

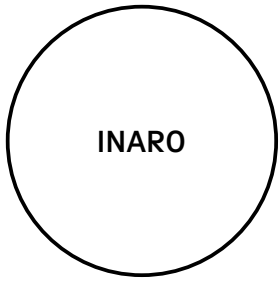
INARO

# Jätkäsaaren Kiertotalouskortteli

## Kiertotalouden mahdollisuudet puurakentamisessa

Puurakentamisen kiertotalouden ratkaisut -selvityshanke

**15.9.2022**  
Raportti 6



© INARO 2022

### **Työryhmä**

Miia Suomela  
Antti Lehto  
Hanna Mattila

arkkitehti, INARO  
arkkitehti SAFA, INARO, Aalto-yliopisto Arkkitehtuurin laitos  
arkkitehti SAFA, INARO

Kannen kuva © Martin Sommerschild, Kuvatoimisto Kuvio Oy

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Puun käyttö ja puurakentaminen Suomessa</b>	<b>3</b>
1.1 Puun käyttö	3
1.2 Puurakentamisen tila	4
<b>2 Kiertotalouden näkökulmia puurakentamiseen</b>	<b>7</b>
2.1 Purkaminen ja puumateriaalien kierrätys	7
2.2 Resurssitehokkuus ja uudelleenkäyttö puurakentamisessa	8
2.2.1 Kaskadiperiaate resurssitehokkuuden edistäjänä	8
2.2.2 Uudelleenkäyttö teollisessa puurakentamisessa	10
<b>3 Kiertotalouden suunnittelustrategioiden soveltaminen puurakentamisessa</b>	<b>12</b>
3.1 Rakennusosien ja materiaalien optimointi	12
3.2 Muuntojoustavuus	12
3.3 Ylläpidettävyys ja purettavuus	13
3.4 Materiaalivalinnat	14
3.5 Yhteenveto	14
<b>Lähteet</b>	<b>16</b>

# Johdanto

Puulle on kysyntää. Uusiutuvien luonnonvarojen käyttöön perustuvasta biotaloudesta on povattu pelastajaa fossiilitalouden aiheuttaman ilmastonmuutoksen hillinnässä. Rajallisista puuvarannoista kilpaileekin nyt moni taho: energiateollisuus, selluteollisuus ja rakennusteollisuus. Puu on uusiutuva luonnonvara, mutta sen kestävä käyttö edellyttää puun uusiutumissyklin huomioimisen puun käytössä. Biotalous ei pelasta maailmaa ilmastonmuutokselta, jos hiilinieluja pienennetään liikaa tai puuhun varastoitunut hiili vapautuu ilmakehään ennen kuin uusi puusukupolvi on ehtinyt kasvaa.

Rakentamisessa puun käytön puolesta puhuu puun toimiminen hiilivarastona niin kauan kuin rakennus tai siitä uudelleenkäyttöön puretut rakennusosat pysyvät käytössä. Rakentamisessa hiilivarasto säilyy lähtökohtaisesti pidempään kuin muissa käyttötarkoituksissa, ja on siksi ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta puulle kannattavin käyttökohde. Puurakentamisen osuus julkisessa rakentamisessa ja asuinkerrostalojen rakentamisessa on toistaiseksi ollut vähäinen, mutta puun käytön lisäämiselle on asetettu ympäristöministeriön toimesta kunnianhimoiset tavoitteet.

Koska puuta käytetään rakentamisessa kuitenkin paljon ja se on pientalorakentamisessa edelleen suosituin materiaali, puu muodostaa Suomessa betonin jälkeen toiseksi suurimman rakennus- ja purkujätevirran. Purkupuuta päättyy tällä hetkellä lähes täysimääräisesti poltettavaksi energiantuotantoon. Useissa tutkimuksissa on osoitettu, että purkupuuta voitaisiin kuitenkin hyödyntää monin tavoin uudelleen rakennusosina.

## Selvitys puurakentamisen kiertotalouden ratkaisuksista

Tämä raportti on osa Jätkäsaaren Kiertotalouskortteli -hanketta. Hankkeessa pyritään selvittämään kiertotalouden ratkaisuja puurakentamisessa ja toteuttamaan niitä käytännössä Jätkäsaareen suunniteltavan asuinkorttelin suunnittelussa ja rakentamisessa. Tämän raportin tavoitteena on käsitellä puurakentamiseen liittyviä kysymyksiä kiertotalouden kontekstissa sekä selvittää ja esitellä ratkaisuvaihtoehtoja kiertotalouden mukaisten suunnittelustrategioiden soveltamisesta puurakentamisessa.

Tässä selvityksessä perehdytään puun käyttöön, puurakentamisen tilaan ja purkupuun nykyisiin kierrätyskäytäntöihin sekä etsitään resurssitehokkuuden ja uudelleenkäytön näkökulmista vaihtoehtoja purkupuun polttamiselle. Erityisesti biopohjaisten tuotteiden uudelleenkäyttöä edistämään kehitetty kaskadiperiaate ohjaa käyttämään resurssia yhä uudelleen mahdollisimman korkean jalostusasteen käyttötarkoituksessa. Tästä esimerkkinä on purkupuun hyödyntäminen yhden tämän hetken suosituimman teollisen puutuotteen, CLT:n valmistuksessa. Standardien puitteissa tämä ei tällä hetkellä ole sallittua, mutta tutkimusten mukaan paitsi mahdollista, erityisesti resurssien käytön näkökulmasta järkevää.

Tämä raportti pohjaa hankkeen osaraporttiin 1, Kiertotalous ja kiertotalouden mukaiset suunnittelustrategiat rakennusalalla, joka on julkaistu syksyllä 2021. Tämän osaraportin tavoitteena oli esitellä puurakentamisen kiertotalousratkaisuja rakennushankkeessa toteutuneiden konkreettisten esimerkkien kautta. Koska käytännön sovellutukset ovat vielä toteuttamatta rakennushankkeen osalta, tässä selvityksessä pohditaan teorian tasolla aiemmassa raportissa esitettyjen suunnittelustrategioiden mukaisia ratkaisuja puurakentamisen kontekstissa.

## Raportin rakenne

Tämän raportin ensimmäisessä luvussa käsitellään puun käyttöä ja puurakentamisen tilaa Suomessa. Toisessa luvussa pureudutaan puumateriaalin nykyisiin kierrätyskäytäntöihin Suomessa ja tämän jälkeen paremman resurssitehokkuuden ja uudelleenkäytön mahdollistaviin vaihtoehtoihin.

Raportin kolmannessa luvussa esitellään tässä hankkeessa aiemmin julkaistun raportin lopputuloksena esitettyjen suunnittelustrategioiden soveltamista puurakentamisen kontekstissa. Käytännön sovellutusten sijaan luvussa esitellään vaihtoehtoja kiertotalouden tavoitteita täyttävistä suunnitteluratkaisuista puurakentamisessa.

# 1 Puun käyttö ja puurakentaminen Suomessa

Metsät ja puu rakennusmateriaalina nähdään avainasemassa ilmastonmuutoksen hillinnässä, mutta puun käytön tavat eivät tällä hetkellä ole linjassa ilmastotavoitteiden kanssa. Tässä luvussa esitellään puun käyttöä sekä puurakentamisen tilaa Suomessa.

## 1.1 Puun käyttö

Metsillä ja puustolla on oleellinen rooli luonnon monimuotoisuuden säilyttämisessä sekä ilmastonmuutoksen hillinnässä hiilinieluinä ja hiilivarastoinä. Tätä tietoa vasten on ristiriitaisnä, että siirtymistä fossiilitaloudesta biotalouteen on esitetty ratkaisuna ilmastonmuutoksen hillintään. Fossiilitalous perustuu fossiilisten polttoaineiden käyttöön, mitä pidetään keskeisenä ilmastonmuutoksen kiihdyttäjänä, kun taas biotaloudessa ”käytetään uusiutuvia luonnonvaroja ravinnon, energian, ravinteiden, tuotteiden ja palvelujen tuottamiseen” (Maa- ja metsätalousministeriö, 2021). Biotalousnä raaka-ainetarpeiden täyttäminen samalla, kun pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta ja luonnon monimuotoisuuden hupenemistä, on kuitenkin herättänyt huolta tutkijoiden keskuudessa (BIOS, 2017).

Ympäristökriisiin vastaamisen ohella epävarmuutta on bioraaka-aineiden riittävydestä kaavavaihtuihin raaka-aineiden käytön lisäyksiin. Kansainvälisen selvityksen (Material Economics, 2021) mukaan biopohjaisten raaka-aineiden kysyntä saattaa jopa yli kaksinkertaistua vuoteen 2050 mennessä EU-alueella ilmastoneutraaliutta tavoiteltaessa. Suunnitelmat biopohjaisten raaka-aineiden käytölle ylittävät todennäköisesti saatavilla olevan biomassan määrän 40–100 %, minkä vuoksi selvityksessä suositellaan selkeän priorisoinnin luomista biomassan käytölle sellaisissa käyttökohteissa, joissa sen ominaisuudet parhaiten tukevat ilmastoneutraalia taloutta, kuten rakentamisessa (mt.).

Toistaiseksi metsänhoito tai puun käyttö Suomessa eivät aivan vastaa näihin tavoitteisiin. Metsänhoidossa tavoitteet kohdistuvat hakkuiden lisäämiseen, eivät metsien suojelemiseen tai edes jatkuvan kasvatuksen menetelmien edistämiseen. Luonnonvarakeskuksen viimeisimpien tilastotietojen mukaan suomalaisen puuston vuotuinen kasvu metsä- ja kitumaalla vuosina 2019–2020 oli 103,5 miljoonaa kuutiota (Luke Tilastotietokanta, 2021a). Kansallisen metsästrategian tavoitteena on lisätä runkopuun hakkuut vuoden 2013 65 miljoonasta kuutiometristä 80 kuutiometriin vuoteen 2025 mennessä (Maa- ja metsätalousministeriö, 2015). Lähellä tätä tavoitetta oltiin jo vuonna 2018, kun suomalaisissa metsissä tehtiin yli 78 miljoonan kuution ennätyshakkuut ja kokonaispoistuma (sisältää hakkuiden lisäksi metsähakkeen, hakkuutähteet ja luonnollisen poistuman) nousi lähes 94 miljoonaan kuutioon (Luke Tilastotietokanta, 2021b). Seuraavana kahtena vuonna hakkuut laskivat hieman maltillisemmalle tasolle 73 ja 69 miljoonaan kuutioon, mutta vuonna 2021 hakkuukertymä oli jälleen lähes 76 miljoonaa kuutiota (mt.).

Vuonna 2020 suomalainen metsäteollisuus käytti 67 miljoonaa kuutiota raakapuuta, josta 39,4 miljoonaa kuutiota käytettiin massateollisuudessa (mekaaninen ja puolikemiallinen massateollisuus sekä selluteollisuus) ja 27,6 miljoonaa kuutiota puutuoteteollisuudessa (saha-, vaneri-, lastulevy- ja kuitulevyteollisuus) (Luke Tilastotietokanta, 2020a). Energiantuotantoon raakapuuta vuonna 2020 kului 11,3 miljoonaa kuutiota (Luke Tilastotietokanta, 2020b), mikä on 14 % raakapuun kokonaiskäytöstä. Puutuoteteollisuudessa sahateollisuuden osuus raakapuun käytöstä vuonna 2020 oli lähes 90 % ja massateollisuudessa selluteollisuuden osuus reilut 80 % (Luke Tilastotietokanta, 2020a). Puutuoteteollisuus käyttää lähes ainoastaan kotimaista puuta,

mutta massateollisuuden puunkäytöstä vajaa neljännes on tuontipuuta (mt.). Kaavio 1 havainnollistaa puuvirtoja Suomessa metsän vuotuisesta kasvusta hakkuisiin ja raakapuun käyttöön eri teollisuuden aloilla.

## 1.2 Puurakentamisen tila

Puu on ollut ja on edelleen suosittu rakennusmateriaali Suomessa. Noin 45 % suomalaisesta rakennuskannasta on rakennettu puusta (Huuhka, ym., 2018b). Yleisin rakennustekniikka Suomessa oli 1900-luvun alkupuolelle asti hirsirakentaminen, joka vallitsi niin asuinrakentamisessa kuin kaupallisissa rakennuksissa kaikissa korkeintaan kaksikerroksisissa rakenteissa. Hirsirakentaminen väistyi toisen maailmansodan jälkeisessä materiaalipulassa rankarakenteen tieltä. Halleissa, myymälätiloissa ja muissa julkisissa rakennuksissa on yleisesti käytössä liimapuinen pilari-palkki-järjestelmä. 2000-luvulla on monentyyppisissä ja -kokoisissa rakennushankkeissa yleistynyt liimaamalla tai mekaanisesti levyksi koottujen puuelementtien käyttö, joka perustuu kantavat seinät -rakennejärjestelmään. (Mt.)

Yksi yleisimmistä liimaamalla kootuista levytuotteista on ristiinlaminoitu puu eli CLT (engl. *cross-laminated timber*), jota on pidetty potentiaalisena haastajana betonille kerrostalojen runkomateriaalina. CLT-paneeli syntyy liimaamalla ristiin 90 asteen kulmassa laudoista liimattuja levyjä. Levyyn käytetyt laudat on jatkettu sormiliitoksia, ja kerroksia CLT-paneelissa on tyypillisesti kolme tai viisi, mutta joskus enemmänkin (Puuinfo, 2020a).

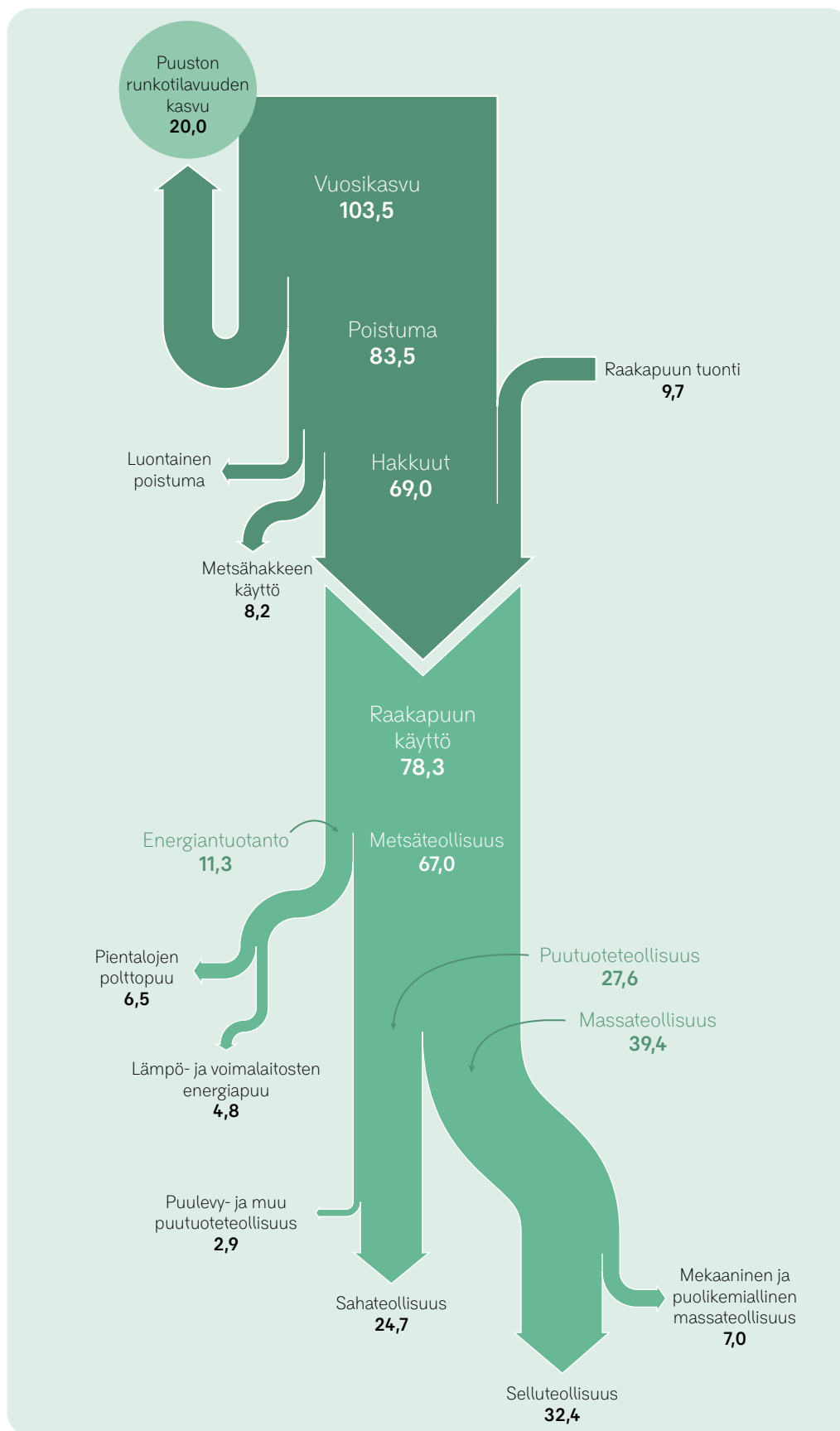
Lapin ammattikorkeakoulun tekemässä haastattelututkimuksessa (Vatanen, ym., 2017) selvisi, että CLT-rakentamisen kanssa tekemisissä olleet rakennusalan ammattilaiset pitivät CLT-rakentamisen suurimpana etuna sen korkeaa esivalmistusastetta, joka mahdollistaa nopean moduulirakentamisen sekä kosteusturvallisen toteutuksen. Yhden arvion mukaan CLT-runkoisen rakennuksen pystyttäminen on tyypillisesti 20 % nopeampaa kuin vastaavan betonirunkoisen rakennuksen (Waugh Thistleton Architects, 2018). Muita CLT-rakentamisen etuja verrattuna betonirakentamiseen ovat materiaalin korvaamisen ansiosta syntyvät säästöt hiilidioksidipäästöissä, kevyemmän rungon vaatimat kevyemmät perustukset, esivalmistuksen ansiosta lähes jätteen rungon pystytys sekä paremmat työolot ja pienemmät vaikutukset työmaan ympäristöön (vähemmän melua ja pölyä) (mt.).

Puutuoteteollisuuden tuotteista rakentamiseen käytetään 70–80 %, esim. runkorakentamiseen, piharakenteisiin, sisustukseen ja muotteihin työmailla (Haapio, 2013). Puurakentaminen on Suomessa hallinnut erityisesti pientalorakentamisessa. Vuonna 2019 aloitetuista omakotitaloista puurunkoisia oli 89 % ja vapaa-ajanasunnoista 99 %; uusista kerrostaloasunnoista vain neljä prosenttia sijaitsi puurunkoisissa rakennuksissa (Puutuoteteollisuus, 2020). Puurunkoisten rakennusten osuus vuonna 2019 aloitetuista kokoontumis- sekä liike-, toimisto- ja liikennetaraksista oli 16 % (mt.).

Ympäristöministeriön (2020a) tilaaman selvityksen mukaan puurakentaminen on viime vuosina lisääntynyt Suomessa: yksittäisiä puukerrostaloja tai puukerrostalokortteleita (vähintään kolmikerroksisia) tai puurakenteisia julkisia rakennuksia oli rakenteilla tai suunnitteilla 51 vuonna 2018, 63 vuonna 2019 ja 73 vuonna 2020. Luvuissa ovat mukana varmasti, todennäköisesti ja mahdollisesti toteutuvat (kaavavaiheessa olevat) hankkeet. Varmojen hankkeiden lukumäärä nousi vuonna 2020 kahteenkymmeneen neljään edellisvuoden kahdeksastatoista (mt.). Varmossa kohteissa on vajaat 244 000 k-m<sup>2</sup>, joista 80 % on asumista (Tolppanen, 2020).

Vuonna 2020 ympäristöministeriö asetti tavoitteet puun käytölle julkisessa rakentamisessa: tavoitteena on, että vuonna 2022 kaikesta julkisesta uudisrakentamisesta puurakentamista on 31 % ja vuonna 2025 45 % (Ympäristöministeriö, 2020b). Samassa yhteydessä asetettiin tavoite

## Puuvirrat Suomessa vuonna 2020



**Kaavio 1.** Puun vuotuinen kasvu ja puun käyttö Suomessa vuonna 2020. Lähteet: Luke 2021a, 2021b ja 2021c.



te myös esimerkiksi asuinkerrostaloille, joissa puurakentamiselle tavoitellaan 21 %:n osuutta vuonna 2022 ja 46 %:n osuutta vuonna 2025 (mt.).

Puun käyttöä rakentamisessa puoltavat hupenevien luonnonvarojen ja ilmastonmuutoksen keskellä erityisesti kaksi asiaa: puu on uusiutuva materiaali ja se sitoo kasvaessaan ilmasta hiilidioksidia, joka varastoituu hiileksi puuhun siihen asti, kunnes puu poltetaan. Puuta voidaan pitää uusiutuvana luonnonmateriaalina kuitenkin vain, jos sitä käytetään huomioiden puusukupolven uusiutumiseen kuluva aika, noin 80–100 vuotta. Nykyään puuta käytetään monesti tavalla, jossa hiilivarasto purkautuu takaisin ilmakehään ennen kuin uusi puusukupolvi on ehtinyt sitoa vastaavan määrän hiilidioksidia: selluksi päätyvä puu on kierrossa hyvin lyhyen ajan ja harvalle puurakennuksellekaan suunnitellaan yli sadan vuoden käyttöikää. Puu muodostaa betonin jälkeen toiseksi suurimman osuuden rakennus- ja purkujätteestä Suomessa, mutta tällä hetkellä purkupuuta ei käytetä uudelleen, vaan lähes kaikki puujäte poltetaan energiaksi (Häkämies, ym., 2019).

Kiertotalouden tavoitteiden kannalta puun käyttö- ja kierrätystavat vaativat kriittistä tarkastelua ja kehittämistä. Seuraavassa luvussa pureudutaan näihin kysymyksiin kierrätyksen, resurssitehokkuuden ja uudelleenkäytön näkökulmista.

## 2 Kiertotalouden näkökulmia puurakentamiseen

Puun kierrätys Suomessa on tällä hetkellä hyvin vähäistä, ja rakentamisesta ja purkamisesta syntyvä purkupuu päätyy poltettavaksi. Tässä luvussa kuvataan puun kierrätyksen nykytilaa ja esitellään sille vaihtoehtoja resurssitehokkuuden ja uudelleenikäytön näkökulmista.

### 2.1 Purkaminen ja puumateriaalien kierrätys

Puun käyttöä on perusteltu kestävän rakentamisen diskurssissa enimmäkseen puun uusiutuvuudella ja puun kyvyllä sitoa hiiltä, mutta materiaalitehokkuus ja kierrätys ovat jääneet vähemmälle huomiolle (Huuhka, 2018a). Suosittuna rakennusmateriaalina puu on vahvasti edustettuina myös purkutilastoissa. Vuosien 2000 ja 2012 välillä purettujen rakennusten pinta-alasta 40 % sijaitsi puurakenteisissa rakennuksissa; pääasiallinen rakennusmateriaali on tiedossa reilun puolen osalta (Huuhka, ym., 2018b). Pinta-alan perusteella laskettuna 42 % puretuista puurakennuksista oli pientaloja, 10 % liike- ja toimistorakennuksia, 9 % julkisia rakennuksia, 9 % teollisuusrakennuksia ja 8 % varastorakennuksia. Purettujen puurunkoisten rakennusten keski-ikä purettaessa vaihteli 31 ja 68 vuoden välillä (mt.) – eli rakennukset purettiin huomattavasti aiemmin kuin puusto ehti uudistua (ks. luku 1.2).

Tällä hetkellä käytössä olevat purkamisen ja lajittelun tavat rakennusalalla vaikeuttavat puupohjaisen rakennus- ja purkujätteen hyödyntämistä. Rakennus- ja purkutyömailla tapahtuva karkea lajittelu käsittelemättömään, käsiteltyyn ja kyllästettyyn puuhun riittää energiakäytön kannalta, mutta tämä ei edistä puumateriaalien uudelleenikäyttöä (Häkämies, ym., 2019). Puujätteessä on sekaisin erilaisia jakeita laudoista levyihin, seassa on usein nauvoja ja ruuveja, materiaaleissa on erilaisia pinta-, sää- ja kosteuskäsittelyjä, materiaalit saattavat olla likaantuneita esimerkiksi betonijäämistä tai niissä saattaa olla kosteusvaurioita (mt.).

Suomalaisen puutuoteteollisuuden edunvalvoja Puutuoteteollisuus ry (2021) on vaatinut, että puun energiakäyttö pidetään mahdollisena, kunnes kierrätetyille puutuotteille syntyy kotimaiset markkinat. Puutuoteteollisuuden mukaan markkinoiden puuttuminen johtuu pitkälti siitä, että rakentamisessa on tiukat vaatimukset tuotteiden teknisille ominaisuuksille ja kelpoisuuden osoittaminen on raskas menettely, minkä vuoksi uudelleenikäyttö on olematonta. Uudelleenikäytön saattavat estää myös tuotteen valmistuksen ja sen uudelleenikäyttöön oton välillä muuttuneet vaatimukset. (Mt.) Rakentamisen puujäte on myös haluttua polttoainetta energiasektorilla, koska se on kuivaa ja edullista verrattuna esimerkiksi metsähakkeeseen (Häkämies, ym., 2019).

Puun käyttö rakentamisessa lisääntyy edelleen, joten energiakäytölle tulisi kehittää vaihtoehtoja, joissa puuta hyödynnettäisiin materiaalina korkeamman jalostusasteen kohteissa. Suurin uudelleenikäyttöpotentiaali materiaalina olisi käsittelemättömällä puulla, koska mekaaniset epäpuhtaudet, kuten naulat ja ruuvit, voidaan poistaa magneeteilla ainakin haketuksen yhteydessä (Häkämies, ym., 2019). Käsitellyt puujakeet, kuten vanerit, lastulevyt, liimapuu, mdf-levyt sekä pinnoitetut tai maalatut levyt tai laudat, ovat epähomogeenisuudessaan haastavia. Kyllästettyä puuta voidaan vaarallisena jätteenä hyödyntää ainoastaan energiakäytössä. (Mt.)

Suunnittelun näkökulmasta yksi suurimmista haasteista purettujen puumateriaalien uudelleenikäytölle ovat määrän ennustamattomuus ja laadun vaihtelevuus (Huuhka, 2018a). Suunnittelijan on vaikea tietää, mitä komponentteja milloinkin on saatavilla, ja silloin kun määrä on tiedossa, samanlaisia komponentteja ei aina ole riittävästi. Laadun näkökulmasta haasteena on

mittojen, lujuuden, värin ja pintakäsittelyjen vaihtelevuus – jopa alun perin samanlaiset komponentit ovat käytön tai purun aikana saattaneet muuttua. (Mt.)

Samansuuntaisia haasteita puun uudelleenkäytölle on koettu laajemminkin puurakentamisen toimijoiden keskuudessa. Aalto-yliopistossa tehdyn tutkimuksen (Niu, ym., 2021) haastatelluissa puurakentamissektorin uudelleenkäytön haasteiksi koettiin muun muassa: puutuotteiden valmistaminen kertakäyttöisiksi, epävarmuus rakennus- ja purkujätepuun saatavuudesta ja laadusta, motivaation puute tehokkaan energiahöydynnyksen rinnalla sekä purkupuun matalampi arvo verrattuna muihin purkumateriaaleihin.

## 2.2 Resurssitehokkuus ja uudelleenkäyttö puurakentamisessa

### 2.2.1 Kaskadiperiaate resurssitehokkuuden edistäjänä

Uudelleenkäytön haasteista huolimatta puumateriaalin käyttäminen uudelleen ennen polttamista energiaksi pidentäisi aikaa, jonka hiili pysyy varastoituneena puuhun ja arvokas materiaali käytössä. Kiertotalouden periaatteiden ohella erityisesti biopohjaisten tuotteiden uudelleenkäyttöä ohjaamaan on kehitetty kaskadiperiaate. Kaskadiperiaatteen tavoitteena on käyttää samaa resurssia useita kertoja uudelleen mahdollisimman korkean jalostusasteen käyttötarkoituksessa (Niu, ym., 2021). Esimerkiksi puurakentamisessa käytetty palkki tulisi ensisijaisesti käyttää sellaisenaan uudestaan, toissijaisesti sahata pienemmiksi palkeiksi tai levyiksi, jotka voidaan aikanaan silputa pieneksi jakeeksi käytettäväksi lastu- tai kuitulevyissä, ja vasta näiden käyttökertojen jälkeen polttaa energiaksi (Höglmeier, ym., 2013). Suomessa lastu- ja kuitulevyjä valmistetaan jo nyt metsäteollisuuden sivuvirroista, mutta purkupuun päätyy enimmäkseen suoraan poltettavaksi (Häkämies, ym., 2019).

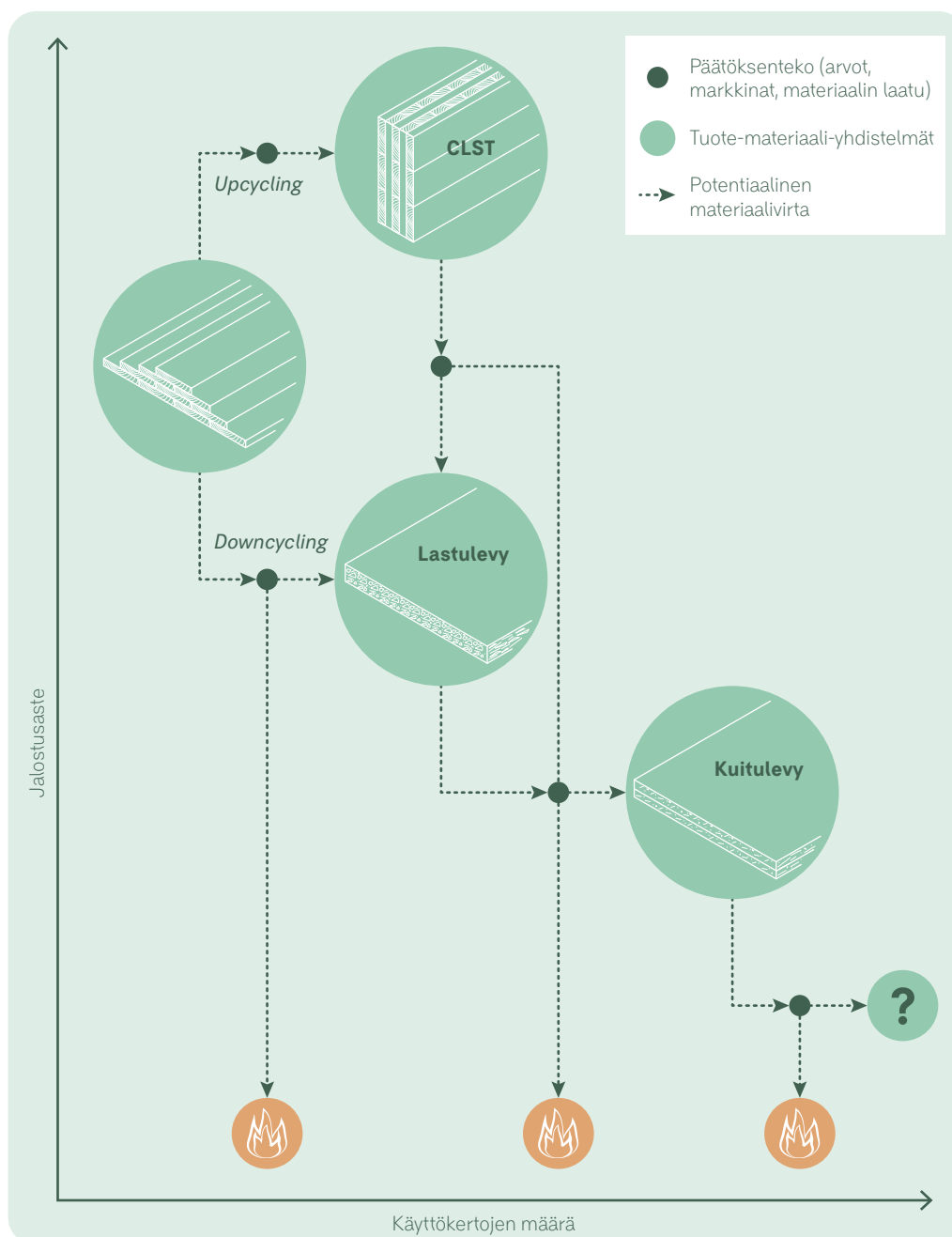
Sveitsiläisen tutkimuksen (Mehr, ym., 2018) mukaan puun moninkertainen kaskadikäyttö verrattuna puujätteen polttamiseen ensimmäisen käyttökerran jälkeen saa aikaan merkittävät vähennykset ympäristövaikutuksissa mallinnetun 200 vuoden aikana: Sveitsissä puun käytön hiilidioksidipäästöissä säästettäisiin 35–59 Mt CO<sub>2</sub> -ekv. ja hiukkaspäästöt vähenisivät 43–63 kt PM<sub>10</sub> -ekv (PM<sub>10</sub> = Particulate Matter smaller than 10 μm). Myös Bais-Moleman ym. (2018) toteavat Euroopan Unionin puunkäyttöä koskevassa tutkimuksessaan, että puisen biomassan kaskadikäytöllä saadaan aikaan merkittävät säästöt kasvihuonekaasupäästöihin verrattuna polttamiseen. He huomauttavat kuitenkin, että lyhyellä aikavälillä (2020–2030) kaskadikäyttö vaikeuttaa energiasektorin uusiutuvan energian tavoitteiden saavuttamista (mt.).

Kaskadikäytön toteutuminen vaatii otollisen ympäristön, jossa materiaalit löytävät uudet hyödyntäjät. Campbell-Johnstonin ym. (2020) mukaan kerran käytetyn materiaalin tulevaisuus riippuu päätöksenteon kontekstista; materiaalivaihtoihin liittyvät toimijat, sääntely- ja markkinaympäristö sekä materiaalin arvottaminen vaikuttavat siihen, saako materiaali uusiokäyttöä vai päätyykö se suoraan poltettavaksi. Päätöksenteko tapahtuu materiaalin tai tuotteen siirtyessä toimijalta toiselle. Campbell-Johnstonin ym. mukaan vaihtoehtoja on monia ja päätökseen vaikuttavat mm. ajalliset, maantieteelliset, taloudelliset ja luontaiset arvovalinnat materiaaliin liittyen. He ehdottavat, että kaskadikäytön päätöksentekoprosessissa tulisi ottaa huomioon kolme ulottuvuutta:

- 1) rahallinen arvo, joka muodostuu mm. työvoimakustannuksista ja energiankulutuksesta,
- 2) laatu ja toiminnallisuus eli pelastettavuus; miten paljon materiaalia voidaan kierrättää uuteen käyttöön, ja miten hyvin se sopii uuden toimijan tarpeisiin,
- 3) ohjauskehys tai hallintotapa, joka perustuu kolmen P:n (*People, Planet, Prosperity*) lähestymistapaan (mt.).

Kaskikäytön toteutumisen edellytyksiä ovat tarkastelleet myös Niu ym. (2021), jotka ehdottavat puun uudelleenkäytön mahdollistamiseksi ja edistämiseksi täydennyksiä puunkäytön nykyiseen lineaariseen talousekosysteemiin. Oleellinen tekijä materiaalien kiertämisen kannalta olisi materiaalin välittäjä, joka toimisi linkkinä purkupuun tarjoajan ja materiaalin uudelleenkäyttäjän välillä. Koko puurakentamisen ekosysteemissä keskeistä on myös materiaalien kiertämisen ja purettavuuden mahdollistava suunnittelu puun elinkaaren alkupäässä, ja huolellinen purkukartoitus ja materiaalin välittäjien mukaantulo ensimmäisen elinkaaren lopulla. (Mt.)

## Kaskadiperiaate



**Kaavio 2.** Käytetyn käsittelemättömän puutavaran kaskadikäytön mahdollisuuksia Campbell-Johnstonia ym. (2020) mukaillen. Arvoketjujen toimijakokoonpanot jätetty selkeyden vuoksi pois.

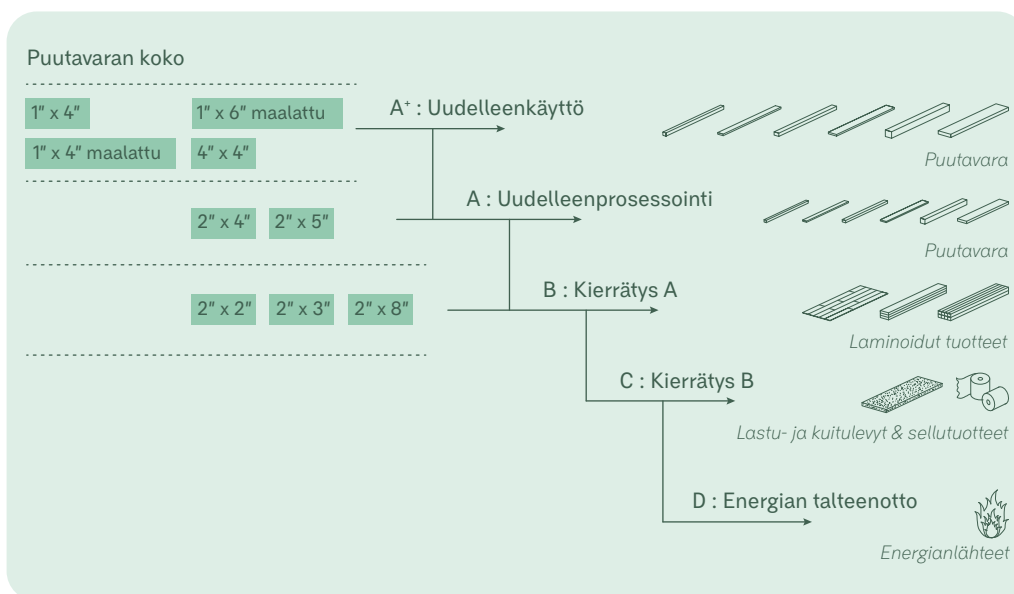
Kaaviossa 2 on hahmoteltu käsittelemättömän purkulaudan potentiaalista kaskadikäyttöä Campbell-Johnstonia ym. (2020) mukailten. Kaaviossa esitetään materiaalin tai tuotteen siirtymiä toimijalta toiselle päätöksentekotilanteiden kautta. Jokaisessa päätöksentekotilanteessa toimijat määrittävät, mikä on arvojen, markkinatilanteen ja tuotteen ominaisuuksien perusteella paras vaihtoehto seuraavaksi käyttötarkoitukseksi. Nämä päätöksentekotilanteet voisivat olla myös Niun ym. (2021) ehdottamien materiaalien välittäjien toimintaympäristöjä; materiaalien välittäjät voisivat olla uudelleenkäytön mahdollistava tekijä. Kaavio myös havainnollistaa, miten kaskadikäytössä jalostusaste laskee käyttökertojen lisääntyessä. Mitä useamman käyttökerran materiaali saa ennen päätymistä poltettavaksi, sen parempi resurssien käytön näkökulmasta.

### 2.2.2 Uudelleenkäyttö teollisessa puurakentamisessa

Mittakaavaltaan suuria vaikutuksia saataisiin aikaan käyttämällä puuta uudelleen teollisessa puurakentamisessa. Sakaguchi ym. (2017) ovat tutkineet puun uudelleenkäytön edellytyksiä materiaalin ominaisuuksien näkökulmasta. Tutkimuksessa selvisi, että uudelleenkäytön kannalta oleellisinta ei ole puukappaleen poikkileikkauksen koko, vaan kappaleen pituus ja kunto. Parhaiten uudelleenkäyttöön osoittautuivat soveltuvan kattorakenteista puretut osat, jotka säilyivät lähes alkuperäisessä mitassaan (90–100 %) ja kärsivät purussa vähiten vahinkoja. Sen sijaan lattioissa, seinissä ja alakattorakenteissa käytetyt puukappaleet kärsivät suurempia vahinkoja ja lyhenivät alkuperäisestä mitastaan huomattavasti, jopa puoleen. (Mt.) Kaaviossa 3 on esitetty eri puutavaran standardimitoille todennäköinen kaskadiperiaatteen mukainen uudelleenkäyttökohde Sakaguchia ym. (mt.) mukailten.

Käytetyn puumateriaalin hyödyntäminen esimerkiksi CLT-paneeleissa ei kuitenkaan tällä hetkellä ole mahdollista standardin SFS-EN 16351:2021 perusteella (SFS, 2021), vaikka euroopalaisen käytännön mukaan testattavaan rasiinukseen nähden poikittaisia lamelleja ei huomioida lujuus- ja jäykkyytlaskelmissa (Rose, ym., 2018). Puun lujuuteen vaikuttavat viat, kuten oksat tai halkeamat, sekä puun tiheys, johon vaikuttaa puun kasvunopeus sekä kaatoikä, ovat ominaisuuksia, jotka säilyvät puussa läpi sen käyttöiän. Käytönaikaisia vaikuttimia ovat kuor-

## Purkupuutavaran uudelleenkäyttö



**Kaavio 3.** Puutavaran potentiaalisia uudelleenkäyttömahdollisuuksia koon perusteella Sakaguchia ym. (2017) mukailten (suomennos tekijöiden).

mituksen aiheuttamat taipumat, naulanreiät sekä hyönteisten tai sienten aiheuttamat vauriot. Puun lujuusominaisuudet ja sen kyky ottaa vastaan sekä puristusta että vetoa mahdollistaisivat kuormituksen suunnan vaihtamisen uudelleenkäytössä. (Huuhka, ym., 2018b.)

Tutkimuksissa on aiemmin osoitettu, että neitseellisen puumateriaalin vaihtelevasta laadusta johtuvat luonnolliset viat voidaan minimoida laminoimalla puut ristiin. Rose ym. (2018) arvelivat saman koskevan myös vikoja, jotka ovat syntyneet puumateriaalin aiemmassa käytössä, ja tutkivat purkupuun käyttöä ristiinlaminoidun liimapuun valmistuksessa. Laboratoriotesteissä CLST:n (*cross-laminated secondary timber*) ja neitseellisestä puusta valmistetun kontrollikappaleen välillä ei löytynyt merkittävää eroa puristuslujuudessa, mutta CLST:n taivutuslujuus oli vain 60 % kontrollikappaleen taivutuslujuudesta. Testien perusteella pitkin lautaa jakautuneet useat pienet viat (naulan- ja pultinreiät, oksat) aiheuttavat vähemmän vaurioita kuin yksittäiset suuret viat tai pienemmälle alueelle keskittyneet pienet viat. (Mt.)

Taivutuslujuuden heikkoutta voidaan kompensoida käyttämällä purkupuuta ainoastaan joka toisessa CLST-elementin kerroksessa ja neitseellistä puuta joka toisessa kerroksessa (Rose, ym., 2018). CLST, jossa vain joka toinen kerros olisi purkupuuta, soveltuu lähes kaikkiin käyttötarkoituksiin korvaamaan CLT:n. Kokonaan purkupuusta valmistettua CLST:tä voitaisiin puolestaan käyttää esimerkiksi ei-kantavissa rakenteissa sekä tapauksissa, joissa elementin painolla ja paksuudella ei ole merkitystä. Puumateriaalin elinkaarta voitaisiin pidentää edelleen suunnitteleamalla CLST-paneelit irrotettaviksi ja uudelleenkäytettäviksi. (Mt.)

Standardien vuoksi CLT:n valmistuksessa käytetään tasalaatuista puuta kaikissa kerroksissa, mutta Rosen ym. (2018) löydösten perusteella lujuuden kannalta vähän merkitykselliset lamellit voitaisiin valmistaa purkupuun ohella myös heikkolaatuisemmasta puusta. Näin olisi mahdollista saavuttaa sekä taloudellisia säästöjä että ympäristön kannalta säästeliäämpi lopputulos, kun heikompilaatuisempiakin resursseja käytettäisiin korkean jalostusasteen tuotteeseen (mt.).

# 3 Kiertotalouden suunnittelu- strategioiden soveltaminen puurakentamisessa

Puurakentamisen kiertotalouden ratkaisut -selvityshankkeen aiemman, syksyllä 2021 julkaistun, Kiertotalous ja kiertotalouden mukainen suunnittelu rakennusosalalla -raportin tuloksena syntyi synteesi kiertotalouden mukaisista suunnittelustrategioista ja niiden mukaisista suunnitteluratkaisuista rakennuksen eri osissa. Tässä luvussa esitetään, millaisia suunnitteluratkaisuja kiertotalouden mukaisten strategioiden noudattaminen voisi tarkoittaa puurakentamisen kontekstissa.

## 3.1 Rakennusosien ja materiaalien optimointi

Rakennusosien optimoinnin yleisiä periaatteita ovat muotojen ja mittojen optimointi optimaalisen muotokertoimen saavuttamiseksi, rakennusosien, -elementtien tai -moduulien esivalmistus sekä materiaalihukan vähentäminen. Puurakentamisessa resurssitehokkuuteen pyrkimisen tai materiaalmäärän optimoinnin voidaan katsoa suosivan rankarakenteita massiivirakenteiden kustannuksella, sillä tarvittava puumäärä on merkittävästi pienempi rankarakenteissa. Massiivirakenteissa palomitoitus saattaa entisestään kasvattaa rakennepaksuutta ja siten puun tarvetta, mikä ei resurssitehokkuuden näkökulmasta välttämättä ole toivottavaa. Toisaalta massiivirakenteissa puuhun varastoituneen hiilen määrä on huomattavasti suurempi kuin rankarakenteissa, ja yksiaineisilla rakenteilla vältetään usein haitallisten aineiden käyttö ja monikerrosrakenteiden aiheuttamat haasteet. Optimoinnin lopputulos siis vaihtelee huomattavasti riippuen valitusta näkökulmasta ja tavoitteesta.

Resurssitehokkuuden kannalta rakennusmateriaalien ja -osien uudelleenkäyttö on keskeistä. Uudelleenkäytöllä pidetään rakennusmateriaalit pidempään korkean jalostusasteen kierrossa ja vähennetään neitseellisten raaka-aineiden käyttöä. Vastaavasti kuin CLT-elementissä on ehdotettu käytettävän kierrätettyä puuta sekundäärisissä lamelleissa (ks. luku 2.2.2), voitaisiin kierrätyspuuta hyödyntää myös rankarakenteissa. Tätä puolta erityisesti se, että esteettiset vaatimukset puupinnalle eivät rankarakenteissa ole korkeat, koska rakenne jää pintamateriaalien alle piiloon.

Suomessa puuteollisuuden pienijakeiset sivuvirrat – purut ja lastut – ohjautuvat jatkokäyttöön puuteollisuuden sisällä, esimerkiksi lastulevyn tuotantoon. Kuivana materiaalina ne ovat kysytyjä myös energiateollisuudessa. Puutuoteteollisuudessa syntyy myös suurempaa hukkaa, esimerkiksi CLT-paneelien aukotettaessa. CLT-paneelien aukotus vaikuttaa sekä paneelien hintaan että syntyvään materiaalihukkaan, ja leikatut osat ohjataan yleensä haketukseen (Waugh Thistleton Architects, 2018). Suurten aukkojen kohdalla voi olla kustannustehokkaampaa muodostaa elementti useista paneeleista yksittäisen paneelin aukottamisen sijaan. Kun leikkupaloja muodostuu, ne voitaisiin haketuksen sijaan hyödyntää esimerkiksi rakentamalla niistä kalusteita kohteessa, jolloin hukkaa ei synny. (Mt.)

## 3.2 Muuntojoustavuus

Muuntojoustavuuden yleisiä suunnitteluperiaatteita ovat muunneltavuuden ja monikäyttöisyyden mahdollistaminen esimerkiksi rakennejärjestelmän ja mitoituksen keinoin. Puurakentamisessa pilari-palkki-järjestelmä tarjoaa parhaat mahdollisuudet muunneltavuudelle, joskin jännevälit ovat tyyppillisesti betonirakentamista lyhyemmät. Pitkillä jänneväleillä rakennepaksuudet

kasvavat niin suuriksi, että pilareista muodostuu tilaa vieviä elementtejä huoneisiin ja palkit madaltavat huonekorkeutta. Molemmat heikentävät tilan toiminnallisuutta ja muunneltavuutta; toisaalta vastaavia haasteita aiheutuu myös, jos pilareita on tiheästi.

Pilari-palkki-järjestelmä mahdollistaa suuret aukot julkisivussa sekä aukotuksen muokkaamisen käyttötarkoituksen muuttuessa. Koska pilari-palkki-rakenteessa väli- ja ulkoseinät eivät ole kantavia, niihin voidaan helpommin tehdä muutoksia rakennuksen elinkaaren aikana. Myös CLT-levyjä voidaan käytön aikana aukottaa, mutta aukottaminen on tehtävä mahdolliseksi jo suunnitteluvaiheessa, kun sijoitetaan esimerkiksi talotekniikkaa.

Muuntojoustavuus on mahdollistettavissa myös modulaarisessa rakentamisessa. Modulaarisessa rakentamisessa moduulit eli esivalmistetut tilaelementit tuotetaan teollisesti (Kotilainen, 2013). Tehdasolosuhteissa moduuleihin rakennetaan kaikki talotekniikasta väliseiniin, kiintokalusteisiin ja pintamateriaaleihin. Julkisivut voidaan viimeistellä tehtaalla tai verhoilla työmaalla. Moduulit kuljetetaan tehtaalta rakennustyömaalle, missä ne kootaan rakennukseksi. Tarve siirtää kookkaita moduuleja aiheuttaa rajoituksia moduulin fyysisille ominaisuuksille, kuten painolle ja mitoille kuljetusvälineiden ja liikenneverkkojen ominaisuuksien takia. Tiukimmat rajoitukset ovat maantiekuljetuksissa. Vaikka kuljetusten asettamat reunaehdot rajoittavat huoneiden mitoitusta, huolellisella suunnittelulla muunneltavuus voidaan kuitenkin mahdollistaa myös tilaelementtirakentamisessa monenlaisin keinoin, kuten liikuteltavilla kalusteosilla ja huoneiden neutraalimitoituksella. (Mt.)

### 3.3 Ylläpidettävyys ja purettavuus

Ylläpidettävyttä ja purettavuutta edistäviä yleisiä periaatteita ovat standardoitujen liitosten käyttäminen, helpon pääsyn järjestäminen esimerkiksi taloteknisiin järjestelmiin ja rakenteiden liitoksiin, rakennekerrosten suunnitteleminen toisistaan riippumattomiksi, modulaarisuuden hyödyntäminen ja yksiaineisten rakenteiden käyttäminen. Ylläpidettävyys ja purettavuus ovat olleet keskeinen osa puurakentamista jo perinteisessä hirsirakentamisessa. Huonokuntoisia hirsiiä on voitu vaihtaa ja kokonaisia rakennuksia siirtää paikasta toiseen. Myös nykyaikaisessa suurimittakaavaisemmassa puurakentamisessa purettavuus voidaan huomioida ja mahdollistaa. Liitokset tulee suunnitella siten, että purkaminen osiin on helppoa ja ylipäättään mahdollista: mekaaniset liitokset, kuten pultit ja ruuvit, ovat tältä kannalta parempia kuin kemialliset liitokset, kuten liimat. Puurakentamisessa ehjänä purkamisen kannalta ruuvi on parempi vaihtoehto kuin naula.

Puurakentamisessa vallalla on tällä hetkellä kemialliseen liitokseen, liimaan, perustuva CLT. Se on otettu käyttöön 1990-luvun alkupuolella ja yleistynyt rakentamisessa vasta viimeisten parin vuosikymmenen aikana, joten kokemusta sen pitkäaikaiskestävyydestä tai huollettavuudesta ei vielä ole. Liima tekee CLT-rakenteista haastavia kierrätettäviä rakenteiden elinkaaren lopussa. Markkinoilla on nykyään myös liimattomia, teollisesti tuotettuja massiivipuorakenteita, kuten NUR-Holz ja Brettstapel, sekä pienemmässä mittakaavassa kokeiltuja innovaatioita, kuten suomalaiset Aalto Haitek ja Kvarken Massive. Mekaanisilla liitoksillaan nämä liimattomat vaihtoehdot mahdollistavat purkamisen, eivätkä sisällä ympäristölle haitallisia aineita, mutta liimattomia vaihtoehtoja ei vielä ole käytetty korkeassa kerrostalorakentamisessa.

Yksi ylläpidettävyttä ja purettavuutta tukeva ratkaisu on standardointi. Standardoitujen komponenttien, elementtien ja liitosten käyttäminen oikein suunniteltuna ja toteutettuna mahdollistaa, että osia on helppo irrottaa korjattavaksi, korvata uusilla osilla ja elinkaaren lopussa purkaa osiin mahdollista uudelleenkäyttöä varten. 1970-luvulla Suomessa otettiin käyttöön Betoni Elementti Systemi (BES), jossa standardoitiin betonielementit ja niiden liitosdetaljit asuinrakentamista varten (Vatanen, ym., 2017). Vuonna 2013 toteutetun Teollisen puuelement-



tirakentamisen tuotteistaminen -hankkeen tuloksena syntyi RunkoPES, puuelementtirakentamisen avoin teollisuusstandardi asuntotuotannon käyttöön. RunkoPES sisältää esimerkkejä rakennetyypeistä ja liittymädetaljeista. (Puuinfo, 2020b.)

### 3.4 Materiaalivalinnat

Materiaalivalintoihin liittyy lukuisia yleisiä periaatteita, jotka mahdollistavat kiertotalouden tavoitteiden mukaan materiaalien pysymisen kierrossa mahdollisimman pitkään. Näihin periaatteisiin kuuluu sellaisten materiaalien valitseminen, jotka ovat palautettavissa biologisiin ja teknisiin kiertoihin, eli haitattomien materiaalien käyttäminen. Kiertotalouden kannalta etua on paikallisten, kulutusta kestävien tai uusiomateriaalien käyttämisestä. Lisäksi vanhojen rakennusosien uudelleenkäyttö tarvittaessa kunnostettuina sekä neitseellisten materiaalien käytön rajoittaminen edistävät kiertotalouden tavoitteiden toteutumista.

Materiaalivalintoja tehtäessä puurakentamisessa tulee ottaa huomioon pintakäsittelyjen vaikutus materiaalien uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen: ainoastaan käsittelemätön tai puhtailla luonnonöljyillä käsitelty puu soveltuu palauttavaksi biologiseen kiertoon, muovimaalilla maalattuna tai liimattuna siitä tulee teknisen kierron materiaali. Pintakäsittelyt, kuten maalaaminen, vaikuttavat kuitenkin enemmän puutavaran kierrätettävyyteen kuin sen uudelleenkäytettävyyteen. Maalattukin puutavara on mahdollista käyttää uudelleen, mutta tällä hetkellä se päätyy lähes täysimääräisesti energiakäyttöön.

Painekyllästys muuttaa puun maatuovasta luonnonmateriaalista vaaralliseksi jätteeksi, vaikka kyllästettykin puu soveltuu energiakäyttöön tätä tarkoitusta varten suunnitellussa polttolaitoksessa. Kiertotalouden näkökulmasta on kuitenkin aiheellista kyseenalaistaa puun käsittely tavalla, joka estää sen uudelleenkäytön tai edes kierrätyksen uusiomateriaaliksi ja siirtää sen suoraan ensimmäisestä käyttökohteesta kaskadiperiaatteen (ks. luku 2.2.1) viimesijaiseen vaihtoehtoon eli poltettavaksi. Puutavaran höyläminen tai hirsien piiluaminen ovat koeteltuja ja toimiviksi todettuja keinoja suojata puumateriaalia sahausta paremmin liialta, kosteudelta ja mikrobivaurioilta.

Jotta puuta voidaan pitää uusiutuvana materiaalina, sitä tulee käyttää siten, että uusi puusukupolvi on ehtinyt kasvaa, kun puutuote tulee elinkaarensa päähän. Tämä onnistuu parhaiten käyttämällä puuta korkean jalostusasteen käyttötarkoituksessa ja käsittelemällä sitä siten, että se voidaan pitää kierrossa mahdollisimman pitkään puun luontaisia ominaisuuksia hyödyntäen. Materiaalivalintoihin liittyykin oleellisesti oikean materiaalin valitseminen oikeaan paikkaan ja käyttötarkoitukseen. Voidaan perustellusti kysyä, onko esimerkiksi puu oikea valinta materiaaliksi, jos se pitää painekyllästää tai jos puurakenne pitää jäykistää monimutkaisella monikerrosrakenteella.

### 3.5 Yhteenveto

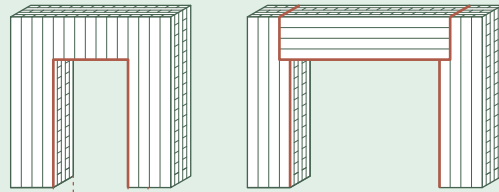
Aiemmin tässä hankkeessa kootut kiertotalouden mukaiset suunnittelustrategiat ovat sovellettavissa monipuolisesti puurakentamisen kontekstissa. Esimerkkejä suunnitteluratkaisuista resurssien optimoinnin, ylläpidettävyyden ja purettavuuden, muuntojoustavuuden sekä materiaalivalintojen näkökulmista on koottu kaavioon 4.

# Kiertotalouden suunnittelustrategiat puurakentamisessa

## OPTIMOINTI

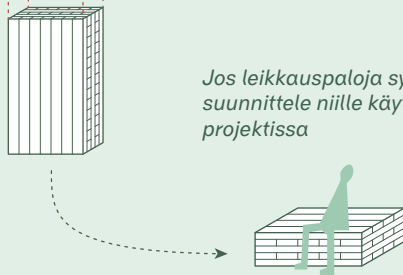
### Minimoi materiaalihukka

Esim. CLT-elementtirakentamisessa optimoi aukotustapa



### Tavoittele resurssitehokkuutta

Hiilivaraston näkökulmasta massiivirakenne, materiaalitehokkuuden näkökulmasta rankarakenne

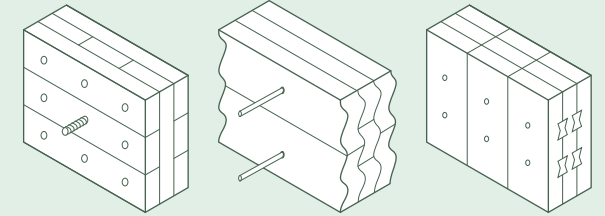


*Jos leikkauspaloja syntyy, suunnittele niille käyttöä projektissa*

## YLLÄPIDETTÄVYYS JA PURETTAVUUS

### Liimattomat innovaatiot

Esim. Brettstapel, NUR-Holz, Kvarken Massive, Aalto Häitek

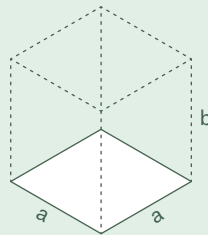


### Purkamista helpottavat liitokset

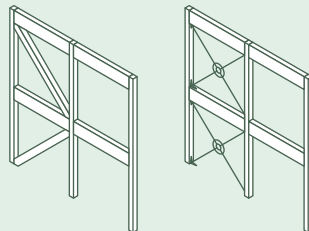
esim. ruuvit naulojen sijaan, ei komposiittirakenteita

## MUUNTOJOUSTAVUUS

**Monikäyttöisyyttä ja muunneltavuutta tukeva**  
neutraalimitoitus (a) ja riittävä huonekorkeus (b)



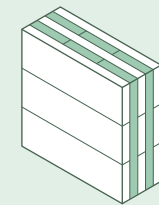
**Monikäyttöisyyttä ja muunneltavuutta tukeva**  
rakennejärjestelmä, esim. pilari-palkki



## MATERIAALIVALINNAT

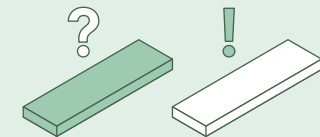
### Purkupuun käyttö

sekundäärisissä rakenteissa, esim. CLST tai piiloon jäävissä rankarakenteissa



### Käsittelyn valinta

siten, että puun uudelleenkäyttö ja kierrättäminen säilyvät mahdollisina



# Lähteet

**Bais-Moleman**, A. L. ym., 2018. Assessing wood use efficiency and greenhouse gas emissions of wood product cascading in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 172, ss. 3942–3954.

**BIOS**, 2017. *Julkainen kirje 24.3.2017*. [Online] Saatavilla: <http://bios.fi/julkilausuma/julkilausuma240317.pdf> [Viitattu 15.9.2021].

**Campbell-Johnston**, K., **Vermeulen**, W. J., **Reike**, D. & **Brullot**, S., 2020. The Circular Economy and Cascading: Towards a Framework. *Resources, Conservation & Recycling*, 7.

**Haapio**, A., 2013. *Puurakentamisen tulevaisuuden näkymät. Haastattelututkimus*. Espoo: VTT Technology 141.

**Huuhka**, S., 2018a. Tectonic Use of Reclaimed Timber. Design principles for turning scrap into architecture. *Architectural Research in Finland*, 2(1), ss. 130–151.

**Huuhka**, S., **Köliö**, A., **Annala**, P. & **Poti**, A., 2018b. *Puurakenteiden uudelleenkäyttömahdollisuudet*. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.

**Häkämies**, S., **Lähdesmäki-Josefsson**, K., **Pitkämäki**, A. & **Lehtonen**, K., 2019. *Puupohjaisen rakennus- ja purkujätteen kiertotalous*. Gaia Consulting Oy.

**Höglmeier**, K., **Weber-Blaschke**, G. & **Richter**, K., 2013. Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – A case study for south-east Germany. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, ss. 81–91.

**Luke Tilastotietokanta**, 2020a. *Metsäteollisuuden puunkäyttö muuttujina Vuosi, Alkuperä, Toimiala ja Puutavaralaji*. [online] Saatavilla: [https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_\\_04%20Metsa\\_\\_04%20Talous\\_\\_08%20Metsateollisuuden%20puunkaytto/02\\_metsateol\\_puunk\\_toimialoittain.px/table/tableViewLayout2/](https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__08%20Metsateollisuuden%20puunkaytto/02_metsateol_puunk_toimialoittain.px/table/tableViewLayout2/) [Viitattu 15.9.2021].

**Luke Tilastotietokanta**, 2020b. *Raakapuun käyttö muuttujina Vuosi ja Käyttötarkoitus*. [online] Saatavilla: [https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_\\_04%20Metsa\\_\\_04%20Talous\\_\\_14%20Puun%20kokonais kaytto/02\\_Raakapuun\\_kaytto\\_kayttotark\\_1860.px/table/tableViewLayout2/](https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__14%20Puun%20kokonais kaytto/02_Raakapuun_kaytto_kayttotark_1860.px/table/tableViewLayout2/) [Viitattu 15.9.2021].

**Luke Tilastotietokanta**, 2021a. *Puuston vuotuinen kasvu metsä- ja keitumaalla (milj. m<sup>3</sup>) muuttujina alue ja aikajakso*. [online] Saatavilla: [https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_\\_09%20Met\\_indikaattorit\\_\\_01%20Metsiin%20perustuva%20liiketoiminta/03\\_Puuston\\_vuotuinen\\_kasvu\\_taloussuunnitelmassa\\_uusi.px/](https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__09%20Met_indikaattorit__01%20Metsiin%20perustuva%20liiketoiminta/03_Puuston_vuotuinen_kasvu_taloussuunnitelmassa_uusi.px/) [Viitattu 3.5.2022].

**Luke Tilastotietokanta**, 2021b. *Puuston vuotuinen kasvu, poistuma ja hakkuukertymä 1918- muuttujina vuosi ja muuttuja*. [online] Saatavilla: [https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_\\_04%20Metsa\\_\\_02%20Rakenne%20ja%20tuotanto\\_\\_10%20Hakkuukertyma%20ja%20puuston%20poistuma/03b\\_Hakkuukertyma\\_poistuma.px/table/tableViewLayout1/](https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__02%20Rakenne%20ja%20tuotanto__10%20Hakkuukertyma%20ja%20puuston%20poistuma/03b_Hakkuukertyma_poistuma.px/table/tableViewLayout1/) [Viitattu 15.9.2021].

- Luke**, 2021a. *Metsäteollisuuden raakapuun käyttö väheni edelleen vuonna 2020*. [online] Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/uutiset/metsateollisuuden-raakapuun-kaytto-vaheni-edelleen-vuonna-2020> [Viitattu 24.5.2022].
- Luke**, 2021b. *Raakapuuta käytettiin 78 miljoonaa kuutiometriä vuonna 2020 – metsähakkeen merkitys kasvoi*. [online] Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/uutiset/raakapuuta-kaytettiin-78-miljoonaa-kuutiometriä-vuonna-2020-metsahakkeen-merkitys-kasvoi> [Viitattu 24.5.2022].
- Luke**, 2021c. *Suurin osa puusta päätyy lopulta energiaksi*. [online] Saatavilla: <https://www.luke.fi/fi/uutiset/suurin-osa-puusta-paatyy-lopulta-energiaksi> [Viitattu 24.5.2022].
- Maa- ja metsätalousministeriö**, 2015. *Kansallinen metsästrategia 2025. Valtioneuvoston periaatepäätös 12.2.2015*. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö.
- Maa- ja metsätalousministeriö**, 2021. *Biotalousstrategia*. [online] Saatavilla: <https://mmm.fi/metsat/strategiat-ja-ohjelmat/suomen-biotalousstrategia> [Viitattu 15. 9. 2021].
- Material Economics**, 2021. *EU Biomass Use In A Net-Zero Economy - A Course Correction for EU Biomass*.
- Mehr, J., Vadenbo, C., Steubing, B. & Hellweg, S.**, 2018. Environmentally optimal wood use in Switzerland – Investigating the relevance of material cascades. *Resources, Conservation & Recycling*, 131, s. 181–191.
- Puuinfo**, 2020a. *Monikerroslevy (CLT)*. [online] Saatavilla: <https://puuinfo.fi/puutieto/inisinoorituotteet/monikerroslevy-clt/> [Viitattu 9.9.2022].
- Puuinfo**, 2020b. *RunkoPES 2.0*. Saatavilla: <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/runkopes-2-0/> [Viitattu 22.9.2021].
- Puutuoteteollisuus**, 2020. *Vuoden 2019 puurakentamisen tilastot*. [online] Saatavilla: <https://puutuoteteollisuus.fi/ajankohtaista/asiantuntija-artikkelit/vuoden-2019-puurakentamisen-tilastot> [Viitattu 20.9.2019].
- Puutuoteteollisuus**, 2021. *Puun kiertotalous*. [online] Saatavilla: <https://puutuoteteollisuus.fi/juuri-nyt/kiertotalous> [Viitattu 29.6.2021].
- Rose, C. M. ym.**, 2018. Cross-Laminated Secondary Timber: Experimental Testing and Modelling the Effect of Defects and Reduced Feedstock Properties. *Sustainability*, 10, 4118.
- Sakaguchi, D., Takano, A. & Hughes, M.**, 2017. The potential for cascading wood from. *International Wood Products Journal*, 8(4), s. 208–215.
- SFS**, 2021. *SFS-EN 16351:2021*. Helsinki: SFS.

**Tolppanen, J.**, 2020. *Suomalainen puukerrostalobankekanta. Suunnitteilla ja rakenteilla olevat suomalaiset puukerrostalobankeet, 11/202*. Helsinki: Ympäristöministeriö.

**Vatanen, M., Sirkka, A., Pirttinen, V. & Ahoranta, T.**, 2017. *CLT-rakentamisen nykytila ja tulevaisuus Suomessa. Haastattelututkimus 2016*. Rovaniemi: Lapin ammattikorkeakoulu.

**Waugh Thistleton Architects**, 2018. *100 Projects UK CLT*. Softwood Lumber Board & Forestry Innovation Investment.

**Ympäristöministeriö**, 2020a. *Selvitys: Puurakentaminen kasvussa tänäkin vuonna – asuinkerrostalojen lisäksi puu taipuu myös hotelleiksi ja toimistotaloiksi. Tiedote*. [online] Saatavilla: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/selvitys-puurakentaminen-kavussa-tanakin-vuonna-asuinkerrostalojen-lisaksi-puu-taipuu-myo-hotelleiksi-ja-toimistotaloiksi> [Viitattu 23.8.2021].

**Ympäristöministeriö**, 2020b. *Yhä useampi julkinen rakennus on pian rakennettu puusta – tavoitteet puun käytölle julkisessa rakentamisessa asetettu*. [online] Saatavilla: <https://ym.fi/-/yha-useampi-julkinen-rakennus-on-pian-rakennettu-puusta-tavoitteet-puun-kaytolle-julkisessa-rakentamisessa-asetettu> [Viitattu 20.9.2021].