



Shpetim Bajgora

Puurakentamisen mahdollisuudet rakentamisen ilmastovaikutuksen pientämisessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

26.2.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Shpetim Bajgora
Otsikko:	Puurakentamisen mahdollisuudet rakentamisen ilmastovai- kutuksen pienentämisessä
Sivumäärä:	51 sivua + 0 liitettä
Aika:	26.2.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Anssi Knuutila, DI

Tässä insinöörityössä tarkasteltiin puurakentamisen mahdollisuuksia rakentamisen ilmastovaikutuksen pienentämisessä. Insinöörityön tarkoituksena oli tutkia puurakentamisen mahdollisuuksia rakentamisen ilmastovaikutuksen pienentämisessä. Työ alkoi perehdytyksellä puurakentamisen tilanteeseen Suomessa ja maailmalla sekä puurakentamisen etuihin ja mahdollisuuksiin.

Samalla tarkasteltiin puurakentamisen haasteita, määräyksiä ja puun ainutlaatuisia materiaaliominaisuuksia. Rakennuksen hiilijalanjäljen merkitys oli keskeinen teema opinnäytetyössä. Hiilijalanjäljen lisäksi pohdittiin myös hiilikädenjäljen käsitettä ja sen laskentamenetelmiä.

Opinnäytetyössä esiteltiin myös rakentamislain uudistus, puurakentamisen ohjelma ja vähähiilisen rakentamisen tiekartta, jotka tarjoavat suuntaviivoja puurakentamisen kehittämiseen ja hiilijalanjäljen pienentämiseen.

Lopuksi työ tarkasteli puurakentamisen mahdollisuuksia ilmastovaikutuksen pienentämisessä, erityisesti korostaen puun ekologisuutta ja puutuotteiden roolia hiilivarastoina. Opinnäytetyön päätelmät korostavat puurakentamisen merkitystä ympäristöystävällisen rakentamisen edistämässä ja tarjoavat näkymiä puun käytön lisäämiseen rakennuslalla. Lisäksi puurakentamisen myötä voidaan edistää kestävää metsänhoitoa ja luonnon monimuotoisuuden säilyttämistä, mikä tekee siitä kokonaisvaltaisen kestävä vaihtoehdon rakentamiselle.

Avainsanat: puurakentaminen, hiilijalanjälki, hiilikädenjälki, hiilinielu, puurakentamisen ohjelma, hiilivarasto

Abstract

Author:	Shpetim Bajgora
Title:	The Possibilities of Timber Construction in Reducing the Climate Impact of Construction
Number of Pages:	51 pages + 0 appendices
Date:	26 February 2024
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Civil Engineering
Professional Major:	Structural Engineering
Supervisors:	Senior Lecturer Anssi Knuutila, M.Sc.

The purpose of this final year project was to investigate the potential of timber construction in reducing the carbon footprint of building projects. The study began with an introduction into the state of timber construction in Finland and globally, as well as the advantages and possibilities it provides.

Simultaneously, the challenges of timber construction, regulations, and the unique material properties of wood were examined.

The significance of a building's carbon footprint and its calculation were central themes in the thesis. In addition to the carbon footprint, the concept of a carbon handprint was considered, along with its calculation methods.

The thesis also introduced the timber construction program and the roadmap for low-carbon construction, which provide guidelines for the development of timber construction and the reduction of carbon footprints.

Finally, the thesis explored the opportunities of carbon footprint reduction through timber construction, emphasizing the ecological aspects of wood and the role of wood products as carbon stores. The conclusions of the thesis emphasize the importance of timber construction in promoting environmentally friendly building practices and provide insights into increasing the use of wood in the construction industry. The potential of timber construction in reducing carbon footprints is immense, and its utilization is a step towards a more sustainable future in construction. Additionally, timber construction can promote sustainable forest management and conservation of biodiversity, making it a comprehensive sustainable option for construction.

Keywords: timber construction, carbon footprint, carbon handprint, carbon sink, timber construction program, carbon storage

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	1
1.3	Tutkimusmenetelmät ja rajaus	2
2	Puurakentaminen	3
2.1	Insinööripuutuotteet	3
2.1.1	CLT (Cross Laminated Timber) eli monikerroslevy	4
2.1.2	LVL (Laminated Veneer Lumber) eli viilupuu	4
2.1.3	Liimapuu	5
2.2	Puurakentaminen Suomessa	6
2.3	Puurakentaminen maailmalla	7
2.4	Puurakentamisen edut ja mahdollisuudet	11
2.5	Puurakentamisen haasteet	14
2.6	Puurakentamisen määräykset	15
3	Puu materiaalina	17
3.1	Lujuustekniset ominaisuudet	17
3.2	Lämpötekniset ominaisuudet	19
3.3	Palotekniset ominaisuudet	20
3.4	Kosteustekniset ominaisuudet	20
4	Rakennuksen ilmastovaikutus	22
4.1	Hiilijalanjälki	22
4.2	Hiilijalanjäljen laskeminen	24
4.3	Hiilikädenjälki	28
4.4	Hiilikädenjäljen laskeminen	29
4.5	Puurakentamisen ohjelma	31
4.6	Vähähiilinen rakentaminen	33
4.7	Rakennuslain uudistus	34
5	Puurakentamisen mahdollisuudet hiilijalanjäljen pienentämisessä	36

5.1	Puun ekologisuus	36
5.2	Puutuotteet hiilivarastona	38
5.3	Puun ympäristövaikutukset	39
5.4	Rakennesuunnittelun keinot päästöjen vähentämiseksi	41
5.5	Metsätalous	42
5.6	Puurakentamisen vaikutus metsiin ja hiilivarastoon	43
6	Johtopäätökset	44
7	Yhteenveto	46
	Lähteet	47

Käsitteet ja lyhenteet

Anisotropia	Rakenteellinen ominaisuus epäyhtenäisyydestä eri suuntiin
CO ₂	Hiilidioksidi
CLT	Cross Laminated Timber eli monikerroslevy
DLT	Dovel Laminated Timber eli vaarnattu massiivipuulevy
EPD	Environmental Product Declaration eli ympäristöseloste. Asiakirja sisältää elinkaarinäkökulmasta laadittua läpinäkyvää ja vertailukelpoista tietoa tuotteiden ympäristövaikutuksista.
Hygroskopia	Ilmiö, jossa jokin yhdiste kykenee imemään ympäristöstään kosteutta.
KHK	Kasvihuonekaasupäästöt
LCA	Life Cycle Assessment eli elinkaariarviointi
m ³	kuutiometri
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakentamisen vaikutus ympäristöön ja ilmastoon on viime vuosikymmeninä noussut keskeiseksi huolenaiheeksi yhteiskunnassa. Rakennusten energiatehokkuus, materiaalien valinta, ja rakennusprosessien kestävyys edistäminen ovat kaikki keskeisiä tekijöitä, kun pyritään vähentämään rakennusten ilmasto-vaikutusta ja ympäristövaikutuksia. Erityisen kiinnostuksen kohteena on ollut puurakentaminen, joka tarjoaa lupaavia mahdollisuuksia ilmastovaikutusten pienentämiseen ja kestäväen rakentamisen edistämiseen. [1.]

Puurakentamisen ympäristöystävällisyys perustuu moniin tekijöihin, kuten puun uusiutuvuuteen, hiilen sitomiseen, ja kevyisiin prosesseihin puutuotteiden valmistuksessa. Puu on ainoa rakennusmateriaali, joka kasvaa luonnossa ja pystyy sitomaan hiilidioksidia ilmasta itseensä. Tämä kyky tekee puusta merkittävän hiilivaraston, ja sen käyttö rakentamisessa mahdollistaa hiilen säilyttämisen pitkäaikaisesti rakenteissa. Puurakentamisella on myös muita ympäristöetuja, kuten vähäinen energiankulutus valmistusvaiheessa ja mahdollisuus käyttää paikan päällä tuotettua bioenergiaa. [1.]

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä insinööriyössä tarkastellaan puurakentamisen mahdollisuuksia rakentamisen ilmastovaikutuksen pienentämisessä. Käsitellään puurakentamisen ympäristöetuja, sen vaikutusta ilmastoon ja ympäristöön, sekä keinoja, joilla puuta voidaan hyödyntää kestävästi rakennusalaalla. Tavoitteena on luoda kooste, joka sisältää tietoa puurakentamisesta Suomessa, puun ominaisuuksista, insinööripuutuotteista, puun ekologisuudesta, puurakentamisen ohjelmasta. Tämän lisäksi työssä kerrotaan hiilijalanjäljestä ja hiilikädenjäljestä ja selostetaan sanallisesti, että miten ne lasketaan. Insinööriyössä kerrotaan myös puurakentamisen vaikutukset metsiin ja hiilivarastoon.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaus

Insinööritö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, joka tarkasteli puurakentamisen vaikutuksia ilmastovaikutukseen. Kirjallisuuskatsaus tarjosi kattavan tavan perehtyä olemassa olevaan tietoon puurakentamisen ja ilmastovaikutuksen yhteydestä.

Tutkimusprosessissa keskityttiin ensisijaisesti puurakentamisen roolin ymmärtämiseen ilmastovaikutusten kontekstissa. Kirjallisuuskatsauksen avulla tutkittiin puurakentamisen vaikutuksia hiilidioksidipäästöihin ja ilmastomuutokseen. Lisäksi tarkasteltiin erilaisia keinoja ja käytäntöjä, joilla puuta voidaan käyttää kestävästi rakennusallalla, kuten metsien kestävästä hoidosta rakennusten elinkaarren hallintaan.

Opinnäytetyön ulkopuolelle jätettiin pois laskenta. Työhön sisällytettiin vain puurakentamisen mahdollisuuksia ilmastovaikutusten pienentämisessä.

2 Puurakentaminen

Puurakentamisella on Suomessa pitkät perinteet, mutta se on kuitenkin ollut lähinnä pientalorakentamista. Suomi on asukasmääräänsä ja pinta-alaansa nähdessä Euroopan runsasmetsäisin maa, joten puu on suomalaisessa rakentamisessa luontainen ja perinteinen rakennusmateriaali. [1.]

2.1 Insinööripuutuotteet

Insinööripuutuotteet (EWP, Engineered Wood Product) on tuote, joka on valmistettu puumateriaaleista ja liimoista ja/tai kiinnittimistä (kuten nauloista) ja joka on tarkoitettu pääasiassa rakenteellisiin sovelluksiin. Laajan tuotekehityksen myötä insinööripuutuotteista on muodostunut monipuolinen perhe, kuvattuna kuvassa 1. Näiden tuotteiden etuna perinteisiin massiivipuutuotteisiin verrattuna on mahdollisuus valmistaa niitä sellaisissa ko'issa, joita puun runko ei rajoita. Insinööripuutuotteissa voidaan hyödyntää eri puulajeja ja -kokoja tehokkaammin, mikä mahdollistaa monipuolisemman käytön puuraaka-aineina kuitujen, lastujen, viilujen ja puutavaran muodossa. [2.]



Kuva 1. Insinööripuutuotteita [2.]

2.1.1 CLT (Cross Laminated Timber) eli monikerroslevy

Cross Laminated Timber (CLT) muodostuu ristiin liimatusta lautakerroksista, mikä antaa sille nimen. Näissä kerroksissa on yleensä kolme tai viisi lautakerrosta, mutta määrä voi vaihdella ja olla myös suurempi. Tämä tuottaa erittäin kevyen rakennuslevyn, joka on erittäin luja, jäykkä ja erityisen palonkestävä. [2.]

CLT:n raaka-aineena käytetään yleisimmin kuusta tai mäntyä. Näkyviin tulevissa pinnoissa voidaan asiakkaan toiveiden mukaisesti käyttää myös muita puulajeja. Levyn laudat käyvät läpi lujuuslajittelun, mikä vahvistaa entisestään sen mekaanisia ominaisuuksia. [2.]



Kuva 2. CLT eli monikerroslevy. [2.]

2.1.2 LVL (Laminated Veneer Lumber) eli viilupuu

Viilupuu on rakenteellinen puutuote, joka valmistetaan liimaamalla sorvatuista viiluista. Suomalainen viilupuu tuotetaan liimaamalla yhteen 3 mm paksuisia kuusi- ja mänteviiluja. Riippuen viilupuutuotteen tyypistä, kaikkien viilujen syysuunta voi olla pituussuunnassa tai osa viiluista on liimattu ristiin. Viilupuusta valmistettavien rakennusosien maksimipituus on 25 metriä ja maksimileveys on 2,5 metriä. [2.]



Kuva 3. LVL eli viilupuu. [2.]

2.1.3 Liimapuu

Liimapuu viittaa rakenteelliseen puutuotteeseen, joka valmistetaan liimaamalla vähintään kahdesta, enintään 45 mm paksusta sahatavaralamellista. Näiden lamellien syysuunta on liimapuutuotteen pituussuuntainen. Liimapuuta hyödynnetään monipuolisesti erilaisissa rakennuskohteissa, kuten teollisuus- ja urheiluhalleissa, suurmyymälöissä, näyttelyhalleissa ja kouluissa. Sitä käytetään myös pientaloissa ja maatalousrakennuksissa. [2.]



Kuva 4. Liimapuu [2.]

2.2 Puurakentaminen Suomessa

Puurakentaminen Suomessa on kasvattanut suosiotaan merkittävästi viime vuosina. Puu on perinteinen rakennusmateriaali Suomessa, ja sillä on vahvat juuret paikallisessa rakennuskulttuurissa. Perinteisesti Suomessa on rakennettu paljon puutaloja, mutta nykyään puuta hyödynnetään myös monipuolisesti kerrostalojen, julkisten rakennusten ja infrakohteiden rakentamisessa. [1.]

Vuonna 1995–2009 Suomessa rakennettiin vain 33 puista kerrostaloa. Tämän vähäisen määrän taustalla oli useita syitä. Yhtenä tekijänä oli puutalojen mielletty vanhanaikaisuus ja niiden näkeminen osana menneisyyttä, mikä vähensi kiinnostusta puurakentamiseen. Tämän lisäksi suomalaisen rakentamisperinteen aliarvostaminen vaikutti siihen, ettei puurakentamista nähty houkuttelevana vaihtoehtona. Eräs merkittävä rajoite oli myös Suomen poikkeava lainsäädäntö verrattuna muihin Euroopan maihin. Suomessa ei ollut sallittua rakentaa yli kolmekerroksisia puurakennuksia ilman sprinklerijärjestelmää, ja yli kahdeksankerroksisten puurakennusten rakentaminen ei ollut sallittua lainkaan. Nämä rajoitukset rajoittivat puurakentamisen mahdollisuuksia ja vaikuttivat siihen, että puisten kerrostalojen määrä pysyi vähäisenä kyseisen ajanjakson aikana. [2.]

Puukerrostalorakentamisessa on erilaisia vaihtoehtoisia runkoratkaisuja tarjolla. Perinteisesti Suomessa rakennetaan puutaloja, joissa käytetään kerroksittaisesti aseteltuja rankarakenteita. Puukerrostalojen rakentaminen tapahtuu yleensä rakennuspaikalla, jossa rakennetaan yksi kerros kerrallaan. Tämä johtaa lyhyisiin kantaviin jänneväleihin, yleensä 4,5–6,5 metrin pituisiin. Viime aikoina Suomessa on nähty kasvua puukerrostalotuotannossa, erityisesti CLT- ja LVL-runkoihin perustuvan tilaelementtitekniikan käytössä. Erityisesti CLT-tilaelementit ovat yleistyneet, ja niitä käytetään sekä kantavina pysty- että vaakaelementteinä. Myös LVL-tekniikkaa voidaan hyödyntää puurakennusten runkorakenteissa. [2.]



Kuva 5. Tuupalan koulu Kuhmossa. Suomen ensimmäinen massiivipuisista CLT-elementeistä koottu puukoulu. [3.]

2.3 Puurakentaminen maailmalla

Puurakentaminen on noussut keskeiseksi aiheeksi Yhdysvalloissa ja Kanadassa, joissa pyritään vastaamaan kasvaviin haasteisiin, kuten ilmastonmuutokseen, rakennussektorin hiilijalanjäljen vähentämiseen ja asumisen kestävän laadun parantamiseen. Tässä yhteydessä monet asiantuntijat ovat tuoneet esille, että puumateriaalilla on merkittäviä etuja verrattuna perinteisiin rakennusmateriaaleihin, kuten teräkseen ja betoniin. Yksi tärkeä huomioitava tekijä on puun uusiutuvuus. Pohjois-Amerikka tunnetaan laajoista metsävaroistaan, jotka ovat keskeisiä paitsi paikallisen talouden kannalta myös hiilensidonnän ja ekosysteemien ylläpidon näkökulmasta. Tämä tekee puusta houkuttelevan rakennusmateriaalin, koska sen käyttö edistää hiilidioksidipäästöjen vähentämistä ja kestävää metsänhoitoa. [4.]

Kanadassa on vahva valtion tuki pyrkimyksille edistää puun käyttöä rakennusalalla. Käytännössä valtion ja alueellisten hallintojen yhteistyönä sekä yhdessä teollisuuden toimijoiden kanssa tuetaan taloudellisesti puun käytön edistämistä. Erityistä painoa laitetaan koulutukseen, tutkimukseen ja pilottiprojekteihin.

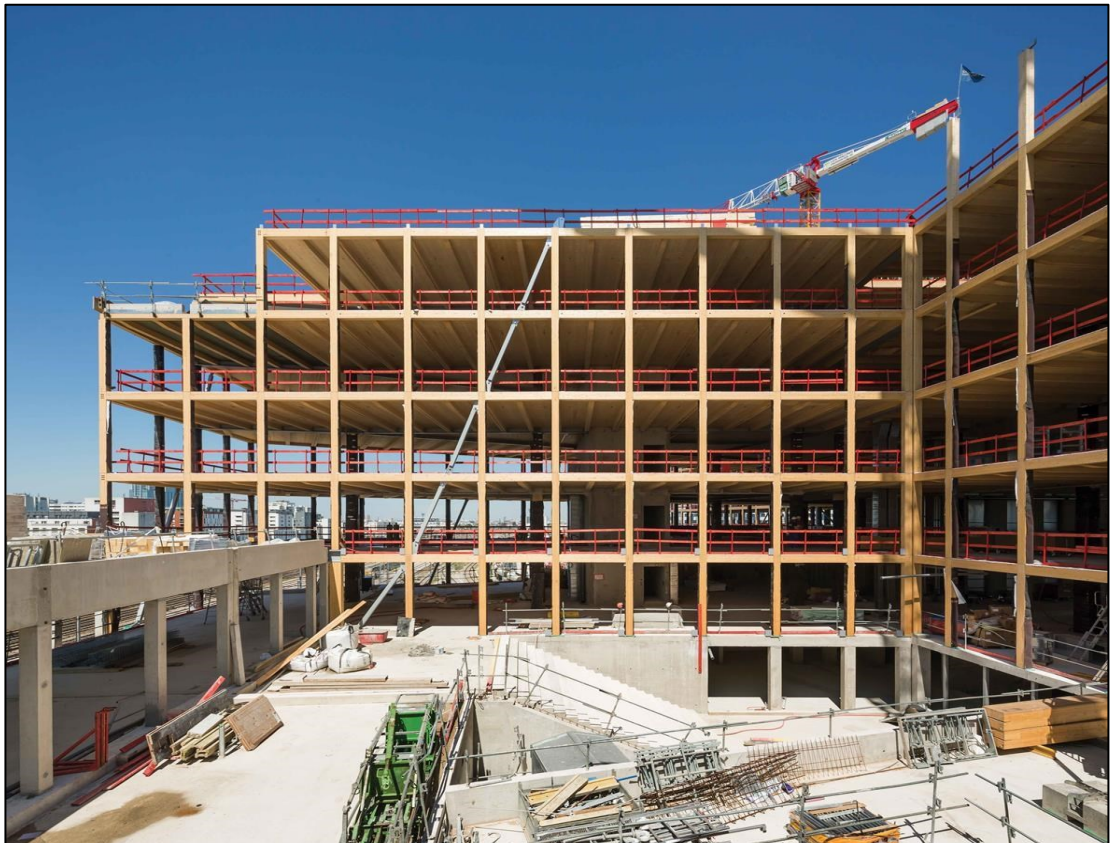
Rahoitus jaetaan tasapuolisesti kaikkien osapuolten kesken, mikä edistää tehokasta yhteistyötä ja resurssien optimaalista hyödyntämistä. Puurakentamisen edistämiseksi on laadittu selkeä suunnitelma ja toimintastrategia, johon kaikki asianosaiset ovat pitkäjänteisesti sitoutuneet. Brittiläisen Kolumbian provinssi on voimakkaasti sitoutunut toteuttamaan Wood First -periaatetta, mikä mahdollistaa 12-kerroksisten puukerrostalojen rakentamisen ja puun lisäämisen julkisissa rakennushankkeissa. Esimerkiksi Quebecin provinssi tukee paikallisen "Puuinfo" -organisaation, nimeltään *Cecobois*, miljoonalla dollarilla vuosittain. Lisäksi on varattu 15 miljoonan dollarin tuki kustannuksiin, jotka liittyvät kokeiluhankkeiden toteuttamiseen puurakentamisen alalla. [5.]

Kanadassa on havaittavissa kasvava kiinnostus puurakentamista kohtaan, mikä ilmenee muun muassa siinä, että puutuotealan yritykset panostavat rakennustuotteidensa kehittämiseen. Erityisesti massiivipuulevytuotannon laajentamiseen liittyy merkittävää kiinnostusta. Tulevaisuudessa CLT-massiivipuulevy tulee olemaan merkittävä tekijä puurakentamisessa. Lisäksi on yhtiö, joka tuottaa DLT (Dovel laminated timber) -massiivipuulevyjä ilman nauloja. Tämä tyyppi muistuttaa CLT:tä, mutta siinä hyödynnetään tammitappeja liiman asemesta. Vaikka kyseessä on hintava ja arvokas tuote, sillä on kasvava kysyntä. [5.]



Kuva 6. Maailman suurin puurakennushanke Montrealissa. [6.]

Ranskassa käynnistettiin vuonna 2017 kolmivuotinen ohjelma, jonka tavoitteena oli edistää ja tehostaa puun käyttöä. Ohjelmassa korostettiin erityisesti puun hyödyntämistä ympäristöystävällisenä rakennusmateriaalina. Biotalous on yleisesti ottaen merkittävässä asemassa Ranskan keskusteluissa, jotka liittyvät hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ja hiilinielujen laajentamiseen. Ranskalla on maailmanlaajuisesti johtava rooli kiertotalouden edistämisessä. Pariisin vuoden 2024 olympialaisten kisakylän rakennushankkeet ovat yksi selkeä esimerkki puurakentamisen edistämisestä. Kokonaisuuteen sisältyy ekoalue Seine-joen lähellä sijaitsevassa Pariisin esikaupunkialueella, jossa puurakentaminen on keskeisessä asemassa. Hankkeen päätavoitteena on luoda kokonaisvaltainen ekosysteemi, joka sisältää ekologisen näkökulman kaikissa asumisen, yritystoiminnan ja liikku-
misen osa-alueissa. Samanaikaisesti Pariisin suurkaupunkialueen raideliikennettä kehitetään voimakkaasti, ja tämä liittyy olennaisesti yli kuudenkymmenen uuden aseman rakentamiseen, jossa puumateriaalilla on keskeinen rooli. [9.]



Kuva 7. Office in Wood on Ranskan suurin puurunkoprojekti. [8.]

Viro on noussut Euroopan kärkeen puurakentamisen tuotteiden viennissä. Siellä toimii 140 puutuotealan yritystä, jotka valmistavat puusta rakennusosia ja tilaelementtejä omilla tehtaillaan. Kotimarkkinat ovat rajalliset puurakennustuotteille, mikä suuntaa suurimman osan yritysten valmistamista tuotteista viennille, erityisesti Norjaan ja Ruotsiin. Vuonna 2019 näiden yritysten viennin arvo oli noin 400 miljoonaa euroa, ja on mahdollista, että se kaksinkertaistuu lähivuosina. Kun puu jalostetaan rakennusosiksi ja tilaelementeiksi, sen arvo kasvaa huomattavasti sahatavaraan verrattuna. Virossa puutuoteala koki voimakasta kasvua 1990-luvun alkupuolella Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen, sillä se avasi mahdollisuuden oman yritystoiminnan kehittämiseen ja vapaaseen ulkomaankauppaan. [10.]

Mekaanisen jalostuksen laaja-alaisuutta voidaan selittää sillä, että Virossa on suhteellisen hyvät metsävarat suhteessa maan kokoon, mutta kemiallinen puunjalostus on vähäistä. Tämä on johtanut tarpeeseen löytää järkevä käyttötapa kaikille metsästä peräisin oleville puujakeille mekaanisen jalostuksen kautta, koska sivutuotteita ei voi hyödyntää kuiduttavassa teollisuudessa. Tämän seurauksena Virossa alkoi nopeasti syntymään pienempiä investointeja vaativaa mekaanista metsäteollisuutta ja puutuotealan yrittäjyyttä. Esimerkiksi Tartossa perustettu Kodumaja oli ensimmäinen teolliseen puurakentamiseen erikoistunut yritys, jonka menestys innoitti muitakin toimijoita alalle. [10.]

Ruotsissa puurakentaminen, erityisesti korkea puurakentaminen, on edistynyt, ja yleisesti ottaen puumateriaali on betonia edullisempaa. Puukerrostaloilla on noin 10 prosentin osuus markkinoista. Rakentamisessa korostuu kestävän kehityksen periaate, ja hiilijalanjälki uusissa rakennuksissa on ilmoitettava vuodesta 2022 lähtien. Ruotsissa, kuten Suomessakin, puurakentamisella on juuret vahvasti perinteissä. Vanhin säilynyt puurakennus Ruotsissa on peräisin 1300-luvulta, ja puurakennukset ovat keskeinen osa Ruotsin kulttuuriperintöä. Silti puurakentamisen perinne katkesi sekä Ruotsissa että Suomessa 1960-luvulla, kun puurunkoisten kerrostalojen kerrosluku rajoitettiin kahteen. [11.]

Ruotsissa muutokset palomääräyksissä vuonna 1994 avasivat mahdollisuuksia toiminnalliseen palomitoitukseen kantavien runkojen suunnittelussa. Tämä salli

suuremmat palo-osastokoot, kevyemmät rakenteet ja edullisemmat palotekniset laitteistot. Näillä uudistuksilla pyrittiin edistämään puurakentamista ja tuomaan siihen uutta ilmettä, taloudellisuutta sekä ekologisuutta. Ensimmäinen nelikerroksinen puukerrostalo valmistui Ruotsissa jo vuonna 1996, kun vastaavaa saavutusta Suomessa odotettiin vielä. [11.]

Ruotsissa uudistusten jälkeen on systemaattisesti edistetty laaja-alaista puurakentamista. Tähän kehitykseen ovat osallistuneet Ruotsin valtio, rakennusalan oppilaitokset, puutuotteiden toimittajat ja muut alan toimijat. Heidän yhteistyöllään ja sitoutumisellaan on pyritty luomaan suotuisa ympäristö puurakentamisen kasvulle ja innovaatioille. Ruotsin valtio on asettanut puurakentamisen strategiseksi painopistealueeksi ja tukenut alaa erilaisilla taloudellisilla kannustimilla ja investoinneilla. Tavoitteena on ollut luoda edellytyksiä puurakentamisen laajemmalle hyödyntämiselle osana kestävästä rakentamisesta ja kaupunkikehitystä. Rakennusalan oppilaitokset ovat panostaneet voimakkaasti puurakentamiseen liittyvään koulutukseen ja tutkimukseen. [11.]

2.4 Puurakentamisen edut ja mahdollisuudet

Rakennusteknisesti tarkasteltuna puurakentamisen keskeiset edut liittyvät nopeaan työmaa-asennukseen, energiatehokkuuteen sekä mahdollisuuteen täydentää ulkovaippaa lisäkerroksilla ja teknisillä järjestelmillä. Nämä edut perustuvat korkeaan esivalmistusasteeseen, puuelementtien keveyteen, kuivaan rakentamistapaan ja koko prosessin teollistamiseen. On merkittävää huomata, että puun tiheys on noin 500 kg/m^3 , kun taas betonin ja teräksen tiheydet ovat huomattavasti korkeampia, vastaavasti 2500 kg/m^3 ja 8000 kg/m^3 . [12.]

Puun käyttö rakentamisessa perustuu sen hyviin ominaisuuksiin, kuten:

- Puun työstäminen on vaivatonta ja siistiä
- Puutuotteet ja puurakenteet voidaan yhdistää erilaisilla liitosmenetelmillä

- Puu on suhteellisen kevyt materiaali
 - Puukonstruktiolla voidaan luoda monenlaisia rakenne- ja tilamuotoja, joita muutoin olisi haastavaa toteuttaa
 - Puurakenteet ovat kustannustehokkaampia kuin vastaavat betoni- tai muut massiiviset rakenteet
 - Puu ei vapauta terveydelle haitallisia aineita
 - Puulla on monia rakennusfysikaalisesti hyviä ominaisuuksia
 - Liimapuu on lujempaa kuin teräs, alumiini tai muu tavanomainen rakennusmateriaali verrattaessa samanpainoisia rakenteita toisiinsa
 - Puu soveltuu sekä kesä- että talvirakentamiseen
 - Puun pinta tuntuu miellyttävältä koskettaessa.
 - Puu on luonnollinen, uusiutuva ja ympäristöystävällinen materiaali, joka ei saastuta ympäristöä.
 - Puuta on saatavilla laajasti
 - Puu on ennen kaikkea lämmin ja kaunis materiaali, joka ikääntyy kauniisti.
- [12.]

Puurakentamisen epäkohtina voidaan pitää seuraavia asioita:

- Anisotrooppisuus ja suuri kosteuseläminen, jotka asettavat lisävaatimuksia rakenteiden suunnittelulle
- Puun palavuus

- Puun lahoamisalttius kosteissa olosuhteissa. [12.]

Suomessa puurakentamisen merkittävimmät kasvunäkymät liittyvät kerrostalorakentamiseen, julkiseen rakentamiseen ja infrarakentamiseen. Lisäksi potentiaalia nähdään lähiötalojen julkisivujen energiakorjauksissa sekä lisäkerros- ja täydennysrakentamisessa. [13.]

Vaikka puukerrostalorakentaminen ei vielä ole vakiintunut laajasti asuntotuotannossa, Suomessa on lähivuosina mahdollisuus rakentaa tuhansia puukerrostaloasuntoja. Tällä hetkellä puukerrostalojen osuus asuntotuotannosta on noin kymmen prosentin tuntumassa. Puuinfo toteutti elokuu-syyskuussa vuonna 2016 kyselyn puukerrostalorakentamisen tilanteesta ja konkreettisista keinoista hankkeiden käynnistämisen tehostamiseksi. Kyselyyn vastanneiden näkemykset olivat yhtenäisiä riippumatta osallistuvasta rakennusurakan osapuolesta. [13.]



Kuva 8. Eri puurunkorakennuksia maailmalla. [14.]

2.5 Puurakentamisen haasteet

Puurakentamisen kasvaessa suosituksi ympäristöystävällisenä ja kestäväenä rakennusvaihtoehtona, se kohtaa samalla useita haasteita, jotka vaativat tarkempaa tarkastelua ja ratkaisuja. Seuraavassa on joitakin haasteita:

- **Paloturvallisuus:** Puu on luonnostaan palava materiaali, mikä edellyttää erityistä huomiota paloturvallisuudessa. Puurakennusten on täytettävä tiukat turvallisuusmääräykset, ja palosuojauksen on oltava huippuluokkaa varmistaakseen rakenteiden turvallisuuden.
- **Rakennusmateriaalien saatavuus:** Puurakentamisen suosion kasvaessa voi olla haasteellista varmistaa korkealaatuisten puumateriaalien riittävä saatavuus. Tämä korostaa tarvetta kestävään metsänhoitoon ja puuraaka-aineiden tehokkaaseen hankintaan.
- **Tekninen osaaminen:** Puurakentaminen sisältää monimutkaisia rakennusmenetelmiä, ja ammattitaitoisen työvoiman saatavuus voi olla rajoitettua. Koulutuksen ja teknisen osaamisen kehittäminen on olennaista, jotta voidaan vastata tähän haasteeseen.
- **Kustannukset:** Laadukkaan puumateriaalin ja erikoistuneen työvoiman hinta voi olla korkea verrattuna perinteisiin rakennusmateriaaleihin. Siksi on tärkeää tehdä puurakentamisesta kilpailukykyinen vaihtoehto harkitseville rakennuttajille.
- **Pitkäaikainen kestävyys:** Puurakentamisen pitkäaikainen kestävyys on keskeinen huolenaihe. Rakenteiden on kestävä sääolosuhteiden ja ikääntymisen aiheuttamat vaikutukset vuosikymmenien ajan, mikä vaatii huolellista suunnittelua ja materiaalivalintoja.
- **Rakennusmääräykset:** Rakennusalan säännökset ja määräykset voivat joskus olla esteenä puurakentamisen lisääntymiselle. Tarvitaan

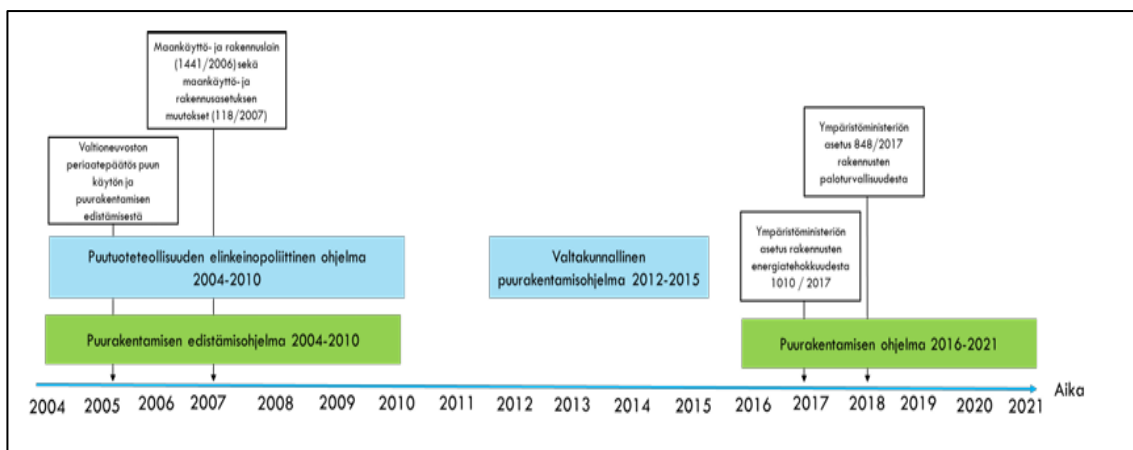
joustavampia ja puurakentamista kannustavia säädöksiä, jotka tukevat kestäväää rakentamista. [15.]

2.6 Puurakentamisen määräykset

Rakentamismääräyskokoelman päivitys parantaa puurakentamismääräysten selkeyttä ja lisää puurakentamisen mahdollisuuksia entisestään. Rakentamissäädöksissä määritellään yleiset rakentamiseen liittyvät ehdot sekä välttämättömät tekniset vaatimukset ja lupavaatimukset. Kriittiset tekniset standardit ja ohjeistukset koskevat rakennusten rakenteiden vahvuutta, paloturvallisuutta, terveyttä, energiatehokkuutta ja käyttövarmuutta. [16.]

Puurakentamista koskevat pääosin samat säädökset ja lainalaisuudet kuin muutakin rakentamista, mutta niissä on myös joitakin erityispiirteitä ja huomioitavia seikkoja, jotka liittyvät puumateriaalin ominaisuuksiin ja käyttöön rakentamisessa. Yksi keskeinen erityispiirre on puun paloturvallisuus. Puu on palava materiaali, joten palonsuojausvaatimukset voivat olla tiukempia puurakenteisissa rakennuksissa. Tämä voi vaikuttaa esimerkiksi rakennuksen ulkovaipan materiaaleihin ja palontorjuntaratkaisuihin, kuten sprinklerijärjestelmiin. Lisäksi puurakentamisessa on kiinnitettävä erityistä huomiota kosteuden hallintaan, sillä puu voi laajentua ja kutistua kosteuden vaihteluiden vaikutuksesta. Tämä voi vaikuttaa rakenteiden kestävyYTEEN ja vakauden ylläpitoon. [16.]

Kokonaisuudessaan puurakentamista koskevat määräykset pyrkivät edistämään turvallista, kestäväää ja energiatehokasta puun käyttöä rakentamisessa samalla varmistaen, että puurakennukset täyttävät kaikki tarvittavat vaatimukset ja standardit. Rakennusalan ammattilaisten ja suunnittelijoiden on tärkeää olla tietoisia näistä erityisvaatimuksista ja seurata niiden kehitystä, kun he suunnittelevat ja toteuttavat puurakennusprojekteja. [16.]



Kuva 9. Puurakentamisen edistämisen toimenpiteet 15 vuoden aikana. [17.]

Puurakentamisen aseman vakiinnuttaminen ja sen tekeminen taloudellisesti houkuttelevaksi vaihtoehdoksi nykyisten rakennustapojen rinnalla tai niiden tilalla vaatii nykyisen rakennusalan tilanteen ja sen ohjaavien ajatusmallien sekä prosessien tunnistamista. Lisäksi on olennaista suunnitella ja toteuttaa konkreettisia toimenpiteitä, jotka edistävät ja parantavat puurakentamista. [17.]

3 Puu materiaalina

Puu on yksi vanhimmista ja monipuolisimmista materiaaleista, jota ihmiskunta on käyttänyt vuosituhansien ajan. Tämä luonnollinen materiaali tarjoaa laajan valikoiman ominaisuuksia ja sovellusmahdollisuuksia. Puun ominaisuudet tekevät siitä arvokkaan resurssin niin rakennusteollisuudessa, huonekalujen valmistuksessa, taiteessa kuin energiantuotannossakin. Puu on perinteinen ja ajaton materiaali.

Puun kemiallinen koostumus sisältää lignoselluloosan, uuteaineet ja tuhkan. Lignoselluloosa, joka on osa kasvin biomassaa, koostuu polysakkarideista, kuten selluloosasta ja hemiselluloosasta, sekä ligniinistä.

Puun koostumukseen vaikuttavat sekä kuiva-aine että puuhun sitoutunut vesi. Puun kuiva-ainetta edustaa se osuus, jossa ei ole vettä. Kuiva-aineessa on tietty määrä alkuaineita, kuten 50 % hiiltä (C), 41 % happea (O) ja 6 % vetyä (H). Loput osat kuiva-aineesta koostuvat erilaisista aineista, pääasiassa typpeä (N), rikkiä (S) ja tuhkaa.

3.1 Lujuustekniset ominaisuudet

Puu on anisotrooppista ainetta, jonka ominaisuudet ovat erilaisia sen eri suunnissa. Lujuusominaisuudet riippuvat siihen kohdistuneen kuorman suunnasta ja yleensä puun tiheydestä. Lujuusominaisuudet paranevat puun kosteuden laskiessa alle 30 %:n. [18.]

Puun lujuus kasvaa, kun sen tiheys kasvaa. Puun tiheyden arvioinnissa on aina tärkeää huomioida, missä kosteustilassa puun massa ja tilavuus on mitattu. Yleisin tapa ilmoittaa puun tiheys on ilmakeivana, mikä tarkoittaa, että puun massa ja tilavuus mitataan, kun puun kosteus on 15 %. Toisinaan puun tiheyttä ilmoitetaan myös kuivatun puun tiheytenä, jossa puun massa mitataan kuivana, ja tilavuus on suurempi kuin kyllästymispisteen kosteus (noin 30 %). Suomessa yleisimpiä puulajeja ovat mänty, kuusi ja koivu. Männyn tiheys vaihtelee välillä 370–

550 kg/ m³, kuusen tiheys on 300–470 kg/m³ ja koivun tiheys vaihtelee 590–740 kg/m³. [18.]

Puun lujuus riippuu ratkaisevasti siitä, millaiseen suuntaan se altistuu kuormitukselle suhteessa sen kuituihin. Kun kyseessä on taivutus, puun lujuus suhteutuu suoraan sen tiheyteen. Jos puu on homogeenista ja virheetöntä, sen taivutuslujuus vastaa vetolujuutta. Sen sijaan, kun kuormitus suuntautuu pitkin puun kuituja, sen vetolujuus on yleensä 10–20 kertaa suurempi verrattuna tilanteeseen, jossa kuormitus on kohtisuorassa kuituihin nähden. Tämä vetolujuus vaihtelee myös puun tiheyden mukaan. [18.]

Esimerkiksi männyn kevätpuun vetolujuus on vain noin 1/6 verrattuna kesäpuuhun. Kun puhutaan ilmakeivasta puusta, sen puristuslujuus on noin puolet vastaavasta vetolujuudesta. [18.]

Puun kimmoisuus ja kulutuskestävyys kasvavat, kun puun tiheys lisääntyy. Puun kimmoisuusmoduuli syiden suunnassa voi olla jopa satakertainen verrattuna puun kimmoisuusmoduuliin suhteessa syistä kohtisuoraan. Säteen suunnassa kimmoisuusmoduuli on noin kaksi kertaa suurempi kuin kimmoisuusmoduuli tangentin suunnassa. [18.]

Taulukko 3.3S. Havupuun ominaislujuudet, jäykkyysominaisuuudet ja tiheydet lujuusluokissa C14 (T0), C18 (T1), C24 (T2), C30 (T3), C35 ja C40. (EN 338:2009)

Lujuusluokka		C14 T0	C18 T1	C24 T2	C30 T3	C35 ¹⁾	C40 ¹⁾
Ominaislujuudet (N/mm ²)							
Taivutus	$f_{m,k}$	14	18	24	30	35	40
Veto	$f_{t,0,k}$	8	11	14	18	21	24
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Puristus	$f_{c,0,k}$	16	18	21	23	25	26
	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0
Jäykkyysominaisuuudet (N/mm ²)							
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$	7000	9000	11000	12000	13000	14000
	$E_{0,05}$	4700	6000	7400	8000	8700	9400
	$E_{90,mean}$	230	300	370	400	430	470
Liukumoduuli	G_{mean}	440	560	690	750	810	880
	$G_{0,05}$	300	380	460	500	540	590
Tiheydet (kg/m ³)							
Ominaisstiheys	ρ_k	290	320	350	380	400	420
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	350	380	420	460	480	500

¹⁾ C35 tai C40 lujuusluokan sahatavaraa ei ole yleensä saatavilla puutavaraliikkeistä.

Kuva 10. Havupuun ominaislujuudet. [19.]

3.2 Lämpötekniset ominaisuudet

Lämpöteknisesti puu on hyvä materiaali. Puuta on käytetty ja käytetään edelleen mm. seinissä samanaikaisesti sekä kantavana että lämpöäeristävänä rakenteena. [20.]

Männyn ja kuusen lämmönjohtavuus on noin kolminkertainen esimerkiksi mineraalivillaan verrattuna ja puuperäisillä lämmöneristeillä (sahanpuru ja kursonlastu) noin kaksinkertainen. Puun tiheyden pienentyessä pienentyy myös puun lämmönjohtavuus. Syiden suunnassa lämmönjohtavuus on 0,22 W/m°C ja syitä vastaan 0,14 W/m°C. Puun lämmönjohtokyky kasvaa 2,7 % kosteuden lisääntyessä 1 %:n. Puun kyky varastoida lämpöä, eli lämpökapasiteetti, vaihtelee sen tiheyden, kosteuden, lämpötilan ja suunnan mukaan, jossa se on suhteessa lämpöön. [20.]

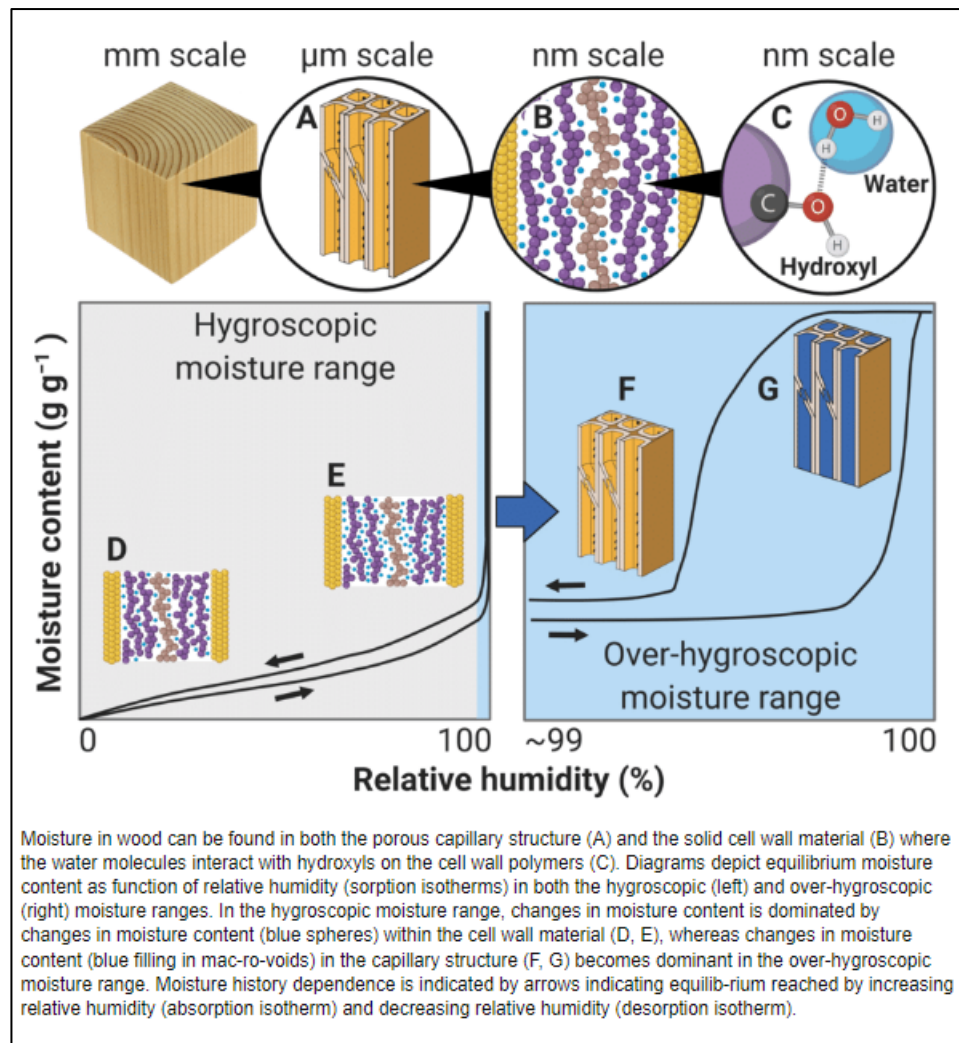
Puulla on erinomainen ominaislämpö. Kuusella ja männyllä sen keskimääräinen ominaislämpöarvo alueella $+0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa on $2300\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$. Vaikka männyn tiheys on esimerkiksi tiileen verrattuna vain noin $1/3$, on puun lämpökapasiteetti kuitenkin lähes sama. Koska veden ominaislämpö on huomattavasti suurempi kuin puulla, parantaa kosteuden lisääntyminen puun ominaislämpöä. [20.]

3.3 Palotekniset ominaisuudet

Puu on palava rakennustarvike, mikä rajoittaa jossakin määrin sen rakennusteknistä käyttöä. Huolimatta puun palavuudesta saavutetaan sillä tietyissä kantavissa rakenteissa jopa parempia palonkestoajoja kuin esimerkiksi teräksellä tai teräsbetonilla. Puun pintaan syntyvä hiilikerros hidastaa puun palamista. Puun syttymiseen tarvittava lämpötila riippuu osittain ajasta, jonka puu on kyseisessä lämpötilassa. Yleensä puun syttymispiste on $250-300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Puun pintakerrosominaisuuksia, syttymisherkkyttä ja palonkestoluokkaa voidaan parantaa kyllästyksellä. [20; 21.]

3.4 Kosteustekniset ominaisuudet

Puu on materiaali, joka kykenee reagoimaan ympäröivän ilman kosteuden vaihteluihin. Tätä ominaisuutta kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Puu pystyy sitomaan kosteutta ilmasta, kun ilmankosteus on korkea, ja luovuttamaan kosteutta, kun ympäristön ilmankosteus laskee. Puu pyrkii aina saavuttamaan tasapainoisen kosteustilan ympäristönsä kanssa. Mielenkiintoista on, että puu säilyttää tämän kyvyn jatkuvasti, eikä edes pintakäsittelyt pysty estämään puun kosteuden vaihteluja, vaan ne voivat ainoastaan hidastaa niitä. [21.]



Kuva 11. Kosteus puussa. [22.]

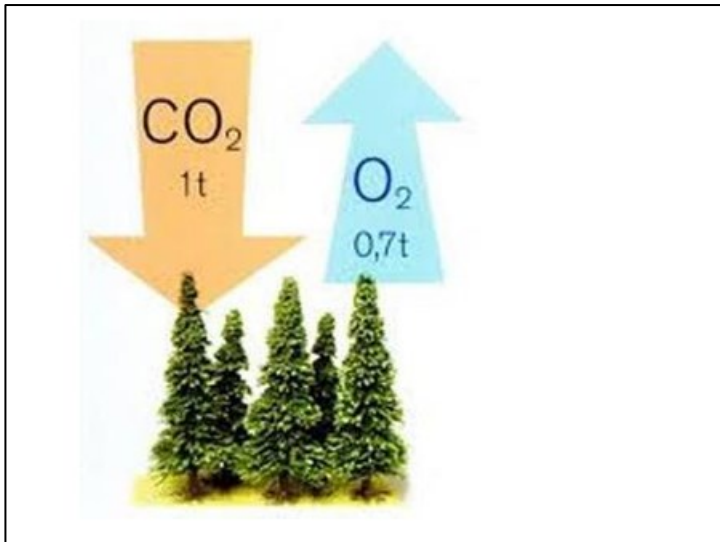
4 Rakennuksen ilmastovaikutus

Maailmassa, jossa luonnonvarat vähenevät, puu on erittäin tehokkaasti uusiutuva luonnonvara. Se on ainoa rakennusmateriaali, jonka määrä kasvaa jatkuvasti. Puurakentamisessa on mahdollisuus hyödyntää puuta nykyistä laajemmin, samalla huolehtien kestävästä metsänhoidosta ja luonnon monimuotoisuudesta. Hiili pysyy sitoutuneena puurakennuksissa vuosikymmenistä vuosisatoihin, mikä luo myönteisen ympäristövaikutuksen jatkojalostetusta puusta. Tätä myönteistä vaikutusta ei huomioida vertailtaessa puuta ja betonia, etenkin hiilijalanjäljen mittauksessa. Sen sijaan, kun tarkastellaan ns. hiilikädenjälkeä, keskitytään positiiviseen vaikutukseen. [23.]

4.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki kuvaa rakennuksen vaikutusta ilmastoon koko elinkaarensa ajan. Rakennettu ympäristö käyttää tällä hetkellä lähes puolet maailmanlaajuisesti tuotetuista materiaaleista. Lisäämällä puun käyttöä voimme pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä, ja puurakennusosat toimivat pitkäaikaisina hiilivarastoina. Ympäristöministeriö pyrkii ottamaan huomioon rakennusten hiilijalanjäljen rakentamisen säädöksissä 2020-luvun puoliväliin mennessä. Rakennusmateriaalien merkitys korostuu arvioitaessa rakentamisen ympäristövaikutuksia. Tiedämme jo melko hyvin rakennusmateriaalien ja -tuotteiden ympäristövaikutuksista. Kuitenkin selkeää vertailua puurakentamisen ja betonirakentamisen hiilijalanjäljen välillä ei vielä ole. Laskentatapoja hiilijalanjäljen suhteen on tällä hetkellä erilaisia, mikä johtaa ristiriitaisiin tutkimustuloksiin. Hiilijalanjäljen arvioinnissa yleinen käytäntö on mitata päästöjä hiilidioksidiekvivalentteina. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki kasvihuonekaasut, kuten hiilidioksidi, metaani ja dityppioksidi, muunnetaan hiilidioksidin vaikutusta vastaaviksi päästöiksi. [24.]

Tämä tehdään, jotta eri kasvihuonekaasujen ilmastovaikutuksia voidaan verrata suoraan keskenään. [24.]



Kuva 12. Yksi kuutiometri puuta sitoo 1000 kg hiilidioksidia ja samalla vapautuu 700 kg happea. [24.]

Hiilidioksidiekvivalentti (CO₂e) on mitta, joka esittää eri kasvihuonekaasujen vaikutuksen ilmaston lämpenemiseen suhteessa hiilidioksidiin. Tämä mittayksikkö on luotu mahdollistamaan eri kasvihuonekaasujen ilmaston lämpenemiseen vaikuttavien vaikutusten vertailun ja yhteenlaskemisen. Se perustuu siihen, että kaikilla kasvihuonekaasuilla on erilainen kyky sitoa lämpösäteilyä, mikä vaikuttaa ilmaston lämpenemiseen. Hiilidioksidiekvivalenttia laskettaessa otetaan huomioon kyseisen kaasun vaikutus ilmastoon sekä sen pitkäaikainen läsnäolo ilmakehässä. [24.]

VTT:n arvion mukaan nykyisin keskimääräisen asuinkerrostalon hiilijalanjäljestä peräti 63 % syntyy energian käytöstä, kun taas 37 % muodostuu rakennuksen koko elinkaaren muista vaiheista. Tärkein näistä tekijöistä on rakennusmateriaalien valmistusvaihe. Energian käytön vähentämiseen rakennusten käyttövaiheessa on kiinnitetty huomiota pitkään, mutta myös rakennusvaiheessa tehtävillä päätöksillä voidaan vaikuttaa huomattavasti rakennuksen energiankulutukseen. Erityisesti käytettävillä lämmitysmuodoilla on suora vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen. Lähes nollaenergiarakennuksissa energiankulutus on vähäisempää,

minkä seurauksena rakennusmateriaalien osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä kasvaa merkittäväksi. [25.]

4.2 Hiilijalanjäljen laskeminen

Rakennusten hiilijalanjäljen arvioimiseksi on julkaistu eurooppalainen standardi SFS-EN 15978. Tässä standardissa elinkaari jaetaan vaiheisiin, jotka kattavat rakennustuotteiden valmistuksen ja kuljetuksen, työmaatoiminnot, käytön, kunnossapidon, osien vaihdon, sekä tulevan rakennuksen energian ja veden käytön. Lisäksi huomioidaan lopulta purkuvaihe. Hiilijalanjäljen laskenta on monivaiheinen ja vaatii kattavan tiedon keräämistä. [26.]



Kuva 13. Rakennuksen hiilijalanjäljen laskennassa huomioitavat vaiheet. [26.]

Käytännössä hiilijalanjälkilaskenta perustuu rakennuksen suunnitelma-aineistoon. A-vaiheessa otetaan huomioon tuotevaiheen ja rakentamisvaiheen päästöt,

mukaan lukien rakennusmateriaalien, raaka-aineiden hankinta, kuljetukset, valmistuksen päästöt, ja työmaatoiminnot (kuva 13). Tärkeänä lähtötietona tarvitaan suunnitteluratkaisun määrätiedot, kuten rakennusosa-arvio, rakennuttajan määräluettelo tai tietomalli. Rakennusosien päästöt lasketaan tarkastellen tietoja määräluetteloista ja suunnitelmista, mukaan lukien ARK- ja RAK-suunnitelmat. Tuotekohtaisissa päästötiedoissa hyödynnetään ympäristöselosteita (Environmental Product Declaration, EPD), joissa esitetään standardimuotoisesti tuotteen tai tuoteryhmän elinkaariarvio, kuten esimerkiksi kipsilevyjen, betoniraudotteiden tai sahatavaran kohdalla. [26.]

Rakennusten elinkaari koostuu viidestä keskeisestä vaiheesta, jotka ovat: tuotantovaihe, rakentamisvaihe, käyttövaihe, elinkaaren päättymisvaihe ja rakennuksen käytön ulkopuoliset hyödyt. Arvioitaessa koko rakennuksen elinkaarta, valmiita taulukkoarvoja moduuleissa A4–A5, B3–B4 ja C1–C4 voidaan hyödyntää (katso kuva 13). Toisenlaisena lähestymistapana hiilijalanjäljen laskemiseen voi käyttää hankkeeseen liittyviä yksityiskohtaisia tietoja. On huomioitava, että tiettyjä käyttövaiheeseen liittyviä osia, kuten B1–B2 ja B7, ei ole vielä mahdollista arvioida tarkasti, koska päästötietoja on saatavilla rajallisesti. Tällaiset vaiheet on siis jätettävä arvioinnin ulkopuolelle. Moduulit A1–A3 ja B6 edellyttävät aina hankkeeseen sidottuja tietoja hiilijalanjäljen laskemiseksi. [26.]

Valmistusvaihe kattaa A1–A3-moduulit. A1-moduulissa huomioidaan hiilidioksidipäästöt, jotka liittyvät raaka-aineiden hankintaan. A2-moduulissa tarkastellaan hiilidioksidipäästöjä, jotka syntyvät raaka-aineiden kuljetuksesta valmistuspaikalle. A3-moduuli keskittyy puolestaan tuotteen valmistusvaiheen hiilidioksidipäästöihin. [26.]

Selvittääksemme A1–A3 moduulien hiilidioksidipäästöt, tarvitaan arvioinnin aloittamista rajaamalla elinkaariarvioinnissa tarkasteltavat rakennusosat. Rajaamisessa on otettava huomioon tontti, rakennuksen kantavat ja täydentävät rakenteet, talotekniikka sekä työmaan yleiset toiminnot. Jokaisella osa-alueella on omat määritellyt ominaisuudet, jotka sisältyvät arviointiin, sekä ne ominaisuudet, jotka suljetaan pois arvioinnista. Otetaan huomioon vain ne rakennusosat, joiden

ilmastovaikutus on vähäinen koko rakennuksen elinkaaren aikana verrattuna muihin osiin tai joiden ilmastovaikutuksen arviointi on tällä hetkellä haastavaa. [26.]

Näiden osien vaikutus rakennuksen kokonaishiilijalanjälkeen on vähäinen tai arviointi ei ole tällä hetkellä toteutettavissa. [26.]

	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly arviointiin
Tontti	+ Maaosat + Tuennat ja vahvistukset + Päälysteet + Alueen rakenteet	- Alueen varusteet - Kasvillisuus - Kasvillisuuden, maaperän tai vesistöjen muutoksista aiheutuvat ilmastovaikutukset
Kantavat rakenteet	+ Perustukset + Alapohjat + Runko + Julkisivut, ovet ja ikkunat + Ulkotasot + Kattorakenteet	- Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
Täydentävät rakenteet	+ Väliseinät ja ovet + Portaat + Pintarakenteet + Tyypilliset kiintokalusteet + Hormit ja tulisijat + Tilaelementit	- Pintamateriaalit ja listat - Pintakäsittelyt ja maalaukset - Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
Talotekniikka	+ Lämmitysjärjestelmät + Vesi- ja viemärijärjestelmät + Ilmastointijärjestelmät + Jäähdytysjärjestelmät + Sprinklerit + Sähköjärjestelmät + Hissit	- Tietotekniset järjestelmät - Taloautomaatio - Varavirtajärjestelmät - Liukuportaat - Erilliset koneet ja laitteet
Työmaa	+ Työmaalla kulutettu energia	- Telineet, suojaukset - Väliaikaiset rakenteet, muotit ja tekniset laitteet - Työmaatiloiden elinkaari - Työmaan henkilöliikenne

Kuva 14. Elinkaariarvioinnissa arvioitavat rakennusosat. [26.]

Rakentamisvaihe koostuu moduuleista A4–A5. Moduuli A4 sisältää keskiarvomatkan tehtaalta työmaalle sekä mahdolliset välivarastointi- tai esivalmistuspaikat. Moduuli A5 sisältää työmaalla tapahtuvat jalostukset tuotteelle ja siitä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Arviointivaiheessa oletetaan, että menomatkalla kuljettavan kuorman täyttöaste on 80 % ja paluumatkalla se on 0 %. Maamassojen kuljetuksessa täyttöasteena käytetään 100 % sekä menomatkalla että paluumatkalla. Kuljetusten päästöt tulee laskea erikseen jokaiselle kuljetukselle, ottaen huomioon eri kuljetusmuotojen ja polttoaineiden tyypilliset päästökertoimet. Rakennuskoneiden kuljetuksia ja rakennustyöntekijöiden matkoja työmaalle ei oteta

huomioon tässä arvioinnissa. Moduulissa A5 lasketaan työmaalla kuluvan ostoenergian sekä polttoaineiden hiilidioksidipäästöt. Tämä analyysi kattaa työmaan sähkön ja lämmityksen kulutuksen aiheuttaman energiantarpeen. Päästöt lasketaan käyttäen energiamuotojen ja polttoaineiden päästökertoimia. [26.]

Käyttövaihe voidaan hahmotella seitsemään osaan, jotka ovat B1–B7 (katso kuva 13). Moduuli B1 keskittyy tuotteen käyttöön rakennuksessa, B2 kunnossapitoon, B3 korjauksiin, B4 osien vaihtoon, B5 laajamittaisiin korjauksiin, B6 energian käyttöön ja B7 veden käyttöön. Jos rakennukseen kohdistuu mittava korjaushanke, hiilijalanjäljen arviointi keskittyy vain kyseisen hankkeen aiheuttamaan työmaan hiilijalanjälkeen moduuleissa A5, B3–B5 ja C1. Aiemmin rakennettujen rakennusosien hiilijalanjälkeä ei tarvitse huomioida takautuvasti. [26.]

B3-B5 moduuleissa määritellään kuluneen ostoenergian ja polttoaineiden hiilidioksidipäästöjen laskenta samankaltaisilla periaatteilla kuin moduulissa A5. Moduuli B4 pyrkii analysoimaan, kuinka monta rakennustuotetta on tarpeen vaihtaa rakennuksen elinkaaren aikana. Tämän moduulin puitteissa arvioinnissa otetaan huomioon ne tuotteet, joiden tekninen käyttöikä jää lyhyemmäksi kuin rakennuksen suunniteltu elinikä. Kun tavoiteikää arvioidaan, huomioidaan tuotteiden teknisen käyttöiän lisäksi myös rasitusaste, mahdolliset kulumiset sekä niiden vaikutus huolto- ja vaihtotarpeeseen. Moduulissa B6 arvioidaan rakennuksen energiankulutuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Tämä lasketaan perustuen rakennuksen arvioituun vuotuiseen energiankulutukseen, joka kerrotaan eri energiamuotojen päästökertoimilla. Lopuksi vuotuinen hiilijalanjälki tulee kertoa rakennuksen käyttöiällä, jotta saadaan selville hiilijalanjäljen kokonaisvaikutus rakennuksen elinkaaren aikana. [26.]

Moduulit C1–C4 muodostavat rakennuksen elinkaaren loppuvaiheen (katso kuva 13). Moduuli C1 keskittyy purkutoimenpiteisiin, C2 kuljetuksiin jatkokäsittelypaikoihin, C3 jätepurkujen käsittelyyn ja C4 jätepurkujen loppusijoitukseen. Moduulissa C1 tarkastellaan purkutyömaan hiilijalanjälkeä, erityisesti ostoenergian ja polttoaineiden osalta, samalla tavoin kuin A5-moduulissa. Päästökertoimien

laskennassa otetaan huomioon energiamuotojen ja polttoaineiden päästökertoimet, huomioiden tulevaisuuden päästövähennykset rakennuksen käyttöiän aikana.

C2-moduulissa arvioidaan kaikki kuljetukset purkupaikalta lopullisiin sijoituspaikoihin, mukaan lukien mahdolliset väli- ja jatkokäsittelypaikat ennen uudelleenkäyttöä, kierrätystä tai jätteidenkäsittelyä. Kuljetukset lasketaan erikseen ottaen huomioon eri kuljetusmuotojen ja polttoaineiden päästökertoimet. Menomatkan kuorma-arvoksi oletetaan 0 % ja paluumatkalla 80 %. [26.]

Moduuleissa C3 ja C4 pyritään analysoimaan jätepurkujen ja loppusijoituksen ympäristövaikutuksia erityisesti niiden hiilijalanjäljen näkökulmasta. Tämä analyysi perustuu valmiisiin taulukoihin ja niiden tulokset normalisoidaan lämmitetyn nettoalan perusteella. Tulokset jaotellaan rakennuksen käyttöiälle ja näin saadaan moduulien C3 ja C4 arvot vuositasolle. [26.]

4.3 Hiilikädenjälki

Hiilikädenjälki viittaa tuotteen tai palvelun myönteisiin ympäristövaikutuksiin, erityisesti ilmastovaikutuksiin. Esimerkiksi rakennuksen hiilikädenjälki kattaa ne myönteiset ilmastovaikutukset, jotka syntyvät rakentamisesta. Nämä voivat sisältää kierrätetystä materiaalista valmistetut teräsrakenteet, puupohjaisiin rakenteisiin sitoutuneen hiilen tai uuden kasvuston istuttamisen pihaan. Aurinkopaneelit asennettuna rakennuksen katolle, jotka tuottavat uusiutuvaa energiaa, lasketaan myös positiiviseksi hiilikädenjäljeksi. Tärkeää on huomata, että hiilikädenjäljen laskennassa ei vähennetä hiilijalanjälkeä. [27.]

Vaikka termi ei ole standardoitu, se viittaa aina positiivisiin tekijöihin. VTT:n määritelmän mukaan hiilikädenjälki on se hyöty, jonka asiakas saa siitä, että yritys valmistaa tuotteita ja tarjoaa palveluja, jotka auttavat asiakasta vähentämään hiilijalanjälkeään. Kun asiakas ottaa käyttöön tällaisen tuotteen korvaten aiemmin käyttämänsä tuotteen, hänen hiilijalanjälkensä pienenee, ja tämä vähennys on hiilikädenjälkeä. [27.]

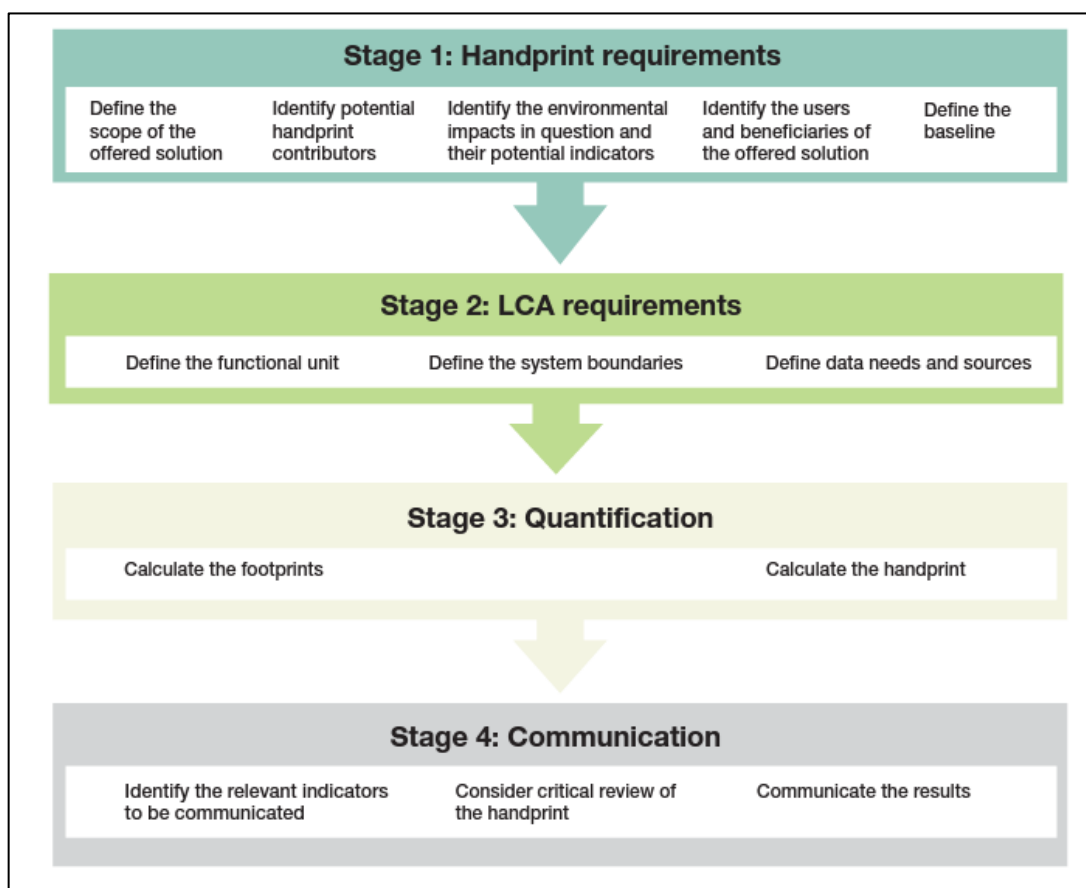


Kuva 15. Hiilijalanjäljen ja -kädenjäljen ero. [27.]

4.4 Hiilikädenjäljen laskeminen

Hiilikädenjäljen laskentaprosessi koostuu neljästä vaiheesta ja se perustuu vahvasti elinkaariarvioinnin (LCA) menetelmään. Ensimmäisessä vaiheessa, joka on ominainen kädenjäljen laskennalle, määritetään tarkasteltavan kontekstin olosuhteet peruslinjaa varten, jota vasten mahdollinen kädenjälki voidaan luoda.

Tämän vaiheen jälkeen seuraa tyypillisiä LCA-vaiheita ja standardin hiilijalanjäljen laskentaa. Viimeiseksi toteutetaan viestintäosa kohdeyleisön tarpeiden mukaisesti. Kuten yleensä LCA:ssa, myös kädenjäljen määrittäminen on periaatteessa toistuva prosessi: seuraavan vaiheen löydökset voivat edellyttää aikaisempien vaiheiden päivittämistä. Kuvassa 12 esitetty laaja ympäristökädenjäljen viitekehys voidaan ottaa käyttöön ohjaavana mallina kädenjäljen määrittämisprosessissa.



Kuva 16. Hiilikädenjäljen laskemisen neljä vaihetta. [27.]

Hiilikädenjäljen laskennalla tarkoitetaan menetelmää, jonka avulla arvioidaan tuotteen, palvelun tai prosessin tuottamia positiivisia ympäristövaikutuksia, erityisesti hiilidioksidipäästöjen vähentymistä suhteessa vaihtoehtoihin ratkaisuihin. Hiilikädenjäljen arvioinnissa vertaillaan tuotteen tai palvelun hiilijalanjälkeä perinteiseen vertailuratkaisuun, kuten esimerkiksi tuotteen elinkaaren aikana syntyviin päästöihin. Hiilikädenjäljen laskennassa tärkeää on vertailukohteen huomioiminen, ja se selkeyttää hiilijalanjäljen vaikutuksia, antaen kokonaiskuvan ympäristövaikutuksista. [27.]

Hiilijalanjäljen laskennan merkitys tulee esiin vasta, kun tuloksia vertaillaan vaihtoehtoihin tuotteisiin, palveluihin tai prosesseihin. Laskenta sinänsä ei edellytä vaihtoehtoisten ratkaisujen määrittelyä. Päinvastoin suhteellisen hiilikädenjäljen laskemiseksi on tarpeen tehdä vertailua, kun hiilidioksidin sitomista ei oteta huomioon. Hiilikädenjäljen saavuttamiseksi tuotteen tai palvelun hiilijalanjälki verrataan vertailuratkaisun hiilijalanjälkeen, kun se on käytössä asiakkaan toimesta. [27.]

4.5 Puurakentamisen ohjelma

Puurakentamisen ohjelma (2016–2023) pyrkii edistämään puun monipuolista käyttöä ja lisäämään sen arvostusta rakennusosalalla. Sen lisäksi ohjelma pyrkii vauhdittamaan kansainvälisesti kilpailukykyistä puurakentamisen asiantunte- musta ja edistämään teollisen valmistuksen yritystoimintaa Suomessa. Puura- kentamisen ohjelma edistää puun käyttöä vahvistamalla alan osaamista, kehittä- mällä puurakentamisen sääntelyä ja rakentamismääräyksiä sekä tarjoamalla ob- jektiivista tietoa puurakentamisesta. Se muodostaa viimeisimmän kansallisen po- liittisen toimenpiteen puun käytön edistämiseksi rakennusosalalla. Ohjelman pää- tavoitteena on, että 2020-luvulla puun käyttö rakentamisessa on luontevaa ja yleistä Suomessa. [29.]

Ohjelman päämääränä on myös kannustaa puun hyödyntämistä julkisissa raken- nushankkeissa sekä kaupunkialueilla ja suurissa infrastruktuurikohteissa, kuten silloissa ja halleissa, tällä tavoin lisäten merkittävästi pitkäkestoisia hiilivarastoja. Samalla ohjelman pyrkimyksenä on tukea ja kehittää teollista valmistusta ja pa- rantaa kansainvälisen kilpailukykyyn omaavaa puurakentamisaosaamista. Puura- kentamisen toimenpideohjelman avulla pyritään tukemaan puun käytön lisää- mistä kehittämällä lainsäädäntöä ja rakennusmääräyksiä, tarjoamalla tietoa sekä edistämällä alan ammattitaitoa. [29.]

Puurakentamisen ohjelman ensimmäinen tavoite on puun käyttämisen lisäämi- nen kaupunkiympäristössä. Tätä pyritään edistämään tukemalla, aktivoimalla ja kehittämällä yhteistyötä kaupunkien kanssa sekä laatimalla puurakentamista

edistäviä ohjelmia. Tukeminen viittaa käytännössä valtionavustuksiin, aktivoiminen taas rakennuttajien ja rakennusorganisaatioiden yhteistyön lisäämiseen ja ohjeistusten luomiseen. Tavoitteena on lisätä puun käyttöä erityisesti kerrostoiloissa, toimistorakennuksissa ja korjausrakentamisessa. Ensimmäisen painopistealueen onnistunut toteutus vaatii toimenpiteitä kaupunkien rakentamista ohjaavilta viranomaisilta, rakennuttajilta ja puurakennuskomponenttien valmistajilta. [29.]

Toinen merkittävä tavoite keskittyy puun laajempaan hyödyntämiseen julkisessa rakentamisessa. Tämän päämäärän saavuttamiseksi pyritään lisäämään kuntapäätäjien tietoisuutta puurakentamisesta ja edistämään hankintaviranomaisten osaamista puurakennusten hankinnoissa. Päämääränä on alentaa rakennustuotteiden hiilijalanjälkeä edistämällä siirtymistä puupohjaisiin tuotteisiin ja lisäämällä tietoisuutta hiilijalanjäljen tärkeydestä. Käytännössä pyritään edistämään puun käyttöä julkisissa rakennushankkeissa muun muassa vahvistamalla selkeitä hankintaohjeita, ottamalla käyttöön sähköisiä hankintatyökaluja sekä hiilijalanjäljen laskenta- ja arviointivälineitä. [29.]

Kolmantena tavoitteena on suurten puurakenteiden, kuten siltojen ja hallien, rakentamisen edistäminen. Tämän edistäminen vaatii vakiintuneita yhteisiä toimintatapoja ja selkeitä standardeja. Isokokoisten puurakenteiden edistämiseksi on lanseerattu *Kasvua ja kehitystä puusta* -tukiohjelma, joka toimii innostimena uusille toimijoille sekä edistää uusien ratkaisujen kehittämistä alalla. Lisäksi tarvitaan rakennusvalvonnan täydennyskoulutusta ja rakennustekniikan opettajien koulutusohjelmia. [29.]

Neljäntenä keskeisenä painopisteenä on alueellisen osaamisen vahvistaminen puurakentamisen saralla. Tämä tavoitellaan muun muassa parantamalla puurakentamiseen liittyvää opetusta ammatillisissa oppilaitoksissa ja korkeakouluissa, järjestämällä hankkeita puurakentamisen kehittämiseksi ja ylläpitämällä laajaa valtakunnallista tietokantaa. Tavoitteena on, että rakennushankkeiden kautta syntynyt osaaminen ja kokemus välittyvät eteenpäin tutkimus- ja

kehittämörganisaatioille, viranomaisille, rakennuttajille, rakennusliikkeille ja puutuotteiden toimittajille. [29.]

Viides keskeinen näkökohta liittyy viennin tukemiseen. Tätä tuetaan edistämällä Suomen näkyvyyttä pohjoismaisessa yhteistyössä sekä kansainvälisissä verkostoissa. Käytännössä tämä tarkoittaa osallistumista yhteispohjoismaiseen puurakentamisen säädöskehitystyöhön ja panostuksia puurakentamisen tutkimushankkeisiin. Tavoitteena on parantaa suomalaisen puurakentamisen kilpailukykyä ja tuotteiden asemaa globaaleilla markkinoilla. [29.]

4.6 Vähähiilinen rakentaminen

Ympäristöministeriö tilasi tutkimuksen suunnitelmasta, jonka tavoitteena on alentaa rakentamisen ja erityisesti rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä. Samalla pyritään edistämään Suomen rakennus- ja kiinteistösektorin ilmastotavoitteita. Vähähiilisen rakentamisen tiekartassa asetettu tavoite on, että rakennusten elinkaarren vähähiilisyys sisällytetään virallisiin rakennusmääräyksiin viimeistään 2020-luvun puoliväliin mennessä. Tavoitteena on, että säädöksissä huomioidaan rakennusmateriaalien hiilijalanjälki rakentamisen ohjauksen näkökulmasta. Tiekartatyössä tehtiin ensimmäistä kertaa perusteellinen kartoitus Suomen rakennetun ympäristön ja rakennusteollisuuden laajamittaisesta hiilijalanjäljestä sekä sen koostumuksesta. Lisäksi työssä arvioitiin päästöjen vähentämisen mahdollisuuksia ja haasteita sekä pyrittiin muodostamaan kokonaiskäsitys tulevien päästöjen kehittymisestä. [30.]

Ympäristöministeriön tilaaman selvityksen perusteella vähähiilisen rakentamisen tiekartassa päätettiin käyttää tehokkaana ohjauskeinona velvoittavaa sääntelyä. Tähän päätökseen vaikuttivat haastattelut, työpajat ja kokemukset muista Euroopan maista, jotka pitivät sääntelyohjausta tehokkaana menetelmänä. Lisäksi ohjausta vahvistetaan ja nopeutetaan muiden sääntelykeinojen, kuten informaation, säädösten ja taloudellisen ohjauksen avulla. Ohjauskeinojen tukena kehitetään yhtenäinen päästötietokanta ja helposti käytettävä laskentatyökalu. Vähähiilisen rakentamisen tiekartan tarkoituksena, joka on laadittu ympäristöministeriön

toimeksiannosta, on ohjata hankkeita kokonaisvaltaisesti. Tällä ohjauskeinolla pyritään mahdollistamaan hankkeiden toteuttaminen vähäpäästöisemmillä vaihtoehtoilla, kuten ohjaamalla materiaalivalintoja. Tiekartan avulla pyritään ohjaamaan rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälkeä eurooppalaisen standardoidun laskentamenetelmän avulla. [30.]

Vähähiilisen rakentamisen tiekartan kolmivaiheisen käyttöönoton suunniteltu aikataulu on vuoteen 2025 saakka. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan ohjausjärjestelmän vaikutuksia ja testataan menetelmiä julkisissa rakennushankkeissa. Tähän vaiheeseen liittyy myös päästötietokannan ja hiilijalanjäljen laskentamallin kehittäminen. Toisessa vaiheessa valmistellaan itse säädösohjaus ja integroidaan se kaavoitukseen ja energiaohjaukseen. Säädösohjauksen lisäksi pyritään laajentamaan pilottihankkeita ja seuraamaan sekä tilastoimaan rakennusten päästötietoja. Kolmannessa vaiheessa ohjausjärjestelmä otetaan käyttöön viimeistään vuoteen 2025 mennessä. Viimeiseen vaiheeseen sisältyy mahdollinen ilmoitusvelvollisuus, sitovat raja-arvot, rakennuskannan asteittainen integrointi ohjaukseen sekä päästötietojen seuranta. [30.]

4.7 Rakennuslain uudistus

Uusi rakentamislaki astuu voimaan tammikuun 1. päivänä 2025. Se sisällyttää kattavasti ilmastonmuutoksen torjunnan osaksi rakentamisen oikeudellista kehystä. Lisäksi laki helpottaa rakentamisprosesseja, edistää kiertotaloutta ja digitalisaatiota sekä nostaa rakentamisen laatua. [31.]

Vuoden 2025 alusta alkaen uusi lainsäädäntö vaatii, että rakentamiseen liittyvissä luissa vaaditaan ilmastaselvitys. Tämä tarkoittaa, että rakennushankkeiden toteuttajien on esitettävä selvitys siitä, miten he aikovat minimoida tai kompensoida hankkeensa ilmastovaikutukset. Tavoitteena on edistää kestävämpää rakentamista ja vähentää rakennusalan hiilijalanjälkeä, joka on merkittävä globaalien kasvihuonekaasupäästöjen lähde. [31.]

Rakennuksen vähähiilisyyden on oltava ilmoitettuna lain määäämissä puitteissa ennen rakentamisen aloittamista, ja tämä tulee olemaan edellytys rakennusluvan myöntämiselle. Velvollisuus antaa selvitys kattaa myös laajasti korjausta vaativat rakennukset. Pitkän aikavälin tavoitteena on alentaa rakentamisen kustannuksia ja tehdä hiilijalanjäljen ja -kädenjäljen raportoinnista riittävän yksinkertaista ja selkeää. Samalla pyritään varmistamaan arvioinnin luotettavuus ja yhtenäisyys. [31.]

Rakennuslain asettamat vaatimukset tulevat aiheuttamaan nousupainetta rakentamisen kustannuksiin. Tämä vaikutus tulee näkymään niin yrityksissä, kotitalouksissa, kuntatalouksissa kuin valtion taloudessakin. Vaikka rakentamisen kokonaiskustannukset saattavat nousta enemmän muutosten alkuvaiheessa, on mahdollista, että pitkällä aikavälillä näemme kustannusten laskun. Tätä kehitystä ei kuitenkaan voida täysin ennustaa nykyisellä hetkellä. [31.]

5 Puurakentamisen mahdollisuudet hiilijalanjäljen pienentämisessä

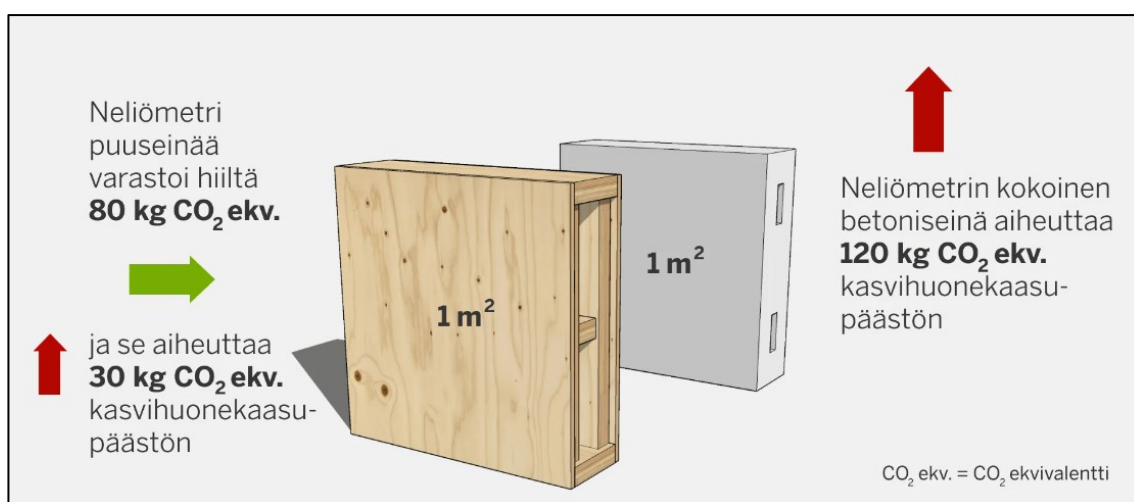
Rakennukset kuluttavat lähes 40 prosenttia kaikesta energiasta, joka kulutetaan Suomessa, ja ne ovat vastuussa yli 30 prosentin osuudesta päästöistä. Lisäksi rakennettu ympäristö aiheuttaa runsaasti saasteita, jotka päätyvät ilmaan, veteen ja maaperään, ja suuria määriä jätettä, vaikuttaen luonnonympäristöön. Tulevaisuudessa maailmanlaajuisen väestön kasvu ja kaupungistuminen lisäävät uusien asuin- ja liikerakennusten sekä infrastruktuurin tarvetta. [31.] Teräksen lisääntyvä valmistus tuottaa valtavan määrän kasvihuonekaasupäästöjä. Teräksen valmistus tuottaa 2,6 miljardia hiilidioksiditonnia CO₂-päästöjä. Tämä vastaa 7–9 prosenttia maailman kasvihuonepäästöistä. [32.] Tutkijoiden arvioiden mukaan seuraavan 40 vuoden aikana rakennustoiminnasta syntyy noin 415 miljardia hiilidioksiditonnia CO₂-päästöjä maailmanlaajuisesti. [33.]

Hallituksen päämääränä on saavuttaa hiilineutraali Suomi ennen vuotta 2035. Tämä tavoite on korkeasti asetettu, mutta mahdollinen, kunhan rakentamisen suurista hiilipäästöistä siirrytään nopeasti suuriin hiiliposiitivisiin vaikutuksiin prosessin aikana. Maailmanlaajuisesti, kiinteistöjen ja rakentamisen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt kattavat noin 40 % kokonaispäästöistä. Suomessa vastaava osuus on noin 30 %. Suomi on sitoutunut merkittäviin kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiin kansainvälisten ilmastositoumusten ja EU-sitoumusten kautta. Rakennuskanta on yksi suurimmista päästöjen aiheuttajista, ja rakentaminen on yksi tehokkaimmista aloista vähentää näitä päästöjä. [34.]

5.1 Puun ekologisuus

Puusta valmistettaessa rakennusosia, puuhun sitoutunut hiili varastoituu rakenteisiin ja toimii pitkäaikaisena hiilivarastona. Tyypillinen suomalainen puurakenteinen omakotitalo voi sitoa noin 25 tonnia ilmakehästä peräisin olevaa hiilidioksidia rakenteisiinsa. Tämä vastaa suurin piirtein yhden keskivertokuluttajan autoilun tuottamia hiilidioksidipäästöjä kymmenen vuoden ajalta. Tärkeää on huomata, että tämä hiili voi säilyä rakenteissa jopa satoja vuosia. [33.]

Puutuotteiden valmistusprosessi aiheuttaa suhteellisen vähän hiilidioksidipäästöjä verrattuna siihen, kuinka paljon hiiltä puuhun varastoituu. Puuhun sitoutunut hiilidioksidi ylittää useita kertoja sen määrän, joka vapautuu puutuotteiden valmistuksen aikana. Lisäksi, kun puutuotteet lopulta muunnetaan energiaksi, niistä ei vapaudu ilmakehään enempää hiilidioksidia kuin ne olivat sitoneet kasvaessaan. Puun käyttö voi myös vähentää hiilidioksidipäästöjä, kun puutuotteet korvaavat muita tuotteita, joiden valmistuksesta syntyy enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin puun käytöstä aiheutuu. Korvattaessa muita materiaaleja puulla, hiilidioksidipäästöjen vähennysvaikutus saattaa olla jopa suurempi kuin pelkästään puun hiilen varastoiminen. [33.]



Kuva 17. Puuseinä varastoi hiiltä. [34.]

Puulla on ainutlaatuinen ominaisuus sitoa hiilidioksidia ilmakehästä fotosynteesin aikana. Koska metsät kykenevät varastoimaan hiiltä, niitä kutsutaan hiilinieluiksi. Erityisesti nuoret ja kasvavat metsät sitovat merkittäviä määriä hiilidioksidia. Vuonna 2017 Suomen metsät kykenivät sitomaan lähes puolet maan kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä, mikä korostaa niiden tärkeää roolia hiilidioksidin säilömisessä. Puiden kasvamiseen tarvitaan noin 1,55 kilogrammaa hiilidioksidia jokaista kilogrammaa kasvavaa puuta kohden. Tämä hiili varastoituu puuhun. Yksi kuutiometri puuta kykenee säilömään noin 600 kilogrammaa hiilidioksidia. Kun

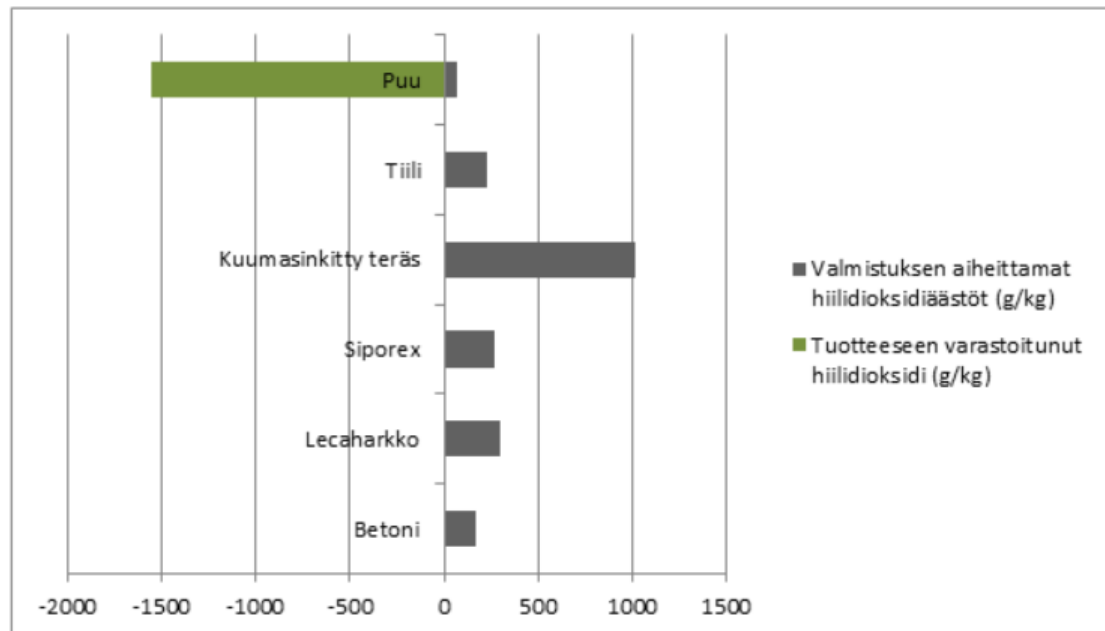
puu kaadetaan ja siitä valmistetaan tuotteita, sen hiilidioksidin varastointikyky ei menetä tehoaan – hiilidioksidi pysyy edelleen varastoituina tuotteissa. [35.]

Mahdollisuus korvata muita materiaaleja puulla on jo sinällään ympäristöystävällistä. Esimerkiksi yksi neliömetri puista seinää pystyy varastoimaan 80 kilogrammaa hiilidioksidia, kun taas samankokoinen betoniseinä päästää ilmakehään 120 kilogrammaa hiilidioksidia jo pelkästään valmistusvaiheessa (katso kuva 13). [35.]

5.2 Puutuotteet hiilivarastona

Puutuotteet ovat houkuttelevia monista syistä, mukaan lukien yhteiskunnalliset, taloudelliset ja ympäristösyistä. Puutuotteilla on monia ympäristöhyötyjä verrattuna ei-puuperäisiin vaihtoehtoihin, kuten betoniin, teräkseen ja muoviin, jotka tarvitsevat enemmän fossiilisia polttoaineita tuotantoon. Puupohjaiset tuotteet auttavat hillitsemään ilmastonmuutosta kahdella eri mekanismilla: hiilen korvaamisella ja varastoinnilla. Puut sitovat hiilidioksidia ympäristöstä fotosynteesin avulla ja säilyttävät sen puupohjaisissa tuotteissa niiden koko elinkaaren ajan. [36.]

Puutuotteet valmistetaan järeästä tukkipuusta. Puun vuosikymmenten aikana sitoma hiili varastoituu pitkäikäisiin puutuotteisiin koko niiden käyttöiän ajaksi. Varastoitunutta hiiltä vastaava määrä hiilidioksidia on poissa ilmakehästä. Puutuotteiden valmistuksessa tarvitaan vain vähän fossiilista energiaa, jolloin puusta valmistetun rakennustuotteen hiilijalanjälki on alhainen. Koska monien muiden rakennustuotteiden hiilijalanjälki on suurempi, lisääntyvä puunkäyttö alentaa rakentamisessa käytettävien tuotteiden kokonaispäästöjä. [37.]



Kuva 18. Eri rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöt. [37.]

Hiilivarastojen kannalta on myös tärkeää, että puutuotteiden käyttöikä on mahdollisimman pitkä. Puutuotteet ja erilaiset puusta valmistetut rakennusosat, kuten palkit, voivat olla uudelleenkäytössä ja niitä voidaan korjata. Kierrätyspuuta voidaan hyödyntää myös uusien tuotteiden valmistuksessa. Puisten rakennusmateriaalien on arvioitu olevan ylivoimaisesti suurin käytössä olevien puutuotteiden hiilivarasto Suomessa ja niihin liittyvät myös suurimmat hiilensidontapotentiaalit. [37.]

5.3 Puun ympäristövaikutukset

Luonnonvarat voidaan jakaa kahteen pääryhmään: uusiutumattomiin ja uusiutuviin. Uusiutumattomat luonnonvarat ovat aina rajoitetussa määrin olemassa, ja niiden määrä vähenee käytön myötä. Tällaisia luonnonvaroja ovat esimerkiksi fossiiliset polttoaineet. Tehokkaalla kierrätyksellä voidaan kuitenkin hidastaa uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymistä. [38.]

Uusiutuvat luonnonvarat eivät lopu, kun niiden kestävästä käytöstä pidetään huolta. Tämä tarkoittaa, että luonnon monimuotoisuus säilyy, ja ihmisen toiminta ei vaurioita hyödynnettäviä luonnonvaroja eikä vaikuta kielteisesti ympäristöön tai

yhteiskuntaan. Jotkut uusiutuvat luonnonvarat voivat jopa lisääntyä käytön myötä, ja tällöin puhutaan karttuvista luonnonvaroista. Suomalainen puu on hyvä esimerkki sekä uusiutuvasta että karttuvasta luonnonvarasta. Vaikka puuta käytetään aktiivisesti, Suomen metsissä oleva puumäärä on lisääntynyt merkittävästi 70 vuoden aikana metsänhoitotoimenpiteiden ansiosta. [38.]

Esimerkiksi sahatavaran tai viilujen kuivauksessa käytetään bioenergiaa, joka tuotetaan laitoksen yhteydessä olevan laitoksen kuoren ja purun polttamisella. Tätä bioenergiaa myös myydään laitoksen ulkopuolelle, kuten kaukolämpönä läheisiin taajamiin. [38.]

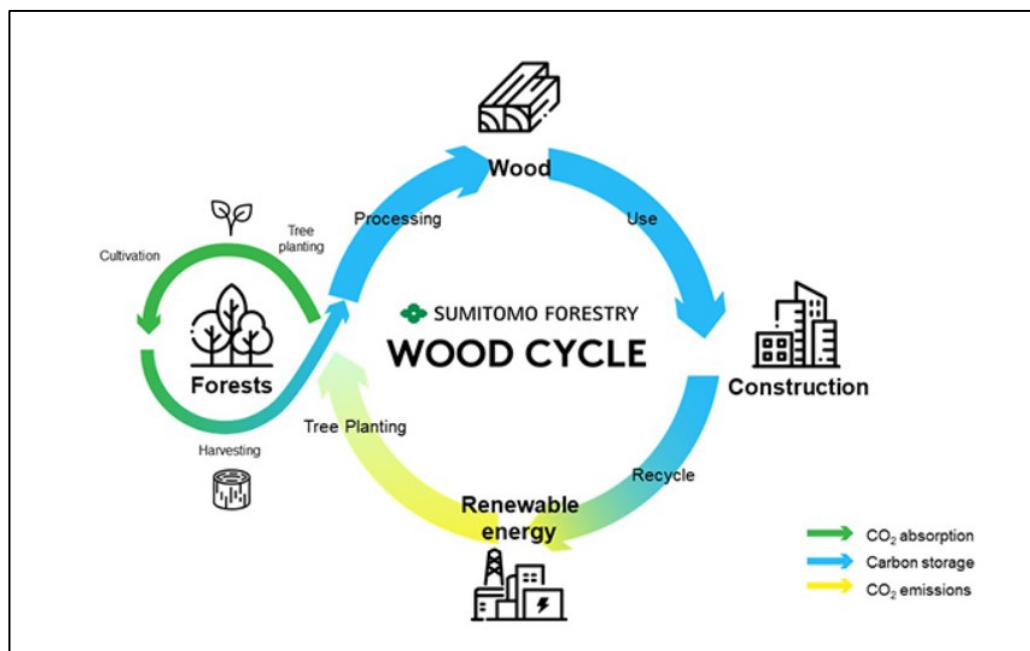
Tässä on joitakin keskeisiä ympäristövaikutuksia, jotka liittyvät puun käyttöön rakennusmateriaalina:

Hiilinielu: Puu on erityisen tehokas hiilidioksidin sitomisessa ilmasta. Puut kasvavat sitomalla hiilidioksidia fotosynteesin avulla, ja tämä hiili varastoituu puuhun. Näin puut toimivat luontaisina hiilinieluina. Puumateriaaleissa tämä hiili säilyy pitkään, mikä tarkoittaa, että puurakennusten käyttöikä voi vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta.

Korkea kierrätysaste: Puu on helposti kierrätettävissä ja uusiokäytettävissä. Rakennusten purkamisen yhteydessä puutuotteet voidaan palauttaa kierrätykseen ja valmistaa uusiksi tuotteiksi. Tämä vähentää jätteiden määrää ja säästää luonnonvaroja. Esimerkiksi kierrätyspuuta voidaan käyttää rakennusmateriaalina esimerkiksi lastulevyn ja CLT:n muodossa, mikä edistää rakennustyömaan kierrätysasteen nostamista.

Kestävä metsänhoito: Suomessa ja monissa muissa maissa harjoitetaan kestävä metsänhoitoa, mikä tarkoittaa, että puuta korjataan metsistä vain kestävässä rajoissa. Tällainen metsänhoito edistää metsien terveyttä ja monimuotoisuutta samalla kun se mahdollistaa puuntuotannon.

Luonnon monimuotoisuus: Metsäekosysteemit tarjoavat elinympäristön monille eliölajeille. Kestävän metsänhoidon periaatteiden noudattaminen auttaa ylläpitämään luonnon monimuotoisuutta ja ekosysteemien tasapainoa. [38.]



Kuva 19. Puun kiertokulku metsistä rakennuksiin. [39.]

5.4 Rakennesuunnittelun keinot päästöjen vähentämiseksi

Rakennesuunnittelun ensisijainen tehtävä on varmistaa rakennuksen terveys, pitkäikäisyys, toiminnallisuus ja turvallisuus. Yksittäisellä rakennesuunnittelijalla on merkittävä vaikutus rakennuksen koko elinkaaren aikaisiin hiilidioksidipäästöihin puurakentamisen näkökulmasta. Uudisrakentamisessa suurimmat hiilidioksidipäästöjen vähennykset voidaan saavuttaa valitsemalla oikeat materiaalit, ja korjausrakentamisessa keskittymällä rakennuksen rakenteelliseen energiatehokkuuteen. [40.]

Tehokkain tapa vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen on asettaa selkeät hiilijalanjälkitavoitteet jo ennen kuin rakennusta aletaan suunnittelemaan, mikä on erityisen tärkeää puurakentamisen kontekstissa. Hankesuunnitteluvaiheessa

tehdään ratkaisevia päätöksiä, jotka vaikuttavat huomattavasti rakennuksen hiilijalanjälkeen. Näihin kuuluvat päätökset runkomateriaaleista, rakennuksen sijainnista, rakennuksen laajuudesta ja valitusta lämmitysmuodosta. Tässä vaiheessa tehdyillä päätöksillä on pitkäaikaiset vaikutukset rakennuksen ympäristövaikutuksiin ja energiatehokkuuteen. [40.]

Rakennesuunnittelussa on tarpeen syventyä tarkemmin vähähiilisiin rakennusmateriaalivaihtoehtoihin. Erityisesti niiden materiaalien osalta, joita käytetään runsain määrin rakennuksissa, tulisi tehdä perusteellista analyysia niiden hiilidioksidipäästöistä. Analyysissä yritetään löytää mahdollisimman ympäristöystävälliset materiaalit. Rakennesuunnittelussa on viisasta kannustaa kiertotalouden periaatteiden ja uudelleenkäytettävien materiaalien laaja-alaista hyödyntämistä. Sen sijaan, että tarkasteltaisiin purettavia materiaaleja pelkkänä jätteenä, tulisi niitä nähdä uusina potentiaalisina raaka-aineina. Jokaisessa hankkeessa olisi suositeltavaa suorittaa ennen purkutoimenpiteitä huolellinen purkukartoitus, jossa arvioidaan mahdolliset haitta-aineet ja tunnistetaan kierrätyskelpoiset materiaalit. Tehokas suunnittelu kierrätysmateriaalien uudelleenkäytölle vähentää merkittävästi sekä materiaaleista aiheutuvia päästöjä että rakentamisen kokonaiskustannuksia. [41.]

Rakennesuunnittelun keskeisenä tavoitteena on luoda rakennuksia, jotka pysyvät toimintakelpoisina vähintään koko suunnitellun elinkaarensa ajan. Rakennusten tulee olla suunniteltuja ja rakennettuja siten, että ne voivat mukautua ilmastomuutoksen aiheuttamiin ääriolosuhteisiin, mukaan lukien lämpötila- ja kosteuskuormituksiin liittyvät haasteet. Kun rakennukset ja niiden käyttämät materiaalit vastaavat paremmin tulevaisuuden tarpeita, on suurempi mahdollisuus välttää tarvetta uudisrakentamiselle tai mittaville korjauksille. [41.]

5.5 Metsätalous

Metsätalous on pääasiassa puuston viljelyä, keruuta ja kauppaa. Lisäksi se kattaa puunjalostusteollisuuden toiminnan. Metsätalous keskittyy erityisesti talousmetsien hoitoon ja hyödyntämiseen. Talousmetsiä kutsutaan myös

monikäyttömetsiksi, sillä ne tarjoavat monenlaisia ekosysteemipalveluita, kuten puutavaratuotteita, marjoja, riistaa ja mahdollisuuksia virkistäytymiseen. [44.]

Metsätaloutta harjoitetaan istutusmetsissä ja luonnonmetsissä. Metsänhoito on keskeinen tekijä elinympäristöjen luomisessa ja muokkaamisessa sekä ekosysteemipalvelujen tarjoamisessa. [44.]

5.6 Puurakentamisen vaikutus metsiin ja hiilivarastoon

Puun hyödyntäminen rakennusmateriaalina alkaa sen alkuperästä, jo metsän kasvuvaiheesta. Siksi on ensiarvoisen tärkeää tarkastella puurakentamisen kasvavan suosion vaikutuksia metsäekosysteemeihin ja hiilen kiertoon metsissä, jotta voidaan täysin ymmärtää sen ilmastovaikutukset. [45.]

Valtaosa tutkimuksista ottaa huomioon puurakentamisen vaikutukset metsiin, sillä oletuksella, että käytetty puumateriaali on peräisin kestävästi hoidetusta metsästä. Kestävästi hoidettu metsä tarkoittaa sitä, että puuta hakataan vain sen verran kuin uutta puuta kasvaa, ja että hakatut alueet uudistetaan asianmukaisesti. Kestävä metsänhoito edistää luonnollisten hiilenvirtojen jatkuvuutta ilmakehässä ja samalla ylläpitää tai jopa lisää hiilivarastoja. Metsänhoidolla on merkittävä rooli puun hiilivaraston säilyttämisessä. Ilman kestävää hoitoa vanhat metsät vähitellen heikentyvät, mikä johtaa hiilivarastojen menetykseen. Lisäksi hoitamattomat metsät ovat alttiimpia erilaisille häiriöille, kuten metsäpaloille. [46.]

Puurakentamisen yleistyminen vaikuttaa myös metsien hakkuista aiheutuviin päästöihin. Lisääntyvät hakkuut tuovat mukanaan lisääntyviä päästöjä, erityisesti puutavaran kuljetuksesta johtuvia. Kuitenkin kasvavan puutavaran kysynnän aiheuttamat lisäpäästöt kompensoituvat vähentyneillä päästöillä muiden rakennusmateriaalien louhinnasta, joten todellisia lisäpäästöjä ei synny. [47.]

6 Johtopäätökset

Puurakentaminen tarjoaa lukuisia mahdollisuuksia vähentää rakentamisen hiilijalanjälkeä ja edistää kestäväää rakentamista. Käsiteltyjen näkökohtien pohjalta voidaan tehdä johtopäätöksiä, jotka korostavat puurakentamisen merkitystä ympäristöystävällisen rakentamisen edistämisessä.

Ensinnäkin puun monipuoliset ominaisuudet, kuten keveys ja helppokäyttöisyys, mahdollistavat sen tehokkaan käytön rakentamisessa. Puuta voidaan hyödyntää monissa rakennusosissa. Puu sallii monipuolisen rakentamisen eri rakennustyypeille.

Toiseksi puun kasvu sitoo hiilidioksidia ja näin puurakenteet toimivat hiilivarastoina. Tämä ominaisuus pienentää kokonaispäästöjä, ja puurakenteiden käytöllä voidaan edistää ilmastonmuutoksen torjuntaa. Puurakenteiden energiatehokkuus tarjoaa lisää etuja vähentämällä lämmitys- ja jäähdytyskustannuksia, mikä parantaa energiatehokkuutta ja voi tuoda säästöjä niin rakentajille kuin asukkaille.

Kolmanneksi puun paikallinen hankkiminen ja kestävä metsänhoito edistävät paikallisen talouden tukemista ja luonnon monimuotoisuuden säilyttämistä. Puurakentaminen voi tarjota mahdollisuuden lähentää materiaalien hankintaa ja vähentää kuljetusetaisyysia, mikä tukee kestäväää rakentamista.

Lisäksi puurakentamisen myötä voidaan edistää kestäväää metsänhoitoa ja luonnon monimuotoisuuden säilyttämistä, mikä tekee siitä kokonaisvaltaisen kestävään vaihtoehtoon rakentamiselle. Kestävä metsänhoito pyrkii varmistamaan, että metsätalous toteutetaan niin, että metsien biologinen monimuotoisuus säilyy, ekosysteemipalvelut turvataan ja metsäluonnonvaroja käytetään kestävästi. Puurakentamisen kysynnän kasvaessa voidaan kannustaa metsänomistajia harjoittamaan kestäväää metsänhoitoa, mikä voi edistää metsien terveyttä ja monimuotoisuutta.

Puun käyttö rakentamisessa voi myös auttaa suojelemaan metsiä esimerkiksi vähentämällä tarvetta avohakkuille ja lisäämällä talousmetsien monimuotoisuutta. Lisäksi puurakentaminen voi edistää metsien suojelua ja ennallistamista, sillä kestävät metsänhoitokäytännöt ja sertifioidut puutuotteet voivat kannustaa metsänomistajia sitoutumaan luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että puurakentaminen tarjoaa monia etuja vähentämällä rakentamisen hiilijalanjälkeä ja edistämällä ympäristöystävällistä rakentamista. Se voi auttaa saavuttamaan hiilijalanjälkitavoitteet jo hankesuunnitteluvaiheessa ja tarjota kestäviä ratkaisuja tulevaisuuden rakentamisen tarpeisiin. Puun monipuoliset ominaisuudet ja ympäristöystävällisyys tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon rakennesuunnittelijoille, jotka pyrkivät vähentämään rakentamisen ympäristövaikutuksia ja luomaan kestäviä rakennuksia.

7 Yhteenveto

Tässä insinöörityössä tarkasteltiin puurakentamista ja erityisesti sen ympäristövaikutuksia hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen näkökulmasta. Työn keskeisenä tavoitteena oli kertoa puurakentamisesta Suomessa ja maailmalla, puun ominaisuuksista ja rakennuksen hiilijalanjäljestä. Lisäksi tarkoituksena oli tarjota konkreettisia keinoja ja ratkaisuja puurakentamisen hiilijalanjäljen pienentämiseen.

Työn alussa tarkasteltiin puurakentamisen historiaa ja nykytilannetta sekä vertailimme sitä muihin rakennusmateriaaleihin. Kävimme läpi puun materiaaliominaisuuksia, kuten lujusteknisiä, lämpöteknisiä, paloteknisiä ja kosteusteknisiä ominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien ymmärtäminen on keskeistä puun oikeanlaisessa käytössä rakentamisessa.

Hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen käsitteiden kautta pyrimme hahmottamaan, miten puurakentaminen vaikuttaa ympäristöön. Esiteltiin myös erilaisia laskentatyökaluja ja ohjeita hiilijalanjäljen arvioimiseen ja pienentämiseen puurakentamisessa. Tarkasteltiin myös vähähiilisen rakentamisen ohjelmia ja tiekarttoja. Ympäristönäkökulmasta keskeistä oli puun ekologisuus ja sen rooli hiilivarastona.

Lopuksi tarkasteltiin rakennesuunnittelun keinoja, joilla voidaan vähentää puurakentamisen ympäristövaikutuksia. Rakennesuunnittelijan rooli on keskeinen, kun pyritään valitsemaan ympäristöystävällisiä materiaaleja. Kokonaisuutena tämä insinöörityö tarjoaa yleisen katsauksen puurakentamisen ympäristövaikutuksiin ja keinoihin niiden hallintaan. Lisäksi puurakentamisen myötä voidaan edistää kestävää metsänhoitoa ja luonnon monimuotoisuuden säilyttämistä, mikä tekee siitä kokonaisvaltaisen kestävä vaihtoehdon rakentamiselle.

Lisätutkimustarpeena näkisin keräämällä käytännön esimerkkejä puurakentamisesta erilaisissa rakennusprojekteissa Suomessa. Miten puuta on hyödynnetty erilaisissa rakennuksissa, ja millaisia ovat olleet kokemukset rakennuttajilta, suunnittelijoilta ja käyttäjiltä?

Lähteet

- 1 Ympäristöministeriö. 2020. Verkkoaineisto. Julkisen puurakentamisen kansalliset tavoitteet. Puurakentamisen toimenpideohjelma 2016–2022. <<https://ym.fi/julkinen-puurakentaminen>>. Luettu 8.6.2023.
- 2 Wood and Engineered Wood Products: Stress and Deformation. Verkkoartikkeli. <<https://www.intechopen.com/chapters/79485>>. Luettu 8.6.2023.
- 3 Puukerrostalot. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/2020/07/02/puukerrostalot-uudistavat-montrealin-vanhan-keskustan/>>. Luettu 9.6.2023.
- 4 Tuupalan yhtenäiskoulu, puukoulu. Verkkoaineisto. Kuhmon kaupunki. <<https://www.kuhmo.fi/varhaiskasvatus-ja-koulutus/perusopetus/koulut/kontion-koulu/>>. Luettu 13.6.2023.
- 5 The obstacles and opportunities of mass timber construction in the US. Verkkoaineisto. <<https://www.arup.com/perspectives/the-obstacles-and-opportunities-of-mass-timber-construction-in-the-us>>. Luettu 15.6.2023.
- 6 Puurakentamisen hyvät käytännöt Kanadassa. 2019. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Puurakentamisen-hyvät-käytännöt-Kanadassa.pdf>>. Luettu 21.6.2023.
- 7 Arbora-kortteli Montrealissa. Verkkoaineisto. <<https://www.woodatwork.ca/year-2017/>>. Luettu 22.6.2023.
- 8 Ranska tähtää maailman johtavaksi puurakentamisen maaksi. Verkkoaineisto. <<https://markkulaukkanen.fi/artikkelit/ranska-tahtaa-maailman-johtavaksi-puurakentamisen-maaksi/>>. Luettu 28.6.2023.
- 9 Timber frames: will we see wooden skyscrapers in the future? 23.1.2019. Verkkoaineisto. <<https://www.building.co.uk/buildings/timber-frames-will-we-see-wooden-skyscrapers-in-the-future/5097471.article>>. Luettu 28.6.2023.
- 10 Ranska kääntää katseen puurakentamiseen – markkinat kehittyvät vauhdilla. 2021. Verkkoaineisto. <https://um.fi/edustustojen-raportit/-/asset_publisher/W41AhLdTjdag/content/ranska-k-c3-a4-c3-a4nt-c3-a4-c3-a4-katseen-puurakentamiseen-markkinat-kehittyv-c3-a4t-vauhdilla/384951>. Luettu 3.7.2023.

- 11 Miten Virosta tuli puurakentamisen suurvalta? 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/2020/07/08/miten-virosta-tuli-puurakentamisen-suurvalta/>>. Luettu 5.7.2023.
- 12 Timber Construction in Sweden. 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/>>. Luettu 6.8.2023.
- 13 Korkeat puurakennukset: mahdollisuudet, edut, haasteet ja näkymät. 2022. Verkkoaineisto. <<https://puuinfo.fi/2022/10/21/korkeat-puurakennukset-mahdollisuudet-edut-haasteet-ja-nakymat/>>. Luettu 4.7.2023.
- 14 Tolppanen, Janne. 2013. Suomalainen puukerrostalo. Tampere: Opetushallitus.
- 15 Puulla paremmaksi. 2019. Verkkoaineisto. UPM Timber. Verkkoaineisto. <<https://www.upmtimber.com/fi/ajankohtaista/2019/09/Puurakentamisen-suosio-jatkaa-kasvuaan/>>. Luettu 6.7.2023.
- 16 Valtioneuvosto. 2021. Puurakentamisen ohjelman väliarviointi. <<https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/puurakentamisen-ohjelman-valiarviointi-puurakentamisella-jo-vahva-tuki-mutta-kunnianhimon-tasoa-varaannostaa>>. Luettu 7.7.2023.
- 17 Ympäristöministeriö. 2020. Verkkoaineisto. Suomen rakentamismääräyskokoelma. <<https://ym.fi/rakentamismaaraykset>>. Luettu 14.7.2023.
- 18 Paavola, Heli. 2019. Puurakentamisen ohjelman kehittävä arviointi. <https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/c6a6a9dc-0592-494e-82cd-00ec8d20065e/07314c15-a869-4c2f-b7bd-32fc0535e4dc/JUL-KAISU_20200925062453.pdf>. Luettu 18.7.2023.
- 19 Puun ominaisuudet. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>>. Luettu 3.6.2023.
- 20 Havupuun ominaislujuudet. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/ril_205_1_tau-lukko_33s_paivitys_7_4_2010.pdf>. Luettu 4.6.2023.
- 21 Siikanen, Unto. 1996. Rakennusaineoppi. Jyväskylä: Rakennustieto Oy.

- 22 Paloteknisiä ominaisuuksia. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy.
<<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/paloteknisia-ominaisuuksia/>>. Luettu 5.6.2023.
- 23 Kosteus puussa. 2021. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/figure/Moisture-in-wood-can-be-found-in-both-the-porous-capillary-structure-A-and-the-solid_fig4_350194680>. Luettu 6.6.2023.
- 24 Leino, Mikko. Hiilijalanjäljestä hiilikädenjälkeen puurakentamisen keinoin. Verkkoaineisto. <<https://www.puurakentajat.fi/puurakentajan-blogi/hiilijalanjaljest-hiilikadenjalkeen-puurakentamisen-keinoin>>. Luettu 1.8.2023.
- 25 Oinas, Eveliina. Mäyrä, Janica. 2020. Puurakentamisen hiilijalanjätkivertailut. Verkkoaineisto. <<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/puurakentamisen-hiilijalanjalkivertailut.pdf>>. Luettu 2.8.2023.
- 26 Kujala, Mari. 2018. Mitä rakennuksen hiilijalanjäljen laskenta tarkoittaa? Verkkoaineisto. <<https://tulevaisuudenrakentamisen.samk.fi/2018/02/16/mita-rakennuksen-hiilijalanjaljen-laskenta-tarkoitaa/>>. Luettu 7.8.2023.
- 27 Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Verkkoaineisto. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>>. Luettu 8.8.2023.
- 28 Carbon handprint guide. 2021. Verkkoaineisto. VTT.
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2021/Carbon_handprint_guide_2021.pdf>. Luettu 9.8.2023.
- 29 Hiilijalanjälki, hiilikädenjälki? 2020. Verkkoaineisto.
<<https://hoivatilat.fi/hiilijalanjalki-hiilikadenjalki/>>. Luettu 10.8.2023.
- 30 Ympäristöministeriö. 2020. Puurakentamisen ohjelma. Verkkoaineisto.
<<https://ym.fi/puurakentaminen>>. Luettu 11.8.2023.
- 31 Ympäristöministeriö. Rakentamislaki ohjaa kestävää rakentamista.
<<https://ym.fi/rakentamislaki>>. Luettu 11.8.2023.
- 32 Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Verkkoaineisto. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>>. Luettu 8.8.2023.

- 33 Rakennusteollisuus RT ry. Rakennettu ympäristö ratkaisee energiatehokkuuden. Verkkojulkaisu. <<https://www.rt.fi/globalassets/julkaisuja/rakennettu-ymparisto-ratkaisee-energiatehokkuuden.pdf>>. Luettu 9.8.2023.
- 34 Kim, Jinsoo; Sovacool, Benjamin K; Bazilian, Morgan; Griffiths, Steve; Lee, Junghwan; Yang, Minyoung; Lee, Jordy. 2022. Decarbonizing the Iron and Steel Industry: A Systematic Review of Sociotechnical Systems, Technological Innovations, and Policy Options. Verkkoartikkeli. <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>>. Luettu 11.11.2023.
- 35 Tupenaite, Laura; Kanapeckiene, Loreta; Naimaviciene, Jurga; Kaklauskas, Arturas; Gecys, Tomas. 2023. Timber Construction as a Solution to Climate Change: A Systematic Literature Review. Verkkoartikkeli. <<https://doi.org/10.3390/buildings13040976>>. Luettu 13.8.2023.
- 36 Puurakentamisella kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.labopen.fi/lab-pro/puurakentamisella-kohti-hiilineutraalia-yhteiskuntaa/>>. Luettu 14.8.2023.
- 37 Puun käytön ympäristövaikutukset. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/>>. Luettu 15.8.2023.
- 38 Jokainen puurakennus on hiilivarasto. 2020. Verkkoaineisto. Metsä Group. <<https://www.metsagroup.com/fi/uutiset-ja-julkaisut/muut/kampanjat/urban-carbon/jokainen-puurakennus-on-hiilivarasto/>>. Luettu 16.8.2023.
- 39 Maa- ja metsätalousministeriö. 2023. Metsien rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä. Verkkoaineisto. <<https://mmm.fi/documents/1410837/22836561/Metsien+rooli+ilmastonmuutoksen+hillinnassa.pdf/b8b48104-a90c-ed4d-647d-8982f8f507d5/Metsien+rooli+ilmastonmuutoksen+hillinnassa.pdf>>. Luettu 17.8.2023.
- 40 Oulun yliopisto. 2022. Productizing Carbon Footprint and Handprint for Wood Construction. <<https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202207283281>>. Luettu 18.8.2023.
- 41 Soimakallio, Sampo; Häkkinen, Tarja; Seppälä, Jyri. 2021. Puutuotteet hiilivarastona ja uusiutumattomien materiaalien korvaajina. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. <<https://helda.helsinki.fi/bitstreams/69143d5f-45a2-40ec-b5d7-b895704331de/download>>. Luettu 19.8.2023.
- 42 Mass timber office. 2022. Verkkoartikkeli. <https://sfc.jp/english/news/pdf/20221226_01.pdf>. Luettu 20.8.2023.

- 43 Rakennesuunnittelijan pikaopas vähähiiliseen rakentamiseen. 2022. Verkkoaineisto. A-Insinöörit Oy. <<https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaopaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>>. Luettu 21.8.2023.
- 44 Askeleet vähähiiliseen rakentamiseen. 2023. Verkkoaineisto. Green Building Council Finland. <<https://figbc.fi/julkaisut/askeleet-vahahiiliseen-rakentamiseen>>. Luettu 22.8.2023.
- 45 Metsähallitus. Kestävä metsätalous. <<https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/metsatalous/>>. Luettu 17.2.2024.
- 46 Sathre, Roger. O'Connor, Jennifer. 2010. Meta-analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution. <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>>. Luettu 17.2.2024.
- 47 Lippke, Bruce; O'Neil, Elaine; Harrison, Rob; Skog, Kenneth; Gustavsson, Leif; Sathre, Roger. 2011. Life Cycle Impacts of Forest Management and Wood Utilization on Carbon Mitigation: Knowns and Unknowns. <<https://doi.org/10.4155/cmt.11.24>>. Luettu 17.2.2024.
- 48 Churkina, Galina; Organschi, Alan; Reyer, Christopher; Ruff, Andrew; Vinke, Kira; Liu, Zhu; Reck, Barbara; Graedel, T. E; Schellnhuber, Hans Joachim. 2020. Buildings as a Global Carbon Sink. <<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>>. Luettu 18.2.2024.