisällä selkeitä ohjeita

kierrätetylle puulle. Tämä aiheuttaa epävarmuutta rakennusalan toimijoille ja hidastaa kierrätyspuun käyttöönottoa.

Jotta kierrätyspuu voisi kilpailla neitseellisten materiaalien kanssa, on kehitettävä **luotettavat testausmenetelmät, sertifiointikäytännöt ja standardit**, jotka takaavat, että kierrätyspuuta voidaan käyttää turvallisesti ja tehokkaasti erilaisissa rakennussovelluksissa.

Arvoketjun yhteistoiminta on avainasemassa

Kierrätyspuun hyödyntämiseen liittyvä arvoketju koostuu useista toimijoista: **rakennus- ja purkualan yritykset, kierrätysteollisuus, puutuoteteollisuus ja rakennusmateriaalien loppukäyttäjät**. Nykytilanteessa tämä ketju ei toimi saumattomasti, mikä vaikeuttaa kierrätyspuun markkinoille pääsyä.

Sopimus pohjaisen yhteistyön puute on merkittävä ongelma. Monet yritykset eivät sitoudu pitkäaikaisiin hankintasopimuksiin kierrätyspuun osalta, koska sen saatavuus ja laatu voivat vaihdella. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa kierrätyspuuta ei pystytä jalostamaan teollisessa mittakaavassa, sillä tuotannon ja toimitusketjujen ennustettavuus on liian heikkoa.

Yksi ratkaisu tähän ongelmaan on kehittää **kierrätyspuun hankintamalleja, joissa rakennus- ja purkualan yritykset sekä kierrätysmateriaaleja jalostavat toimijat voivat tehdä pitkäaikaisia sopimuksia materiaalien toimituksista**. Lisäksi digitaaliset markkinapaikat ja materiaalipankit voisivat auttaa synkronoimaan kierrätyspuun kysynnän ja tarjonnan tehokkaammin.

Mahdolliset tuotantolinjat perustuvat nykyisiin teknologioihin

Vaikka pitkällä aikavälillä tarvitaan uusia ja optimoituja teknologisia ratkaisuja, ensimmäisessä vaiheessa kierrätyspuun hyödyntämisen tulisi nojata olemassa oleviin tuotantomenetelmiin. Tämä tarkoittaa, että **murskaus, puhdistus ja puristeiden valmistus ovat ensisijaisia keinoja kierrätyspuun jalostamiseen**.

Esimerkiksi kierrätyspuusta voidaan valmistaa **puukuitueristeitä, lastulevyjä ja puristepohjaisia rakennusmateriaaleja** käyttämällä jo olemassa olevia teollisuusprosesseja. Tämä mahdollistaa kierrätyspuun hyödyntämisen ilman suuria investointeja uusiin tuotantoteknologioihin.

Pitkällä aikavälillä voidaan kehittää **kehittyneempiä tuotantomenetelmiä**, kuten kemiallisia käsittelyprosesseja, jotka mahdollistavat kierrätyspuun entistä laajemman käytön rakenteellisissa sovelluksissa. Esimerkiksi puukuitujen erottaminen ja niiden yhdistäminen

uusiksi biokomposiittimateriaaleiksi voi avata uusia mahdollisuuksia kierrätyspuun hyödyntämiseen korkean lisäarvon tuotteissa.

Matalan kynnyksen tuotteet voivat vauhdittaa markkinoiden kehitystä

Kierrätyspuun markkinoiden kehittymiselle on tärkeää, että alkuvaiheessa keskitytään **matalan kynnyksen tuotteisiin**, joiden tekniset ja laadulliset vaatimukset eivät ole yhtä tiukkoja kuin esimerkiksi kantavissa puurakenteissa. Näitä tuotteita voivat olla **puukuitueristeet, puristelevyt, pakkausmateriaalit ja ei-kantavat rakennuselementit**, joissa kierrätyspuun käyttö on suhteellisen yksinkertaista ja vaatii vähemmän jalostusta.

Matalan kynnyksen tuotteet tarjoavat useita etuja. Ensinnäkin ne voivat **luoda kysyntää kierrätyspuulle ja synnyttää toimivan markkinan**, jonka jälkeen kierrätyspuun käyttö voidaan laajentaa teknisesti vaativampiin sovelluksiin. Toiseksi ne mahdollistavat kierrätyspuun hyödyntämisen ilman suuria muutoksia rakennusmääräyksiin ja sertifiointiprosesseihin, mikä helpottaa sen käyttöönottoa.

Jos kierrätyspuun käyttö kasvaa ensin matalan kynnyksen tuotteissa, se voi luoda luottamusta ja markkinaehtoisia edellytyksiä sen laajemmalle käyttöönotolle rakennusmateriaalina. Tämä on tärkeä askel kohti kiertotalouteen perustuvaa rakennusteollisuutta, jossa kierrätysmateriaalien osuus kasvaa ja neitseellisen puun käyttö vähenee asteittain.

## 11 Jatkotutkimuskysymykset

Kierrätyspuun jatkojalostus ja uusiokäyttö puutuoteteollisuudessa tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia, mutta myös haasteita, jotka vaativat tarkempaa tutkimusta ja kehitystä. Selvityksessä nousi esiin useita kysymyksiä, jotka kaipaavat lisäselvitystä ja kokeiluja.

### 1. Puukappaleiden erottaminen ja käsittely

Miten saataisiin purettua ehjänä niin, että puut olisivat yksittäisinä kappaleina ilman kiinnikkeitä? Entä voisiko uusiokäyttöön saattaminen riittää yksinkertaisella höyläyksellä tai sahauksella? On tärkeää tutkia, kuinka kiinnikkeet voidaan poistaa tehokkaasti ja puut säilyttävät eheyden niin, että ne soveltuvat jatkojalostukseen ilman merkittäviä vahinkoja.

### 2. Kiinnikkeellisten puukappaleiden hyödyntäminen

Mihin kiinnikkeelliset ja toisissaan kiinni olevat puukappaleet voitaisiin hyödyntää? Voisiko niitä esimerkiksi käyttää murskattuna puukuitueristeinä tai puristepalikoina?

Tässä kohtaa olisi tärkeää selvittää, miten kiinnikkeelliset osat voidaan jalostaa tehokkaasti uusiokäyttöön, ja mitkä prosessit olisivat parhaita näiden materiaalien käsittelyyn.

### 3. **Arvoketjun yhteistyö**

Miten arvoketjun yhteistyötä voitaisiin lisätä yhteisen tavoitteen eteen? Kuka voisi ottaa omistajuutta arvoketjun hallinnasta ja varmistaa eri toimijoiden saumattoman yhteistyön? On oleellista tutkia, kuinka eri toimijat – kuten purku- ja kierrätyspalvelut, jalostajat ja valmistajat – voisivat tehdä yhteistyötä niin, että kierrätyspuun uusiokäyttö olisi taloudellisesti ja ekologisesti kannattavaa.

### 4. **Teknologiat ja innovaatiot**

Mitkä teknologiat voisivat auttaa tunnistettujen ongelmakohtien ratkaisemisessa? Erityisesti kiinnikkeiden poistamiseen liittyvien haasteiden ratkaiseminen edullisesti ja tehokkaasti olisi tärkeää. Onko olemassa kehittyneitä tekniikoita, kuten mekaanisia tai kemiallisia prosesseja, jotka voisivat auttaa poistamaan kiinnikkeet niin, että kappaleet säilyttävät eheyden mahdollisimman hyvin?

### 5. **Uusiokäyttöön optimoidut prosessit**

Millaisia testauksia ja kokeiluja tarvitaan, jotta voidaan kehittää prosesseja, jotka optimoivat puun uusiokäytön? Tämä vaatii jatkuvaa testaamista ja prosessien hienosäätöä, jotta voidaan varmistaa, että kierrätetty puu täyttää teollisuuden vaatimukset ja säilyttää tarvittavan laadun.

Nämä kysymykset avaavat tärkeitä näkökulmia kierrätyspuun jatkojalostuksen ja uusiokäytön kehittämiseksi puutuoteteollisuudessa. Lisätutkimukset ja kokeilut näiden alueiden ympärillä auttavat luomaan tehokkaita ja kestäviä ratkaisuja kierrätyspuun arvoketjun täydentämiseksi.

## 12 Liitteet

Teknologioita puun prosessointiin

Listaus teknologioista ja niiden merkityksestä jätetuun prosessoinnille

### **Optinen lajittelu**

- Periaate: Konenäkö ja värintunnistus analysoivat puun pintaa ja erottavat eri puujakeet (puhdas, maalattu, kyllästetty).

- Merkitys: Vähentää käsityötä ja parantaa lajittelun tarkkuutta, mahdollistaen puhtaamman raaka-aineen uusien tuotteiden valmistukseen.

Erottelu: konenäköä ja eri aallonpituuksista säteilyä hyödyntäen puhtaan puun epäpuhtauksista rikkomatta puun rakennetta. Auttaa erottelemaan mm.

-Puhdas puu vs. kyllästetty/maalattu puu

-Eri puulajit ja kuitukomposiitit

-Vierasaineet (muovit, liimat, laminaatit, metallit)

### **Konenäkö ja AI**

- Periaate: Tekoäly analysoi kuvantietoa ja erottaa eri puujakeet sekä arvioi materiaalin laadun.

- Merkitys: Automaattinen ja tarkka lajittelu mahdollistaa paremman resurssitehokkuuden. Tunnistaa erityyppiset materiaalit, nopeuttaa prosessia ja vähentää manuaalista työtä

## **Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen**

- Periaate: Näkyvän ja infrapunasäteilyn analyysi tunnistaa eri materiaalit ja niiden kemiallisen koostumuksen.
- Merkitys: Auttaa erottamaan esim. maalatut ja kyllästetyt puut sekä tunnistamaan laadukkaimmat puujakeet. Vähentää tarvetta käsin tarkastaa materiaalia, auttaa materiaalijakeiden erottelua.

## **Magneettiseparaattori**

- Periaate: Magneettikenttä poistaa rautaesineet, kuten naulat ja ruuvit, jätepuuvirrasta.
- Merkitys: Suojaa jatkoprosessien laitteita ja mahdollistaa metallien kierrätyksen.

Teknologia poistaa metallit ja metallipitoisen puun hyödyntäen poistettavien materiaalien magneettisia ominaisuuksia

## **Ilmaseparaattori**

- Periaate: Ilmavirran avulla kevyet epäpuhtaudet, kuten muovit ja pöly, erotellaan raskaammasta puusta.
- Merkitys: Parantaa puumateriaalin laatua ja vähentää epäpuhtauksia jatkoprosessoinnissa.

## **Hionta ja höyläys**

- Periaate: Mekaaninen puun pinnan tasoitus poistaa vanhat maalikerrokset ja epäpuhtaudet.

- Merkitys: Mahdollistaa puun uudelleenkäytön rakennus- ja huonekaluteollisuudessa. Poistaa pintakäsittelyt ja palauttaa puun pinnan näkyväksi

### **Pyrolyysi ja höyrykäsittely**

Poistaa kemiallisia jäämiä ilman murskausta puun pinnalta

#### **Pyrolyysi:**

- Periaate: Lämpökäsittely hapettomassa tilassa hajottaa orgaanisia yhdisteitä, kuten maalit, lakat ja liimat. Prosessi voi muuttaa ne kaasuiksi tai biohiileksi
- Merkitys Toimii erityisesti orgaanisten pinnoitteiden hajottamiseen, mutta voi olla haasteellinen, jos tavoitteena on säilyttää puu alkuperäisessä muodossa.

#### **Höyrykäsittely:**

- Periaate: Korkean lämpötilan vesihöyry pehmentää ja irrottaa kemiallisia pinnoitteita, kuten maalia tai lakkaa, jolloin ne voidaan poistaa ilman hiontaa tai kemikaaleja.
- Merkitys: Voidaan käyttää turvallisemmin, sillä se ei hajota puun rakennetta, mutta tehokkuus riippuu pinnoitteen tyypistä ja paksuudesta.

### **Biologinen pintakäsittely**

- Periaate: Mikrobit tai entsyymit hajottavat kemiallisia pinnoitteita ja epäpuhtauksia puupinnalta.
- Merkitys: Ekologinen tapa puhdistaa ja valmistella puu uudelleenkäyttöön.

### **Tuotteiden seuranta RFID ja IoT-ratkaisut**

- Periaate: RFID-tunnisteet ja IoT-sensorit tallentavat ja jakavat tietoa puun alkuperästä ja käsittelyvaiheista

- Merkitys: Parantaa jäljitettävyyttä ja mahdollistaa tehokkaamman kierrätyksen. Takaa jäljitettävyyden ja laadunvalvonnan puujätteen lajittelusta uudelleenkäyttöön (mahdollistaa myös seurannan koko elinkaaren ylitse). Parantaa tehokkuutta ja vähentää manuaalisen tarkastuksen tarpeita.

### **Purkurobotti**

- Periaate: Robottikäsivarret purkavat rakennusmateriaaleja valikoivasti säilyttäen puun rakenteelliset ominaisuudet.

- Merkitys: Vähentää jätettä ja mahdollistaa puun uudelleenkäytön rakennusmateriaalina. Korvaa manuaalista purkua ja lajittelua.

### **Röntgenskannaus (XIR)**

- Periaate: Röntgensäteet läpäisevät materiaalin ja paljastavat naulat, ruuvit sekä haitalliset aineet.

- Merkitys: Parantaa puumateriaalin turvallisuutta ja laadunhallintaa. Mahdollistaa vaarallisten aineiden ja materiaalien tunnistamisen.

### **Automatisoitu höyläys/hiontalinjasto**

- Periaate: Koneellinen höyläys/hionta ja puhdistus poistaa pintakerroksen tehokkaasti.

- Merkitys: Valmistaa puun uudelleenkäytettäväksi ilman kemikaaleja. Nopeuttaa puhdistusta ja parantaa materiaalin laatua ja uudelleenkäytettävyyttä.

### **CNC-leikkuri ja saharobotti**

- Periaate: Tarkka tietokoneohjattu leikkaus räätälöi jätteen uusiksi tuotteiksi ilman suurta hukkaa.
- Merkitys: Mahdollistaa puun uudelleenkäytön korkealaatuisissa tuotteissa.

### **Tuuliseparaattorit ja rumpuseulat**

- Periaate: Rumpuseulat lajittelevat ja tuuliseparaattorit erottelevat materiaalit koon mukaan.
- Merkitys: Parantaa lajittelun tehokkuutta ja jätteen puhtautta. Parempi laatu ja kierrätyskelppoisuus, tuuliseparaattoreissa voi olla rajoitteita eroteltavien kappalekokojen puolesta (lähinnä pienen säjän erottelu). Rumpuseulat voivat heikentää käsiteltävän jätteen laatua hieman laitteiston momenttivoimien vuoksi, mutta soveltuvat isojen massavirtojen käsittelyyn.

### **Biokomposiitit**

- Periaate: Jätteen sekoitetaan osaksi muovimatriisia uuden materiaalin tuottamiseksi
- Merkitys: Mahdollistaa uuden korkean arvon tuotteet. Soveltuu pienien jätteen käsittelyyn, joissa ei ole merkittäviä epäpuhtauksia)

Jätteen prosessoinnin vaiheet ja soveltuvat teknologiat

Hyödyntäen aiempia prosessointivaiheita jätteen käsittelemiseksi purkupaikalta tuotteiksi ja erilaisia jätteen käsittelyyn soveltuvia teknologioita olemme koostaneet tähän eri teknologioiden soveltuvuutta eri prosessointivaiheisiin.

## **1. Syntypaikkakartoitus**

Tavoite: Tunnistaa jätetuun lähteet ja määrittää sen laatu ennen käsittelyä.

Soveltuvat teknologiat:

RFID ja IoT-ratkaisut: Seuranta ja tietojen keruu jätetuusta jo sen syntypaikalla.

Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen: Puumateriaalin analysointi ennen purkamista.

Konenäkö ja AI: Puun lajittelu ja kunnan arviointi ennen varsinaista käsittelyä.

## **2. Purkaminen**

Tavoite: Mahdollistaa uudelleenkäyttökelpoisen puun säilyttäminen ja tehokas erottelu.

Soveltuvat teknologiat:

Purkurobotti: Purkaa puuosia tarkasti ja säästää rakenteellisesti ehjän puun.

Röntgenskannaus (XIR): Tunnistaa metalliosat ja epäpuhtaudet puumateriaalissa ennen jatkokäsittelyä.

## **3. Keräys ja lajittelu**

Tavoite: Erottaa eri jätetuujakeet (esim. maalattu, kyllästetty, puhdas) jatkokäyttöä varten.

Soveltuvat teknologiat:

Optinen lajittelu: Erottelee maalatut, lakatut ja puhtaat puut automaattisesti.

Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen: Tunnistaa puun kemiallisen koostumuksen lajittelua varten.

Magneettiseparaattori: Poistaa naulat, ruuvit ja muut metalliosat.

Ilmaseparaattori & tuuliseparaattori: Poistaa kevyet epäpuhtaudet, kuten muovit ja pölyn.

RFID ja IoT-ratkaisut: Seuranta ja dokumentointi, jotta eri puujakeet voidaan ohjata oikeaan jatkokäyttöön.

#### **4. Varastointi ja logistiikka**

Tavoite: Estää laadun heikkeneminen ennen jatkoprosessointia.

Soveltuvat teknologiat:

RFID ja IoT-ratkaisut: Seuranta varastoinnissa, esim. kosteuden ja lämpötilan valvonta.

Automatisoidut hiontalinjastot & CNC-leikkuri: Esivalmistelu varastointia varten, jotta puu säilyy käyttökelpoisena.

#### **5. Erottelu**

Tavoite: Poistaa ei-toivotut materiaalit (maalit, kyllästeet, epäpuhtaudet).

Soveltuvat teknologiat:

Pyrolyysi ja höyrykäsittely: Pinnoitteiden ja epäpuhtauksien poistaminen puusta.

Hionta ja höyläys: Poistaa mekaanisesti pinnalta maalit ja lian.

Röntgenskannaus (XIR): Paljastaa piilossa olevat epäpuhtaudet.

## 6. Prosessointi ja tuotanto

Tavoite: Valmistaa jätetuusta uusia tuotteita ja materiaaleja.

Soveltuvat teknologiat:

Biologinen pintakäsittely: Poistaa kemiallisia jäämiä ja parantaa pinnan laatua.

Biokomposiitti: Muuntaa jätetuun uusiksi materiaaleiksi (esim. rakennuslevyt).

CNC-leikkuri ja saharobotti: Muotoilee jätetuun tarkasti uusiksi tuotteiksi.

Automatisoitu hiontalinjasto: Viimeistelee puun uusiokäyttöä varten.

### i. puun eheyden säilyttäviä teknologioita

Konenäkö ja AI

Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen

Röntgenskannaus (XRT, XRF)

Magneettiseparaattorit

Automaatisoitu hionta tai höyläys

Purkurobotit

CNC-leikkurit ja saharobotit

RFID-seuranta ja IoT-analytiikka

ii. käsityötä vähentäviä ja automatisointiin perustuvia teknologioita

Konenäkö ja AI

Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen

Röntgenskannaus (XRT, XRF)

Magneettiseparaattorit

Automaatisoitu hionta tai höyläys

Purkurobotit

CNC-leikkurit ja saharobotit

RFID-seuranta ja IoT-analytiikka

iii. arvoketjun alkupäässä seulovia teknologioita

Konenäkö ja AI

Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen

Röntgenskannaus (XRT, XRF)

Purkurobotit

RFID-seuranta ja IoT-analytiikka

## iv. Suurien massavirtojen käsittelyyn soveltuvia teknologioita

Konenäkö ja tekoälylajittelu

Hyperspektrikuvaus ja NIR

Röntgenskannaus (XRT, XRF)

Raskaat murskaimet ja hakkurit

Magneettiseparaattorit

Tuuliseparaattorit ja rumpuseulat

Robottiikka ja automaatio

IoT ja RFID-seuranta

## v. heterogeenisyyden kestäviä

Optinen lajittelu	Pinnoitteiden ja eri puolajien tunnistaminen
Hyperspektri- ja NIR-kuvantaminen	Kemiallinen analyysi ja puujakeiden erottelu
Magneettiseparaattori ja leikkausrobotti	Naulojen ja metallien poistaminen
Ilmaseparaattori	Kevyiden epäpuhtauksien poisto materiaalivirrasta
Pyrolyysi ja höyrykäsittely	Pinnoitteiden poisto ilman kemikaaleja
Konenäkö ja AI	Älykäs lajittelu ja laadunvalvonta

Automatisoitu höyläys/hiontalinjasto & CNC	Pinnan puhdistus ja muotoilu
Röntgenskannaus (XIR)	Piilossa olevien epäpuhtauksien tunnistus
Biokomposiitti-teknologiat	Uusien tuotteiden valmistus kierrätetystä puusta