Mubarak Mohamed

# CLT-runkorakenteiden toteutus ilman katesuojausta monikerrosrakennuksissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

23.11.2021

# Tiivistelmä


| | |
|---|---|
| Tekijä: | Mubarak Mohamed |
| Otsikko: | CLT-runkorakenteiden toteutus ilman katesuojausta monikerrosrakennuksissa |
| Sivumäärä: | 40 sivua + 1 liite |
| Aika: | 23.11.2021 |
| | |
| Tutkinto: | Insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma: | Rakennustekniikka |
| Ammatillinen pääaine: | Rakennetekniikka |
| Ohjaajat: | Lehtori, Tapani Järvenpää |


---


Aiheen taustalla oli tarve tutkia CLT:n kosteuskäyttäytymistä sekä mahdollisuutta rakentaa CLT-runkoisia rakennuksia ilman sääsuojaa. Aiheesta on tosi vähän kirjallisuutta ja artikkeleja tai niitä ei ole lainkaan laadittu.

Työn tavoitteena oli selvittää CLT- runkorakenteiden käyttäytyminen työmaaolosuhteissa, tutkimuksen tuloksia CLT-runkorakenteiden kastumisesta ja mitä suojauksia tai toimenpiteitä käytetään suojaamattomalle CLT-rakentamiselle.

Opinnäytetyön toteutustapa on kirjallisuusselvitys. Esitutkimuksessa tarkoituksenmukaisesti perehdyttiin aikaisempiin CLT-rakentamisesta tehtyihin tutkimuksiin ja niihin liittyviin artikkeleihin. Pyrittiin keräämään riittävä määrä tapauskertomuksia ja taustatietoja lopputyön kirjoitelman esitettävään osuuteen. Tutkimuslähteinä käytettiin pääasiassa ulkomailla toteutettuja CLT-runkoisia rakennuksia.

Tutkimuksen tulokset CLT:n kostumisesta menestyivät vaihtelevasti tässä työssä. Siitä huolimatta tutkimustapauksien perusteella ilman katesuojaa tai telttasuojaa CLT-rungon pystyttäminen ilman pysyviä kosteusvaurioita on erittäin riskialtista, mutta silti periaatteessa mahdollista. Tuloksien mukaan näyttää vaikealta pysäyttää mikrobien kasvua CLT-rungon pystyttämisen aikana ilman sääsuojaa. Rakentaminen ilman sääsuojaa on edullisempaa ja se on myös ensisijainen syy olla rakentamatta ilman sääsuojaa. Puurakentamien on yleistymässä ja se edellyttää lisätutkimuksia yleisesti ja myöskin lisätutkimuksia puurakentamisesta ilman sääsuojaa.



Avainsanat: CLT, kosteus, sääsuoja,

# Abstract


| | |
|---|---|
| Author: | Mubarak Mohamed |
| Title: | Construction of CLT Frame Without Roof Cover in Multi-storey Buildings |
| Number of Pages: | 40 pages + 1 appendices |
| Date: | 23 November 2021 |
| | |
| Degree: | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme: | Civil Engineering |
| Professional Major: | Structural Engineering |
| Instructors: | Tapani Järvenpää, Senior Lecturer |


---


The reason for conducting this thesis was the need to research the moisture behavior of CLT as well as the possibility of building CLT-framed buildings without weather protection. There is very little or no literature or articles on the subject.

The aim of the thesis was to study the behavior of CLT-frame structures under site conditions, to examine the results of previous research on the wetting of CLT-frame structures and to find what protections or measures are used for unprotected CLT construction.

The method thesis of thesis implementation is a literature review. The pilot study reviewed previous studies on CLT construction and related articles. The thesis aimed at collecting a sufficient number of case reports and background information for the research question of the thesis. The research sources used were mainly CLT-framed buildings built abroad.

The results of the study on CLT wetting were varyingly successful in this work. Nevertheless, based on research cases, building a CLT-framed building without a roof cover or a tent cover in such a way that permanent moisture damage is not caused is very risky, but still possible in principle. According to the results, it seems difficult to stop the growth of microbes during the construction process of the CLT-framed building without weather protection. Construction without weather protection is cheaper and this is also the primary reason for building without weather protection. Wooden construction is becoming more common and requires further research in general and regarding construction without weather protection.



Keywords: CLT, moisture, weather protection

# Sisällys

Lyhenteitä ja sanastoa

1 Johdanto 6

2 Puu rakennusmateriaalina 7

2.1 Käyttökohteet 8
2.2 Puun ominaisuudet 8
2.2.1 Lujuusominaisuudet 8
2.2.2 Lämpöteknisiä ominaisuuksia 10
2.2.3 Kosteustekniset ominaisuudet 11
2.3 Ekologisuus ja kestävä kehitys 16

3 CLT 18

3.1 CLT:n valmistus 19
3.2 Käyttökohteet 21
3.3 CLT:n ominaisuudet 22
3.4 CLT-rakenteen kestävyys kosteusolosuhteiden alaisena 23

4 Työaikainen kosteudenhallinta 24

4.1 Ilmasto-olosuhteet 24
4.2 Puurakenteiden kosteudenhallinta 26

5 Tutkimuksen tuloksia CLT-rakentamisesta ilman sääsuojaa 28

5.1 Tapaustutkimus 1 28
5.2 Tapaustutkimus 2 31
5.3 Tapaustutkimus 3 35

6 Tulokset 38

7 Yhteenveto 40

Lähteet 41

Liitteet

Liite 1: Ilmasto-olosuhde vertailu Suomen ja Itävallan välillä

## Lyhenteitä ja sanastoa

| | |
|---|---|
| anisotrooppinen | Materiaali tai rakenne, jolla on eri ominaisuudet eri suunnissa. |
| CLT | Cross laminated timber eli ristiinliimattu massiivipuulevy. |
| hygroskooppinen | Kyky luovuttaa ja sitoa kosteutta riippuen ilman suhteellisesta kosteudesta. |
| kyllästymispiste | Tila, jossa puun soluseinämät sisältävät enimmäismäärän vettä. |
| puun kosteuspitoisuus | Täysin kuivan puun massan ja puussa olevan veden välinen suhde. |
| RH | Relative humidity eli suhteellinen kosteus. |

# 1 Johdanto

Puurakentamisen trendi on ollut viime aikoina kasvusuunnassa. Tämä johtuu lähinnä siitä, että ilmastonmuutoksesta on tulossa uhkaava ongelma ja puurakentamisella voidaan vaikuttaa tähän ongelmaan. Puusta on kehitetty erilaisia insinööripuutuotteita, jotta ne voi kilpailla muitten rakennusmateriaalien kanssa. Tässä opinnäytetyössä käsitellään CLT nimistä insinööripuutuotetta, jonka suosio on ollut kasvussa lähivuosina.

Opinnäytetyö toteutettiin pääosin kirjallisuusselvityksenä ja työn aihe tuli ehdotuksena Metropolian Ammattikorkeakoululta. Aiheessa tutkitaan lähinnä ulkomailla toteutettujen CLT-runkoisten (Cross Laminated Timber eli ristiin liimattu massiivipuu) monikerrosrakennusten pystytyksestä, kun koko rakennusta suojaavaa katetta ei käytetä.

Työn tarkoituksena on tutkia ja selvittää yleisesti miten CLT-runkorakenteet reagoi ilman katesuojaa, siihen liittyvät tutkimusten tulokset CLT-rakenteiden kastumisesta ja mitä suojauksia tai toimenpiteitä käytetään suojaamattomalle CLT-rakentamiselle. Aihe koskee monikerroksisia CLT-runkoisia rakennuksia. Opinnäytetyön taustalla on ollut varmaankin tarve tutkia enemmän CLT-rakentamisesta ilman sääsuojaa, koska tähän aiheeseen liittyen ei ole lainkaan tutkimuksia tai kirjallisuutta.

# 2 Puu rakennusmateriaalina

Käytetyin rakennusmateriaali Suomessa on yleisesti ollut puu ja sen asema säilyi aina 1950-luvun loppupuolelle. Puurakennusten osuus uudisrakennuksesta oli 43% vuonna 1957. Sen jälkeen uudenaikaiset rakennusmateriaalit kuten teräs, kevytbetoni, betoni ja tiili valtasivat alaa puulta. Sen seurauksena puurakennusten osuus lopulliseen tilaansa valmistuneista rakennuksista oli vain 26% vuonna 1967. Rakentamismääräykset ja erityisesti palolainsäädäntö, joka suosi palamattomia materiaaleja oli yksi merkittävimmistä syistä kiviainesten materiaalien lisääntymiselle. [1.]

Puumateriaalien osuus rakennusalalla on hitaasti noussut vuoden 1967 jälkeen aina vuoteen 1977, ja tämän jälkeen puumateriaalien suuruus on kasvanut nopeasti. Puurakenteisten pientaloasuntojen valtaisuus selittää puun käytön yleistymisen vuodesta 1979 alkaen. [1.]

Valtion positiivinen näkökanta puurakentamiseen ja puuteollisuuden uusi tuleminen 1990-luvulla panivat alulle uudet lähtökohdat ja tulevaisuudenkuvat puurakentamiselle. 1990-luvun alkutaipaleella oli hankala löytää malliesimerkkejä modernista suomalaisesta puurakentamisen arkkitehtuurista. Pääosin keskieurooppalaisten ja pohjoisamerikkalaisten kohtuullisten esimerkkien inspiroimana alettiin Suomessa satsaa puurakennuksiin. Pääasiallisesti pohjoisamerikkalaisten esimerkkien inspiroimana alettiin myös Suomessa ottaa selvää mahdollisuutta tehdä yli kaksikerroksisia puurakenteisia rakennuksia. [1.]

Vuonna 1997 uudet palomääräykset mahdollistivat 4-kerroksisten puukerrostalojen rakentamisen tarkoin määrätyin ehdoin. Tämän jälkeen Suomessa on toteutettu useita 3- ja 4-kerroksisia puukerrostaloja. Vuonna 2011 tuli voimaan uudet palomääräykset ja ne mahdollistivat peräti 8-kerroksisten puisten rakennusten rakentamisen. Sen seurauksena Suomessa on rakennettu monia 5-8 kerroksisia puu asuinrakennuksia ja sen myötä myös toteutustekniikka on edistynyt. 8- ja 6-kerroksisissa asuinrakennukset Jyväskylässä ja Seinäjoessa käytettiin uudenlaista tekniikkaa. Rakennuksien runkomateriaalina käytettiin CLT-levyä. [1.]

## 2.1 Käyttökohteet

Puutuotteita käytetään lähestulkoon kaikkeen korjaus- ja uudisrakentamiseen. Puusta tehdyt rakenteet soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin rakennuksissa niin yli 8-kerroksisissa kerrostaloissa kuin hallirakennuksissa ja silloissa. Puulle yleisiä käyttökohteita ovat myös kalusteet, sisustus, ovet ja ikkunat. Vaihtoehtoja on monia puukohteiden rakentamiseen ja niistä voidaan valita ratkaisu kulloinkin kyseessä olevaan tapaukseen. Rakentamismääräykset eri maissa sääntelevät puun käyttöpotentiaalia rakentamisessa. [3.]

## 2.2 Puun ominaisuudet

Puu on ominaisuuksiltaan kevyt, luja ja anisotrooppinen eli sillä on eri ominaisuudet pituuden, säteen ja tangentin suunnassa. Puulla on myös on suuret kosteusliikkeet. Tässä kappaleessa käsitellään puun ominaisuuksia lukuun ottamatta paloteknisiä ominaisuuksia. Näihin ominaisuuksiin kuuluu lujuus-, lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet.

### 2.2.1 Lujuusominaisuudet

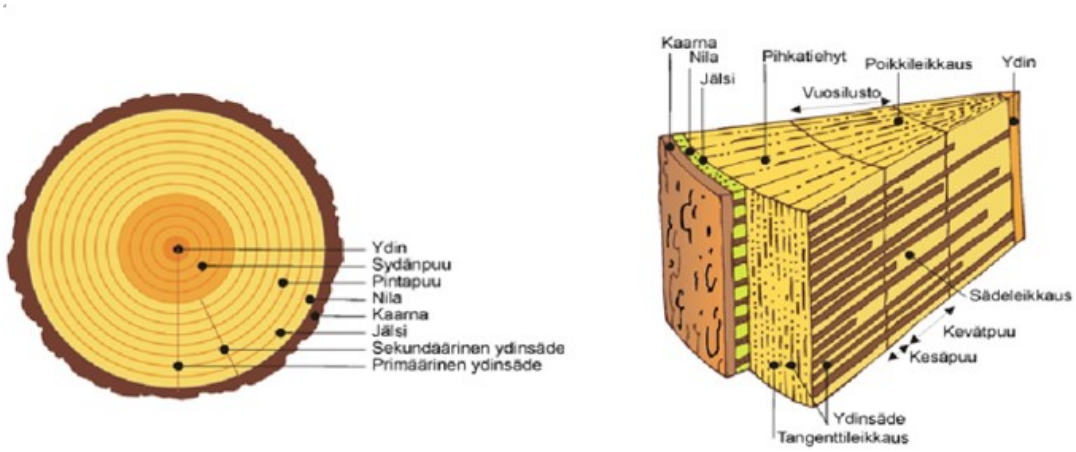
Puun lujuusominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi puun tiheys. Mitä suurempi tiheys, sitä paremmat lujuus, kulutuskestävyys ja kimmoisuus puulla on. On otettava huomioon ja raportoida puun kosteustila, kun määritetään puun tiheyttä. Tämä johtuu siitä, että myöskin tiheys muuttuu kosteudentilan vaihdellessa. Siksi puun tiheys arvioidaan yleisimmin kosteuden ollessa 15%. Rakentamisessa käytetyt puulajit Suomessa ovat tavallisesti kuusi ja mänty. Suomalainen kuusi on tiheydeltään 300 – 470 kg/m³ ja mänty 370 – 550 kg/m³. [4.]

Kuten kuvassa 1 nähdään, puun kasvaessa alkaa syntyä vuosirengas, joka muodostuu tummasta tiiviistä kesäpuusta ja rakenteeltaan harvemmasta kevätpuusta. Puun lujuus riippuu kesäpuun ja kevätpuun välisestä etäisyydestä eli vuosirengasvälistä. Puun lujuuden osalta optimaalinen vuosirengasväli on 1 – 1,5mm. Tällöin kesäpuuta on suhteellisesti enemmän vuosirenkaassa kuin

kevätpuuta. Ihanteellinen vuosirengasväli ei kuitenkaan automaattisesti takaa puulle riittävän hyvää lujuutta ja suurta tiheyttä. Puun vanhetessa rungon sisimmälle osalle muodostuu tavallisesti sydänpuu. Sen kestävyys ei riipu tiheydestä, vaan sen kestävyyden selittää enemmänkin suuri määrä hartsia ja pihkaa. Tämä myös lisää kestävyyttä lahoa vastaan ja on rakennuspuuna parempaa kuin pintaa pintapuu. [4.]

Kuormituksen suunta syitä vastaan luontaisesti vaikuttaa puun lujuusteknisiin ominaisuuksiin. Puun tiheys on suoraan verrannollinen puun taivutuslujuuden kanssa, jos kuormitetaan syiden suunnassa. Puun taivutuslujuus on samansuuruinen kuin vetolujuus, kun puu on virheetön ja tasalaatuinen. Vetolujuus kohtisuoraan puun syiden vastaan on 10-20 kertaa pienempi kuin vetolujuus puun syiden suunnassa. Tiheys vaikuttaa myös puun vetolujuuteen. Puussa ilmenevät halkeamat, virheet ja oksat vähentävät leikkauslujuutta. Puun leikkauslujuus on noin 10-15% vetolujuudesta, kun kuormitus on syiden suuntainen. Puun kimmokerroin kohtisuoraan syitä vastaan saattaa olla sata kertaa pienempi kuin puun kimmokerroin syiden suuntaan. Kimmokerroin tangentin suunnassa on kaksi kertaa pienempi kuin kimmokerroin syiden suunnassa. [4.]

Puuta on asianmukaista lajitella käyttötarkoituksen mukaan, koska puun ominaisuudet voivat poiketa toisistaan eri vaikuttavista seikoista riippuen. Lujuusteknisset ominaisuudet ja puun ulkonäkö ovat kaksi keskeisiä tarkastelukriteeriä, mitkä voidaan lajittelussa erottaa. Laatukriteereistä 90% kohdistuvat puun oksiin lujuus- ja laatulajittelussa. Lujuuslajittelu on mahdollista toteuttaa koneellisesti tai silmämääräisesti. [4.]




Kuva 1. Puun poikkileikkaus. [13.]

### 2.2.2 Lämpöteknisiä ominaisuuksia

Huokoisuuden takia puulla on suhteellisen pieni lämmönjohtavuus ja sen lisäksi se on myös riippuvainen puun tiheydestä. Puun tiheyden pienentyä heikkenee myös lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuus kohtisuorassa syitä vastaan on vain puolet verrattuna syiden suuntaiseen puun lämmönjohtavuuteen. Mallitapauksena männyn lämmönjohtavuus kohtisuorassa syitä vastaan on 0,14 W/m°C ja syiden suunnassa 0,22 W/m°C. Lämmönjohtavuus kasvaa puun kosteuden kasvaessa. Lämpöliikkeet tangentin ja säteen suunnassa ovat huomattavasti suurempia verrattuna puun lämpölaajenemiseen syiden suunnassa. Puun syiden eri suunnissa kosteuskutistuma- ja lämpölaajenemiskertoimien suhde ovat samansuuruisia. Puun jäähtyessä soluonteloiden sisällä oleva vesi kasvaa, jonka johdosta alle 0°C lämpötilassa puussa voi ilmetä halkeamia. [5.]

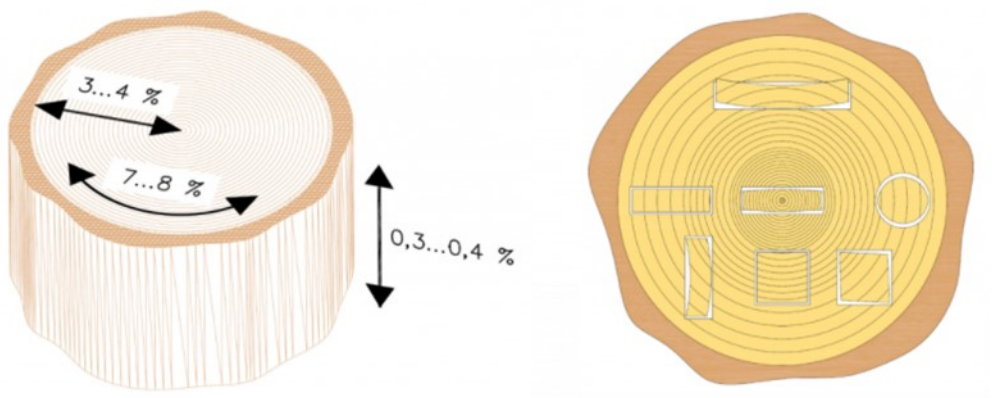
Tiheys, syiden suunta, kosteus ja lämpötila vaikutta puun kykyyn varata lämpöä. Esimerkiksi veden ominaislämpö on isompi kuin puun, ja tämän takia puun ominaislämpö paranee kosteuden kasvaessa. Kuusen ja männyn ominaislämpöarvo nollasta sataan celsiusasteeseen on keskiarvoltaan noin 2300 J/kg°C. Tiilellä on melkeinpä sama lämpökapasiteetti kuin männyllä huolimatta siitä, että puun tiheys on kolmasosa tiilen tiheydestä. Vaikkakin puun lämmönjohtavuus on kolme

kertaa suurempi kuin mineraalivillan lämmöneristys, puun lämpökapasiteetin takia esimerkiksi hirsiseinä toimii itsessään varsin hyvänä ulkoseinänä. [5.]

### 2.2.3 Kosteustekniset ominaisuudet

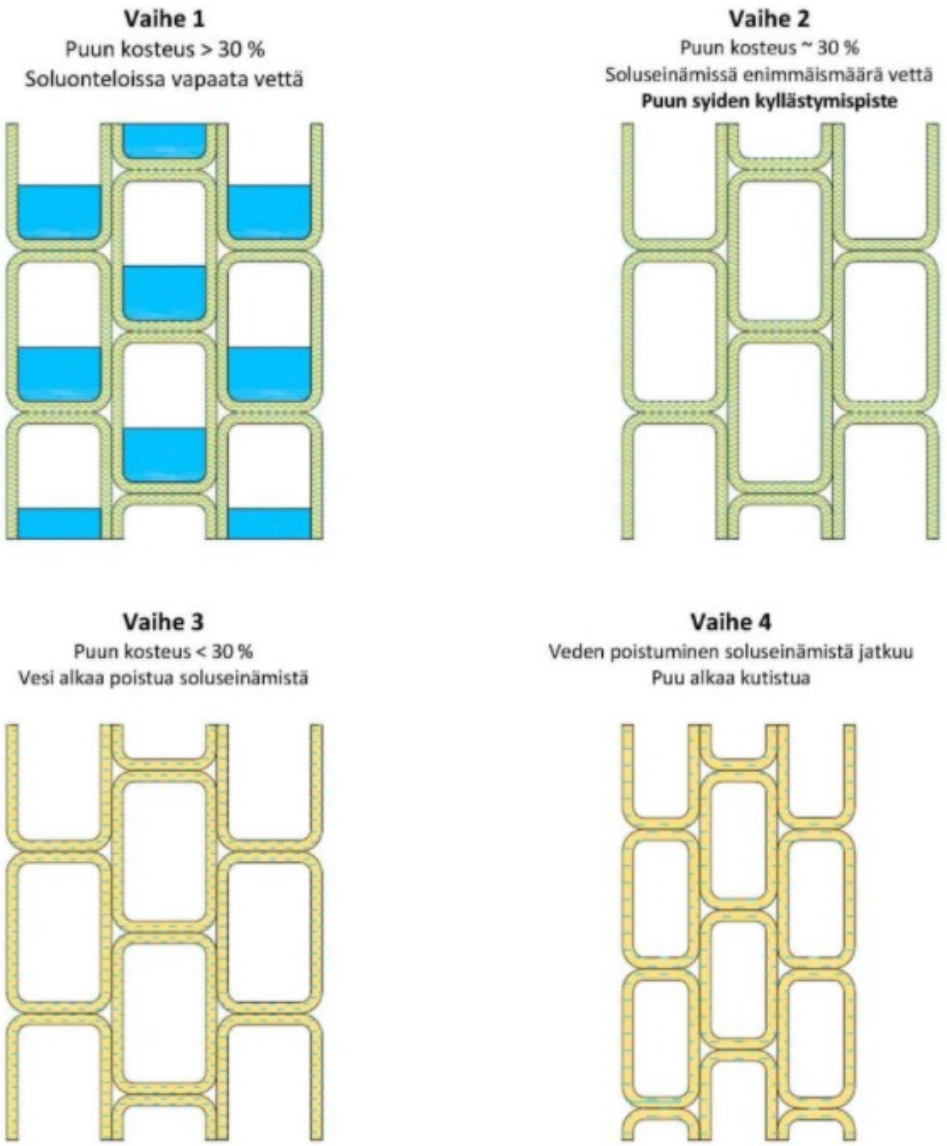
Puu on voimakkaasti hygroskooppinen eli puu sitoo ja luovuttaa kosteutta riippuen ilman suhteellisesta kosteudesta. Puu sopeutuu ympäristönsä kanssa ja pyrkii aina tasapainokosteuteen. Vaikkakin puu olisi pintakäsitelty, puu säilyttää hygroskooppiset ominaispiirteet ja pintakäsittely vain hidastaa kosteuden muutostilaa. [6.]

Puu vaihtaa muotoaan, paisuu ja kutistuu kosteuden muutoksien johdosta. Puun on anistrooppinen materiaali eli sillä on erilaiset ominaisuudet eri suunnissa kuten esimerkiksi syiden, säteen ja tangentin suunnassa. Anisotrooppisten ominaisuuksiensa johdosta turpoaminen ja kutistuminen pitkittäissuuntaan on vähäistä, kun taas poikittaissuuntaan se on suurta ja se pitää ottaa huomioon detaljeja ja puurakenteita suunniteltaessa. Kun puu kuivuu 30% kosteuspitoisuudesta 10% kosteuspitoisuuteen, puu kutistuu mitoistaan katsottuna 3-4% säteen suunnassa, 0,3-0,4% puun pituuden suunnassa ja vuosirenkaan suunnassa 7-8%. Puu turpoaa myös samassa suhteessa kosteuden kasvaessa. Alla olevassa kuvassa 2 esitetään puun kutistuminen ja turpoaminen eri suunnissa. [6.]




Kuva 2. Puun kosteuseläminen. [6.]

Puun syiden kyllästymispiste tarkoittaa kosteustilaa, missä vapaa vesi on poistunut soluonteloista puun kuivettua, ja silti soluseinämät pitää sisällään maksimimäärän vettä. Tässä kosteustilassa puun kosteuspitoisuus on noin 30%. Vapaan veden poistuttua soluonteloista alkaa myös poistua soluseinämiin sitoutunut vesi. Tämä johtaa kutistumiseen, ja se aiheuttaa puulle muodonmuutoksia. Muodonmuutokset taas aiheuttavat puulle sisäisiä jännityksiä, joka taas ilmenee esimerkiksi sahatavarassa kieroutumisena. Yleisesti syntyy myös halkeamia sisäisten jännitysten seurauksena. Tämä kyseinen tapahtuma esitetään kuvassa 3. [6.]




Kuva 3. Puun solukko veden poistuessa. [14.]

Puu on tavallisesti suojassa tuholaisilta, homeelta ja lahottajilta, kunhan kosteuspitoisuus pysyy alle 20%. Myöskin puun jäykkyys- ja lujuusominaisuudet pysyvät hyvinä, niin kauan kuin puu on kuivaa. Hyvät jäykkyys- ja lujuusominaisuudet tulevat lähinnä siitä, kun puu kuivuu ja soluseinämät siirtyvät lähemmäs toisiaan ja kiinnittyvät toisiinsa. [6.]

Puun kosteuspitoisuus tarkoittaa puun täydellisen kuivapainon suhdetta puussa olevan veden painoon. Kosteuspitoisuus määritetään kosteusmittauslaitteella. Kosteuspitoisuuden arvo muuttuu tasapainokosteuden mukaan, ja tämän takia kosteuspitoisuus ei ole täydellinen arvo. Eli tämä tarkoittaa sitä, että puu sitoo kosteutta kosteissa oloissa ja puu luovuttaa kosteutta kuivissa oloissa. Kuten kuvasta 4 näkyy kosteuspitoisuus muuttuu käyttötarkoituksen ja vuodenajan mukaisesti. Näin ollen on olennaista ottaa huomioon, että puutuotteiden kosteuspitoisuus ei pääse muuttumaan voimakkaasti käyttötarkoituksen suositellusta arvosta rakentamisen, tavarakuljetuksen ja varastoinnin aikana. On myös suositeltavaa, että puutavarakaupassa mitataan puutuotteen kosteus ennen kuin se toimitetaan asiakkaalle. Kuvassa 5 esitetään kosteuspitoisuus suosituksia puutuotteille toimituksen yhteydessä. Kosteuspitoisuus tuoreella havupuulla on sunnilleen 30%. Käyttötarkoituksesta riippuen voidaan muutella kosteuspitoisuutta halutun suuruiseksi eri kuivausmenetelmillä. [6.]

| Käyttökohde | Kosteuspitoisuus (suositus) |
|---|---|
| Runko | < 24 % |
| Ulkoverhous | < 18 % |
| Sisäverhous | < 16 % |
| Lattialaudat | < 10 % |

**Tasapainokosteus (suositus)**

Kuva 4. Suositeltavat kosteuspitoisuudet eri käyttötarkoituksille. [6.]

Tyypillisiä puutuotteiden toimituskosteuksia

- vientikuiva perussahatavara 20 % (± 4 %)
- sahatavarasta valmistetut lattialaudat 6…10 %
- liimapuu, CLT 10…12 % (tehdastoimitettuna)
- vaneri, LVL 8…10 % (tehdastoimitettuna)
- liimapuu, vaneri, LVL, CLT ≤ 20 % (varastotoimitettuna)

Kuva 5. Puutuotteiden kosteuspitoisuus suositukset toimituksen yhteydessä. [14.]

Ulkona ilmakuivausmenetelmällä kuivatun puukappaleen kosteuspitoisuus on noin 15-25%. Kosteuspitoisuuden vaihtelu määräytyy ulkoilman suhteellisen kosteuden mukaan. Jotta puukappaleen kosteuspitoisuus pysyisi alle 15%, tulee käyttää keinokuivausmenetelmää. Keinokuivausmenetelmiä on monia ja niistä tehokkain ja yleisin on jatkuvatoiminen kanavakuivaus. Loput keinokuivaukset ovat alipainekuivaus, lauhdekuivaus, kuumakuivaus ja kamarikuivaus. Kuivausmenetelmä yleensä valitaan puukappaleen käyttötarkoituksen ja sen laatuvaatimuksien mukaan, eli jatkuvatoiminen kanavakuivaus ei välttämättä ole se tehokkain kuivausmenetelmä. Lopputuotteen laatuun mm. kieroutumiseen ja halkeiluun voidaan tehdä vaikutus kuivausmenetelmän valinnalla. Lopputuotteen laatu, kulut ja nopeus ovat yleisesti muuttujina kuivausmenetelmän valinnassa. [6.]

Rakennussahatavaran suhteellinen kosteus toimituksen aikana on tavallisesti noin 20%. Laudan mitat muuttuu leveyssuunnassa keskimäärin 0,2%, kun kosteuspitoisuus muuttuu yhden prosentin verran. Puuta pitää kuivaa ja tasaannuttaa keskinkertaiseen käyttökosteusteen mittojen muutosten ja kosteuden alentamiseksi. [6.]

Sahatavaratuote kuivuessaan muuttaa muotoaan, kutistuu ja siihen voi syntyä pintahalkeamia. Tyypillisesti puun kuivuessa jäykkyys- ja lujuusominaisuudet kasvavat. Kuvassa 6 näkyvät arvot auttavat määrittämään likimain sahatavaratuotteen kosteudenmuutosten laajuuteen. Koska sahatavaratuotteen muutokset

poikkileikkausmitoissa saattaa olla montakin millimetriä, kosteusmuodonmuutokset täytyy ottaa huomioon muun muassa liitoksien ja ponttilaudoituksen yhteydessä. [6.]

| Sahatavaran kosteuspitoisuuden muutos | |
|---|---|
| Poikkileikkauksen mittamuutokset | 0,25 % |
| Pituuden mittamuutos | 0,02 % |

Kuva 6. Ohjeet sahatavaran kosteudenmuutosten arvioimiseen. [6.]

Jos kosteuspitoisuus pysyy pitkään aikaan yli 20%, puu vaurioituu. Tämmöisissä tapauksissa ulkoilman tai ympäröivän ilman suhteellinen kosteus on yleensä yli 80%. Ympäröivän ilman ollessa muutaman kuukauden yli 80% aiheuttaa puulle homehtumisen. Kun suhteellinen kosteus ylittää 90% rajan, puu alkaa lahota. Puu lahoaa tietyissä olosuhteissa ja ehtona on se, että lämpötila on 0° – +40 °C. Vaikkakin pakkasella suhteellinen kosteus saattaa olla pitkän ajan yli 80%, lämpötila on liian alhainen lahon ja homeen etenemiselle. Eli puu ei vaurioidu pakkasella. Lahottajasienet ja homeitiöt tarvitsevat ravinteita ja happea toimiakseen. Ravinteita ja happea on tavallisesti riittävästi ympäröivässä ilmassa ja myös puussa. [6.]

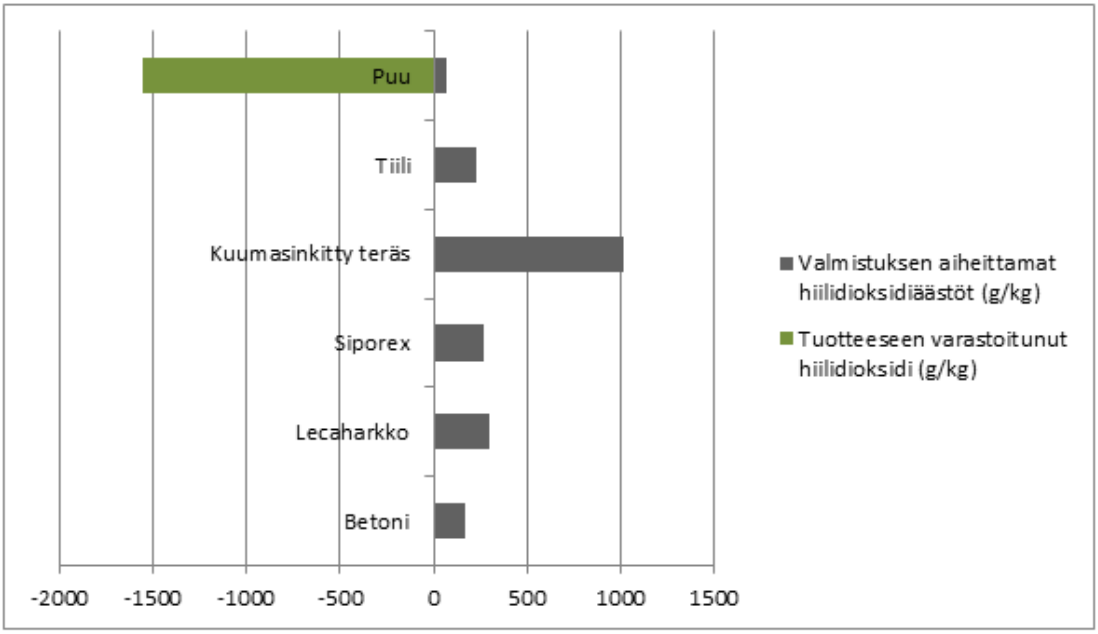
Home ei vaikuta haitallisesti puun lujuuteen, koska se ei pysty tunkeutua puun pintaa syvemmälle. Toisaalta siltä on terveyshaittoja, mikä aiheuttaa ihmisille erilaisia reaktioita tai oireita ja sen takia homeen ilmestyminen on vakavasti otettava. Puun homehtumista sekoitetaan virheellisesti puun sinistymiseen ja sen aiheuttaa sinistäjäsienet. Sinistyminen ei vaikuta puun lujuuteen, vaikka se ulottuu puun pintaa syvemmälle. Sinistäjäsienet eivät viihdy alle +5°C:n lämpötilassa. [6.]

## 2.3 Ekologisuus ja kestävä kehitys

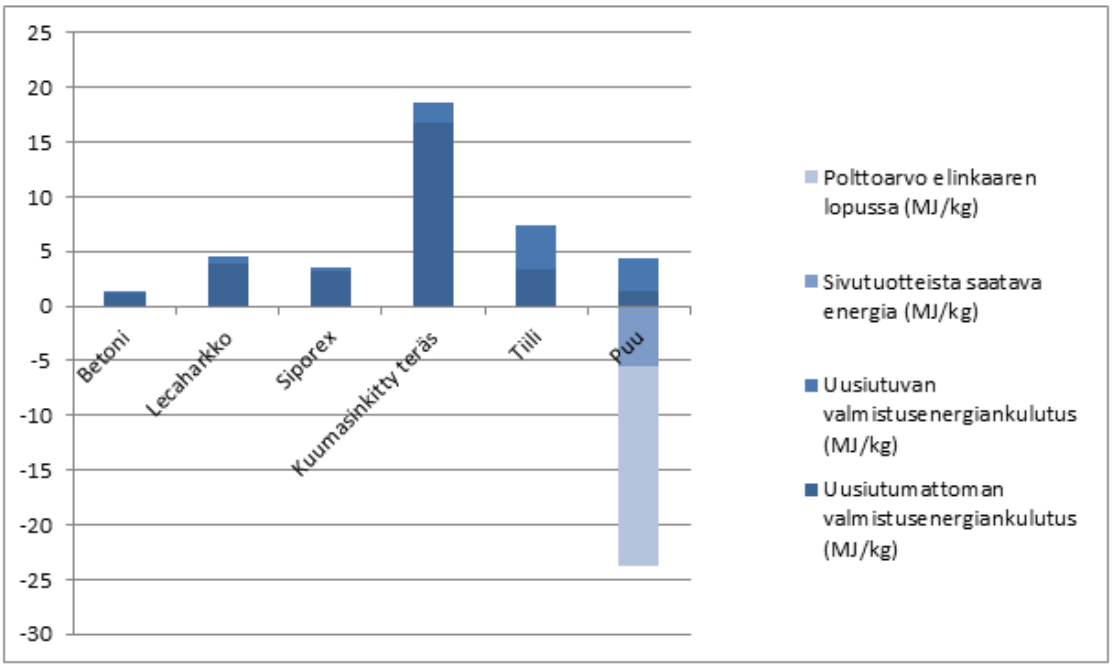
Puu on uusiutuva ja ekologinen luonnonvara. Puun määrä Suomen metsissä on kasvanut 60 prosentilla viimeisen 70 vuoden aikana puun käytöstä huolimatta. Tämän mahdollisti metsästä huolehtiminen oikeanlaisilla toimenpiteillä. Suomessa käytetyt puut ovat sertifioituja ja ne ovat kestävästi tuotettuja. Puun kestävä valmistus ja laillinen alkuperä voidaan todistaa sertifioidusti. Metsissä kasvaa enemmän puuta vuosittain kuin mitä sieltä poistetaan. Myös metsän hiilivaranto kasvaa päivässä saman määrän kuin rakennusteollisuus käyttää puuta vuodessa. Tämän takia ekologisesta näkökulmasta puun kulutusta rakentamiseen voidaan lisätä suuresti. [7. , 8. , 9.]

Ilman hiilidioksidi on tarpeellinen puun kasvun kannalta. Puu sitoo hiiltä itseensä ja samalla vapautuu happea takaisin ilmakehään. Puuaineksesta noin puolet on hiiltä. Peukalosääntönä on yleensä se, että 1 $m^3$ puuta varastoi 750 kilogrammaa hiilidioksidia. Tavanomainen suomalainen puu omakotitalo sitoo noin 25 000 kg ilman hiilidioksidia. Tämä määrä vastaa keskiverto kuluttajan autoilun hiilidioksidipäästöjä noin 10 vuoden ajalta. Hiili varastoituu puurakenteissa parhaassa tapauksessa satoja vuosia. Kuvasta 7 nähdään, että hiilidioksidipäästöjä syntyy verrattain vähän puukappaleiden valmistuksessa. Kuitenkin puuhun varastoituu hiilidioksidia moninkertaisesti verrattuna puukappaleiden valmistuksessa syntyviin hiilidioksidipäästöihin. Myös puun muuttaminen energiaksi ei aiheuta sen enempää hiilidioksidia kuin puun kasvun aikana on varastoitunut. Puun käytön lisääminen vähentäisi rakentamisesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä, kun korvataan muita rakennusmateriaaleja, joiden valmistamisessa syntyy puuhun verrattuna enemmän päästöjä. Puun käyttö vähentäisi myös uusiutumattomien luonnonvarojen loppuun kulutusta. [10. , 11.]

Kuten kuvassa 8 esitetään, puurakenteet ja -tuotteet ovat matalaenergisiä, koska ne kuluttaa vain vähän energiaa. Suuri osa puurakenteiden ja -tuotteiden valmistuksessa käytettävästä energiasta saadaan valmistuksessa syntyvistä sivutuotteista, kuten esim. puun kuoresta. Puu voidaan muuttaa energiaksi tai voidaan kierrättää, kun puu alkaa olla elinkaarensa lopussa. [12.]




Kuva 7. Rakennusmateriaalien valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt. [11.]




Kuva 8. Eri rakennusmateriaalien tuotannosta aiheutuvan energian kulutusmäärä sekä myös eroteltuna tuotettu energia uusiutumattomista ja uusiutuvista energianlähteistä. [12.]

# 3 CLT

CLT eli ristiin laminoitu puu on pitkälle kehitetty insinööripuutuote, joka sopii oivallisesti kaikenlaisiin rakenteisiin. Kuten kuvasta 9 nähdään CLT koostuu ristiin liimatuista lautakerroksista ja lautakerroksia on tavallisesti kolme, viisi tai jopa enemmän. CLT:n rakenne ja sen valmistusmenetelmä tarjoavat valtavia mahdollisuuksia, koska se voidaan liimata ja työstää lähes kaikenlaisiin muotoihin ja kokoihin. CLT:llä on erinomainen ympäristöprofiili, koska CLT on tehty puusta ja se on täysin uusiutuvaa. [15. , 16.]

Ristilaminoidulla massiivipuulla on erinomaiset jäykkyys- ja lujuusominaisuudet, mikä tarkoittaa, että CLT-paneelit voivat kilpailla muiden tavanomaisten rakennusmateriaalien kanssa korkearakentamisessa. Suhteessa omaan painoonsa CLT-rakenteet kestävät suuria kuormia verrattuna muihin rakennusmateriaaleihin, minkä vuoksi suuria CLT-rakenteita voidaan rakentaa kestämään suuria kuormia. CLT:llä on laajat käyttömahdollisuudet, koska geometriaa voidaan muuttaa ja poikkileikkaus voi kestää mitä tahansa muotoa. CLT:tä käytetään jo monenlaisissa rakennuksissa: rivi- ja omakotitalot, kerrostalot, hallit, urheilukentät ja sillat. [16.]

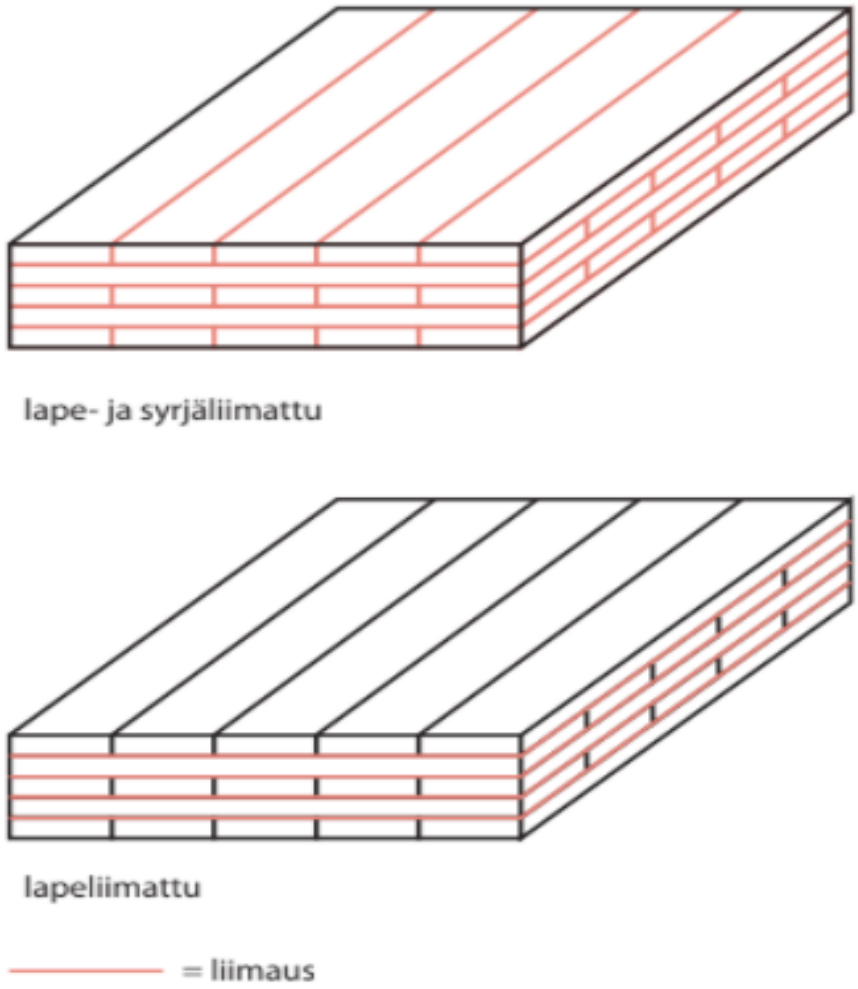
Kuva 9. Kuvaa CLT:stä. [15.]

## 3.1 CLT:n valmistus

CLT on Suomessa aika uusi insinööripuutuote. CLT:n kotimainen valmistus alkoi vuonna 2014 Kuhmossa. Suomen ensimmäinen CLT-levyjen valmistaja on Oy Crosslam Kuhmo Ltd ja he valmistavat CLT-levyt Kuhmon havumetsien raaka-aineesta. Suomessa on tällä hetkellä kolme CLT-levyjä valmistavaa yritystä: CLT Plant Oy, CLT Finland Oy ja Oy Crosslam Kuhmo Ltd. Stora Enso ei valmista Suomessa CLT-levyjä, vaan toimittaa niitä Suomeen. [16. , 17.]

CLT-levyn valmistamiseen on monia tekniikoita. Keski-Euroopassa tavanomainen käytäntö on tyhjiö liimata lamellit keskenään. Tuoreempi valmistustekniikka on liimata ja prässillä puristaa lamellit toisiinsa. Kuten kuvassa 10 esitetään CLT-levyjen liimaamiseen on kaksi tapaa. Syrjäliimatussa CLT-levyssä lamellit liimataan yhtenäisiksi syrjistään ja sen jälkeen tasot asetetaan päällekkäin ristiin. Vaihtoehtoisesti CLT:tä valmistetaan myös syrjäliimaamattomana. Siinä tapauksessa liimaa levitetään ainoastaan lamellien lappeelle ja lamellit pinotaan ristiin. Eri liimaustavat vaikuttavat CLT:n käyttäytymiseen ja ominaisuuksiin.

Syrjäliimaamaton CLT-levy ei ole ilmatiivis, kun taas syrjäliimattu on täysin ilmatiivis. Syrjäliimaamattomassa CLT-levyssä kosteuseläminen tapahtuu samoissa. Syrjäliimatun levyn kuivuminen aiheuttaa puulautojen halkeilun. [15.]




Kuva 10. CLT:n liimaustapoja. [18.]

CNC-jyrsimen avulla levyt muokataan liimauksen jälkeen oikeaan muotoon ja kokoon. Samalla myös työstetään CLT-levyihin valmiiksi sen tarvitsemat aukot ja lävistykset. Mittatarkkuus CLT-levyissä on +/- 1 mm. Käyttökohde määrittää levyn pintakäsittelyn ja sen viimeistelyn. Pintakäsittely ja pinnan hionta tehdään valmiiksi riippuen tilauksesta. Kuvassa 11 esitetään CLT:n valmistusprosessin eri vaiheita. [15.]

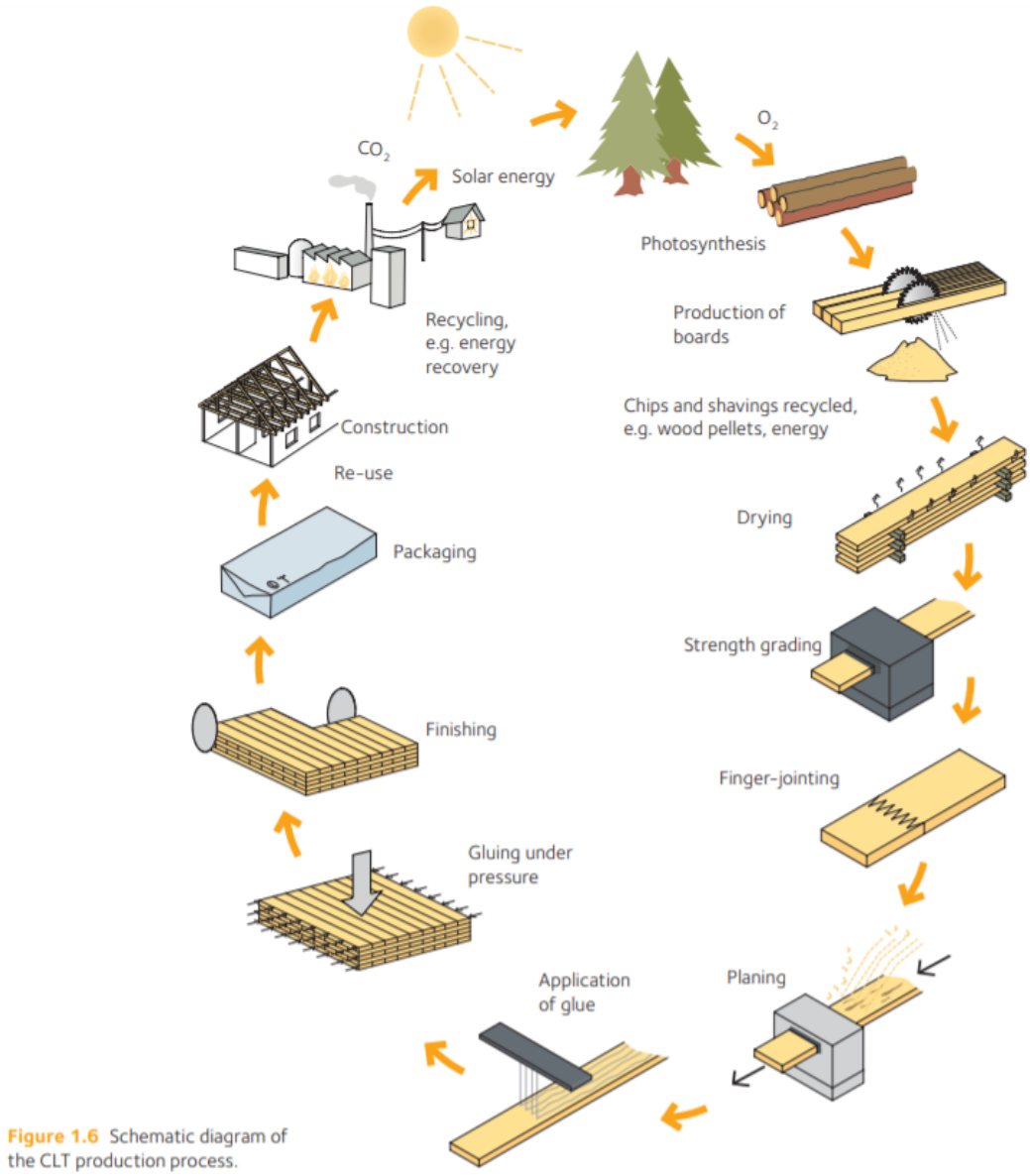



Figure 1.6 Schematic diagram of the CLT production process.

Kuva 11. CLT:n valmistusprosessi. [16.]

## 3.2 Käyttökohteet

CLT:stä valmistetaan yleensä seinä ja lattiarakenteita, mutta CLT-levyjä voidaan käyttää monenlaisiin eri käyttötarkoituksiin pienestä suureen. CLT tarjoaa rajattomat mahdollisuudet, joita rajoittaa vain suunnittelijan mielikuvitus.

CLT-rakenneosien ominaispiirre on niiden koko. CLT-elementtien suuret poikkileikkauspinnat varmistavat suuren riittävän jäykkyyden ja kantavuuden. Tämän takia CLT soveltuu rakennuksen vakauttamiseen. Ne ovat saatavana suurella

valmiusasteella ja niiden kevyt paino tuo etuja kokoonpanon ja kuljetuksen kannalta. Reikien ja lävistyksien tekeminen ja kiinnitysten kiinnittäminen on yksinkertaista ja helppoa. CLT-runko on kevyempää kuin betonirunko. Hyvän äänieristyksen saavuttamiseksi lattioissa ja seinissä on käytettävä monikerroksisia rakenteita, mikä koostuu suurimmaksi osaksi CLT:stä. [16.]

Parvekkeet, parvikerrokset, hissikuilut ja portaikot ovat muita käyttöalueita, joissa CLT:tä käytetään suuresti ja tehokkaasti. Näihin käyttötarkoituksiin tarkoitetut CLT-laatat tarjoavat monia etuja verrattuna betonirungon tai puurungon rakentamiseen. CLT:n pieni paino tekee sen käsittelystä helpompaa ja hyödyttää myös korjausrakentamisessa. CLT:stä valmistetut parvikerroslattiat ovat hyvä valinta, koska siinä voidaan jakaa esim. vanhat korkeakattoiset teollisuusrakennukset useisiin eri kerroksiin. Pienen painonsa vuoksi lisärakentaminen CLT:llä voidaan usein tehdä ilman perustuksien vahvistamista. Toinen etu CLT:n painossa on sen kuljetus ja nostot työmaalla. CLT-runko on myös hyvä vaihtoehto lisäkerrosrakentamiseen myös siksi, koska CLT kestää suuria jännevälejä. [16.]

## 3.3 CLT:n ominaisuudet

CLT:llä on yleisesti samat lujuusominaisuudet kuin puulla tai muilla insinööripuutuotteilla. Lujuus vaihtelee syiden suunnan ja jännityksen välisen kulman mukaan. Kosteuspitoisuuden noustessa CLT:n lujuus laskee. Lujuus laskee myös silloin, kun CLT:tä kuormitetaan pitkään. CLT:n ristiin levykerrokset vähentävät puun vaihteluja ja ominaisuuseroja. [16.]

CLT:n ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus on myös melkeinpä sama kuin puulla. Lämmönjohtavuus kertoo materiaalin eristyskyvystä. CLT:n lämmönjohtavuus on huomattavasti parempi kuin esim. betoni tai teräs. CLT:n arvo lämmönjohtuvuudelle on yleensä noin 0,12 - 0,13 W/(m ° C). CLT:llä on suhteellisen korkea ominaislämpökapasiteetti, mikä on arvoltaan noin 1600 J/(kg ° C). [16.]

Koska CLT on tehty puusta, se laajenee ja kutistuu kosteusolosuhteiden muuttuessa. Mutta kuitenkin ristiin päällekkäin olevat levykerrokset mahdollistavat sen,

että CLT-levy ei laajene ja kutistu yhtä paljon syiden suunnassa kuin tavallinen puu. CLT-levyn laajenemisen ja kutistumisen määrää levykerroksien määrä ja paksuus. Kosteuspitoisuus CLT-elementissä vaihtelee noin 4-5% vuoden aikana riippuen siitä, että missä osassa rakennusta se sijaitsee ja onko rakenne lämmitetyssä tai kylmässä tilassa. Eristämätön CLT-levy tai eristetty ontto CLT-rakenne, joka on sijoitettu ulkoseinään tai kattoon altistuu vaihteleville kosteuden olosuhteille. CLT-rakenne on sisäpuolelta kuiva ja ulkopuolelta kostea. Tämä tarkoittaa sitä, että rakenne kutistuu sisäpuolelta ja laajenee ulkopuolelta, mikä aiheuttaa rakenteelle kaarevan muodon. Tämä erikoispiirre on huomioitava suunnitteluvaiheessa. [16.]

## 3.4 CLT-rakenteen kestävyys kosteusolosuhteiden alaisena

Sveitsin ympäristöviraston (Swiss Federal Office for the Environment) rahoittamassa tutkimuksessa tutkittiin CLT-rakenteen kestävyyttä kosteusolosuhteiden alaisena. Tutkimukset tehtiin teollisesti valmistetuilla CLT-koekappaleilla. Kokokappaleiden näytekoot olivat pieniä ja sen takia kosteuspitoisuuksien muuttumisesta johtuvien jäykkyysominaisuus erojen merkitystä ei voitu tutkimuksessa osoittaa. Siitä huolimatta, voidaan tehdä tutkimuksesta seuraavat päätelmät:

- Lähtökohtaisesti kestävyysominaisuudet heikkenevät kosteuspitoisuuden kasvaessa.

- Turpoaminen sulkee raot keskikerrosten levykerroksien kohdassa. Sisäinen kitkan takia CLT-rakenteen kestävyys paranee hetkellisesti. Kestävyyden lisäys on vain merkittävä pienille taipumille ja sen takia tämä voi aiheuttaa tulosten väärintulkintoja.

- CLT:ssä voi ilmetä halkeamia kuivumisen takia, mikä ilmenee taivutuskestävyyden pienemisenä kohtisuoraan pintakerrosten levykerroksien syiden suunnassa. Koska kuivumishalkeamia voi aina esiintyä, voidaan olla huomioimatta kohtisuoraan pintakerrosten levykerroksien syiden suunnassa CLT-levyn kestävyyslaskelmissa. [19.]

# 4 Työaikainen kosteudenhallinta

Rakenteiden ja rakennuksen suunnittelun aikana alkaa myös rakennuksen kosteudenhallinnan suunnittelu. Kosteusturvallisilla suunnitteluratkaisuilla, rakentamisen aikaisilla kosteussuojilla ja rakenteiden kontrolloidulla kuivattamisella rakennus on todennäköisesti suojassa kosteusvaurioilta. [20.] Seuraavassa luvussa käsitellään Suomen ilmasto-olosuhteita ja kosteudenhallintaa puurakentamisessa. Luvussa selvitetään ilmasto-olosuhteiden vaikutusta kosteudenhallintaan ja vertaillaan myös ilmasto-olosuhteita Suomen ja Itävallan välillä. Luvun lopussa myös selvitetään, mitä määräyksiä on olemassa puurakentamisen kosteudenhallinnalle.

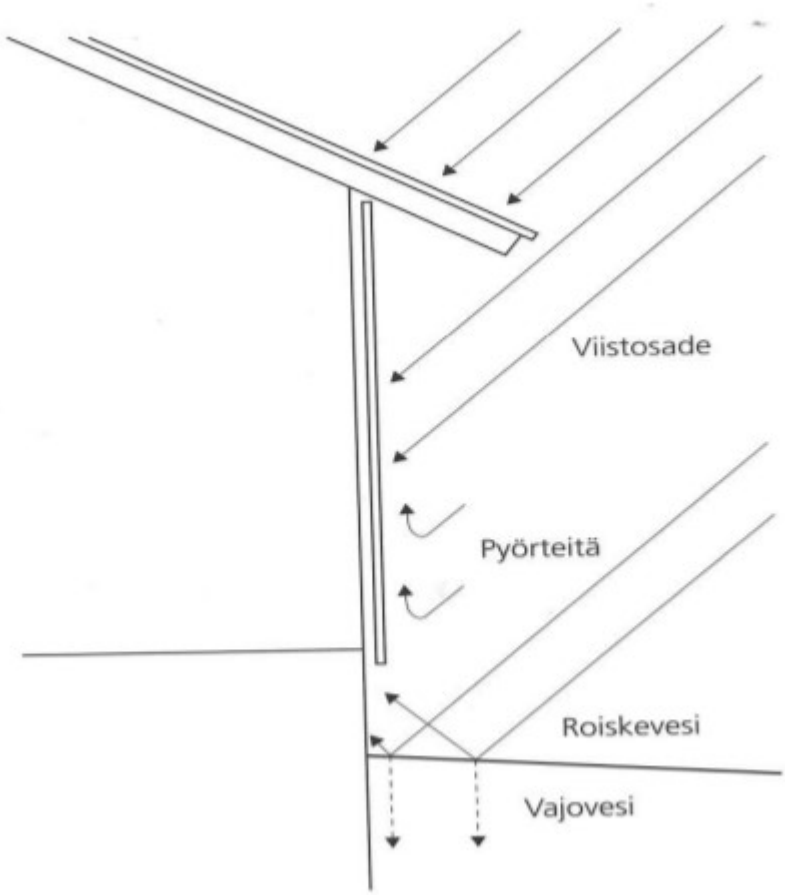
## 4.1 Ilmasto-olosuhteet

Kosteus ja sade saattaa rakennuksen ulkovaipan alttiiksi rasituksille. Nämä rasitukset vaikuttavat töiden aikatauluun ja rakennushankkeen suunnitteluun ja toteutukseen. Ne on otettava huomioon rakenteiden valinnassa, mitoituksessa, tiivistysratkaisuissa ja rakennustöiden toteutuksessa. Jotta torjuttaisiin kosteus-ongelmia, on huolehdittava rakennusmateriaalien, rakennustarvikkeiden ja keskeneräisten rakenteiden suojatoimenpiteistä. [2.]

Sade suuntautuu rakennukseen joko niin sanotusti viistosateena tai pystysateena. Suomessa vallitsevat suurimmaksi osaksi pystysateet, jotka kohdistuvat lähestulkoon pystysuoraan vaakatasossa oleviin pintoihin ja räystäättömissä rakennuksissa myös pystytasossa olevia seinäpintoja. Nämä pystysateet rasittavat pitkälti kattorakenteita. Haittavaikutuksista selvitään perinteisesti hyvin toteutetulla vesikatolla ja riittävän pitkillä räystäillä. [2.]

Viistosadetta esiintyy pääsääntöisesti avoimille tuulille alttiilla sisämaan alueilla, rannikolla ja saaristossa. Voimakas tuuli yleensä liittyy viistosateisiin. Viistosateet, joka esitetään kuvassa 12 rasittavat ikkuna-, seinäpintoja ja vesikattoja. Voimakkaan tuulen rasitus ja viistosade on huomioitava sokkelin, ikkunoiden, julkisivuverhousten ja katon suunnittelua tehdessä. Tärkeimpänä kosteusvaurioiden

aiheuttajana ja vaippaan kohdistuvana rasitustekijänä on sadetyypeistä viistosade. Suomessa sataa vettä kaikkina vuodenaikoina ja sateisia päiviä on huomattavan paljon. Etelä-Suomessa sataa enemmän kuin Pohjois-Suomessa, mutta sateiden määrä siitä huolimatta vaihtelevat paljon eri vuosina alueittain ja kunnittain. Heinäkuu, elokuu, syyskuu ja lokakuu ovat tavallisesti Suomen sateisimpia kuukausia. [2.]




Kuva 12. Rakennuksiin kohdistuva viistosade. [2.]

Ilmasto-olosuhteisiin on kiinnitettävä huomiota kosteudenhallintaa suunniteltaessa. Keski-Euroopassa käytettävä sääsuojaamaton rakennustapa ei sovellu Suomen ilmasto-olosuhteisiin. Liitteenä olevista sääolosuhdevertailuista (Liite 1) nähdään, että Suomen ilmasto-olosuhteet poikkeavat Itävallan lämpötila- ja kosteusolosuhteista suuresti. Itävallassa on pitemmät ajanjaksot, missä sääolosuhteet ovat suotuisat sääsuojaamattomalle puurakentamiselle.

Puun kosteuspitoisuus ei lähde nousuun ainoastaan puun kastumisen takia, vaan myös ilman suhteellisen kosteuden kasvaessa puun hygroskooppisen ominaisuutensa ansiosta. Jos puun kosteuspitoisuus on pääasiassa korkea ja siihen lisätään sääolosuhteiden aiheuttama puun kastuminen, joka ei kykene kuivumaan riittävän ajoissa, hometta alkaa muodostua puun pinnalle. Puun kosteuspitoisuus on noin 17%, kun olosuhteet ovat RH 80% / + 5 °C. Olosuhteiden ollessa RH 90% / + 5 °C puun kosteuspitoisuus on noin 22%. [20.]

## 4.2 Puurakenteiden kosteudenhallinta

Kosteudenhallintasuunnitelma on laadittava rakennuksen rakentamisvaihetta sekä myös rakennusosien valmistusta varten. Standardissa SFS 5978 Puurakenteiden toteuttaminen on esitetty ohjeistus suunnitelman laatimiseen. Kosteudenhallintasuunnitelmalla katetaan kaikki vaiheet valmiista rakennuksesta rakennusosien valmistukseen. [20.]

Kosteudenhallintasuunnitelma sisältää mm. puuelementtien tavoitekosteudet tehtaalle, työmaalle, asennusvaiheelle ja valmiille rakenteelle. Siinä myös esitetään tarkistukset ja tavat kosteuspitoisuuksien todentamiselle. Suunnitelmassa pitää arvioida rakentamisen aikaiset kosteuden lähteet, esim. lumi, sade jne. Tarvittaville suojauksille ja puurakenteiden kuivaamiselle on asetettava vaatimukset suunnitelmassa. [21.]

Kosteudenhallintasuunnitelmassa määritetään sääsuojaustaso rakennusaikaiseen puurakennukseen. Suojaustasoa valittaessa on ennakoitava epätavallisiin sääolosuhteisiin ja muuhun rakentamisesta syntyvään kosteuteen. Suojaustasot ovat seuraavat:

- Suojaustaso ST0, ei suojausta.
  - Kosteuspitoisuus määräytyy ilmaston mukaan.
  - Suositellaan talvikausina ja lyhyellä aikavälillä.

- Suojaustaso ST1, pressu- tai muovisuojaus rakenteiden päällä.
  - Kosteuspitoisuus alle 20 %.
  - Riittävä tuuletus varmistettava.

- Suojaustaso ST2, katesuoja
  - kosteuspitoisuus alle 20 %
  - Suojaustasona luotettavampi kuin ST1.

- Suojaustaso ST3, hallittu olosuhde eli telttasuoja.
  - kosteuspitoisuus alle 15 %. [21.]

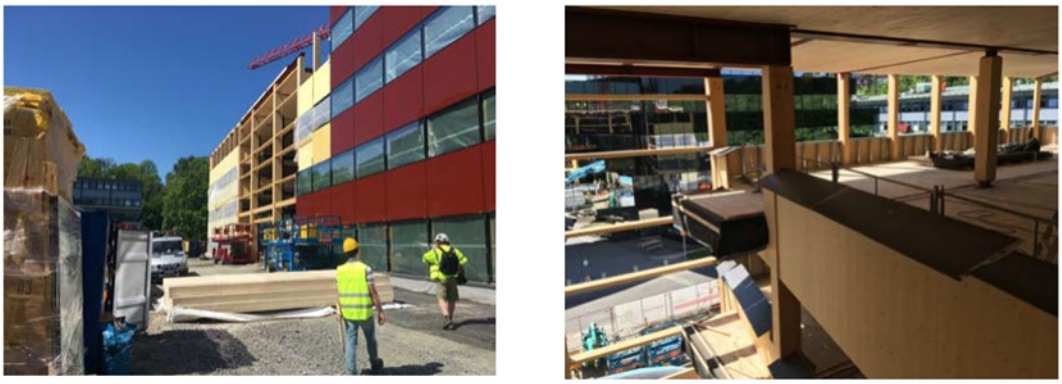
# 5 Tutkimuksen tuloksia CLT-rakentamisesta ilman sääsuojaa

Puurakentamisen trendi on ollut viime aikoina kasvusuunnassa. Tämä tarkoittaa sitä, että insinööripuutuotteiden käyttö on yleistymässä. Euroopassa ja muualla pohjoismaiden maissa on yleisempää rakentaa CLT-runkoisia rakennuksia ilman sääsuojaa. Rakennusalalla uskotaan, että CLT:n rakenne mahdollistaa kosteusturvallisen rakentamisen myös rakenteen altistuessa sateelle. Tälle uskomukselle ei kuitenkaan ole minkäänlaista dokumentointia. [23.] Seuraavassa luvussa tutkitaan CLT-runkorakenteiden käyttäytymistä työmaaolosuhteissa, tutkimuksen tuloksia CLT-runkorakenteiden kastumisesta ja mitä suojauksia tai toimenpiteitä käytetään suojaamattomalle CLT rakentamiselle. Luvun tapaustutkimukset suoritettiin Ruotsissa ja Virossa.

## 5.1 Tapaustutkimus 1

Kuninkaallisen teknillisen korkeakoulun (Kungliga Tekniska högskolan, KTH), opinnäytetyössä tutkittiin CLT-rakenteiden kosteusriskejä ulkoilmassa rakentamisen aikana ja tutkielman pääpainona on ollut homeen riskin arviointi ja kosteusprosessi. Seuraavat esimerkit ovat todellisista projekteista, jotka on rakennettu CLT-runkorakenteista. Kosteushallinnan koskevat tulokset menestyvät vaihtelevasti. Havainnot on tehty osittain kirjoittajilta ja osittain projekteihin osallistuvilta ihmisiltä. [22.]

Ensimmäinen rakennus on Johannebergin tiedepuisto (JSP), joka nähdään kuvassa 13. Se sijaitsee Göteborgissa. Se on monikerroksinen rakennus, joka on rakennettu liimapuupilareista ja teräspalkeista ja CLT-lattiaelementeillä ilman sääsuojaa. [22.]



Kuva 13. Göteborg JSP-hankkeen rakennustyömaa Göteborgissa. [22.]

CLT-rakenteen kosteuspitoisuus toimitushetkellä piti olla enintään 12% ja 16% ennen orgaanisten rakennusmateriaalien levittämistä rakennuttajan vaatimusten toimesta. Tämän johdosta tarkastus ja kosteuspitoisuuden mittaus tehtiin toimituksen yhteydessä. Tällä menettelyllä varmistettiin, ettei kosteuspitoisuus koskaan ylitä 16%. Jos kosteuspitoisuus mittaukset ylittivät kriittisen tason, näytteet kerättiin ja testattiin mikrobien kasvun varalta. Urakoitsijan vaatimus materiaalitoimittajalle oli tiivistää asianmukaisesti liimapuupalkit ja CLT-lattiaelementit. Rakennuttajan vaatimuksena oli myös se, että mikrobien kasvua, epänormaaleja hajuja tai värimuutoksia sienistä on mahdotonta hyväksyä. [22.]

Rakennusmiehet vaikuttivat olevan koulutettuja kosteudenhallintaan. Vedenkestävä teippi oli levitetty huolellisesti ja märissä olosuhteissa pinnat lämmitetiin ja kuivattiin, jotta teippi kiinnittyy oikein. Siitä huolimatta aukkoja silti havaittiin ja matalien kohtien liitoksissa oleva vedenkestävä teippi ei näyttänyt olevan vesitiivis. Lattiaelementtien pinnalla havaittiin rakoja lamellien välillä. Havaittiin myös tahroja, vaikka oli tehty testejä. Näissä samoissa testeissä ei ilmennyt homeen merkkejä. Tahrat syntyivät saastehiukkasista, jotka aiheutuivat lumen sulamisesta. Työmaan kosteuspäällikön mukaan mikrobien kasvua ja kriittistä suhteellista kosteutta ei ole osoitettu koko rakennusprojektin aikana. [22.]

Toisen rakennuksen tietoja ei olla kerrottu salassapidon takia ja sen sijainti on pidetty salassa. Se on monikerroksinen CLT-rakennus, joka rakennettiin ilman sääsuojaa, ilman riittävää vedenkestävää teippiä tai suojapeitettä.

Rakennusprosessi oli tosi hidasta ja ensimmäinen kerros nostettiin suunnilleen viikossa. Tämän jälkeen rakennusurakoitsijat menivät lomille kolmeksi viikoksi jättäen lattiaelementit täysin sateen sateelle siten, että saumat ei peitetty teipillä tai elementtien päätyjä ei suojattu. Vesilätäköitä jätettiin sellaisenaan, kunnes ne kuivuivat itsestään. Ensimmäisen kerroksen lattiaelementti vaurioitui pahimmin siten, että syntyi mikrobikasvua sisälamelleihin. Testit osoittivat homeen kasvua 35-40 mm. [22.]

Esimerkkejä CLT-rakennuksesta, jolla on suhteellisen lyhyt rakennusaika, on Lontoon Stadthaus. Se on 9 kerrosta korkea ja se sisältää 29 huoneistoa. Se pystytettiin vain 27 päivässä 4 miehen miehistöllä, jotka työskentelivät 3 päivää viikossa. [22.]

Norjalaisilla arkkitehdeillä ja rakennusinsinööreillä Oslotre AS:llä on paljon kokemusta CLT-rakennuksista. Heidän mielipiteensä ja kokemuksensa ovat, että sääsuojaa ei tarvita. Kaikki kosteudet kuivuvat nopeasti, koska pinta ottaa suurimman osan kosteudesta aiheutuvaa kuormaa. Vapaasti seisova vesi on vaarallista ja sitä tulisi aina välttää. [22.]

Tutkielmassa mallinnettiin myös WUFI-laskentaohjelmalla riittävä suojaustaso pohjoismaiden sääolosuhteiden mukaan. Tutkielmassa tutkittiin Lundin, Bergenin ja Göteborgin ilmastoa ja sen vaihteluita. Lyhyet rakennusajat mahdollistavat rakentamisen ilman sääsuojausta. Lyhyt rakennusaika tässä tapauksessa on 1-2 viikkoa. Siitä huolimatta tämä vaatii suurta varovaisuutta, koska rakenne kestää vain pienen määrän sadevettä. Tämä sademäärä on enintään noin 10-20mm. Pienet sademäärät kuivuvat muutamassa päivässä, jos sääolosuhteet ovat suotuisat. Tutkielmassa osoitettiin, että CLT-levy kestää 30-40mm:n sademäärän ennen kuin kosteuspitoisuus kohoaa. Vaikkakin rakennettaisiin lyhyellä ajalla, on tarpeellista suojaa esim. muovilla sademäärän ollessa noin 10-40mm. Rakennusajan ylittäessä 2 viikkoa tai sademäärän ylittäessä 40mm on käytettävä katesuojausta. Vuosittaisen sademäärän ylittäessä 1200mm tai keskimääräisen ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80% täytyy olla hallittu rakennusympäristö eli

toisin sanoen katosta ja ulkoseinistä valmistettua kokonaista rakennuksen suojaa. [22.]

## 5.2 Tapaustutkimus 2

Ruotsin valtion tutkimuslaitoksen (RISE) rakennustekniikan osaston tutkimuksessa otettiin selvää kosteusturvasta CLT-rakenteessa ilman sääsuojausta. Hankkeen tapaustutkimukset ovat perustuneet kosteuspitoisuuksien mittauksiin ja materiaalinäytteidenottoon sekä mikrobiologiseen analyysiin CLT-rakenteen rakentamisvaiheessa. Tutkimus ei sisällä korjaamisen valvontaa. Lisäksi tehtiin haastattelut seitsemän henkilön kanssa (työmaapäälliköt, projekti-insinöörit ja konsultit), joilla on kokemusta CLT-rakentamisesta ilman sääsuojaa. Tulokset perustuvat kahteen tapaustutkimukseen, joissa on yhteensä neljä 7-kerroksisia rakennuksia. Nämä rakennukset sijaitsevat Ruotsissa kahdella eri alueella. Kuvassa 14 esitetään näiden rakennuksien kuvia työmaalta rungon pystytyksen aikana. [23.]

Kuva 14. Vasemmassa kuvassa on CLT-lattiarakenne ilman sääsuojaa Länsi-Ruotsissa, jonka päällä on lunta. Oikeassa kuvassa on CLT-runkorakenteita ilman sääsuojaa Keski-Ruotsissa. Vapaa vesi seisoo CLT-lattiarakenteen päällä. [23.]

Seitsemän kerroksen toimistorakennuksen rakennetta Länsi-Ruotsissa seurattiin mittauksilla. Kolme seitsemän kerroksen rakennusta Keski-Ruotsissa tutkittiin niiden runkoja rakennettaessa. CLT-kosteuspitoisuus toimitushetkellä oli kaikissa rakennuksissa 12%. CLT-levyjen valmistajalla ei ollut ongelmia täyttää määritetty 12%: n kosteuspitoisuus näiden hankkeiden toteuttamisen yhteydessä. Projektiin sisältyi kosteusturvallisuuden suunnittelu ja tuotettiin myös kosteuserittely-asiakirja. Työtä seurasi ja valvoi säännöllisesti urakoitsijan kosteusturvallisuus-päällikkö ja rakennuttajan kosteusasiantuntija. Suunniteltiin menetelmiä veden altistumisen rajoittamiseksi. Tapauksissa, joissa kosteuden kertymisen ja mikrobien kasvun seurauksia ei voitu välttää, oli tehtävä korjaus CLT-rakenteelle. Työmaalla käytettiin useita eri menetelmiä kosteuden hallitsemiseksi kuten esim. teippaus, saumojen tai reikien peittäminen vanerilevyillä ja lattian reunojen peittäminen huopapaperilla. Kuvassa 15 esitetään teipattua CLT-lattiarakenteen liitosta. Käytettiin myös menetelmää, missä puupilarit tai CLT-seinät erotettiin lattiarakenteista asettamalla ne teräsjalustalle, muovilohkoille tai ääni- ja tärinätyynyille. Kertynyt vesi poistettiin imurilla ja suunnitelmana oli, että jokainen kerrosrakenne altistuu säälle korkeintaan 1-2 viikkoa ja että se voi olla alttiina sateen aiheuttamalle vedelle. [23.]

Teipin pitäminen kiinni sateen aikana osoittautui vaikeaksi runkorakenteiden asennuksen aikana ja joskus teippi irtosi. Myös lattiarakenteiden epätasaisten pintojen ja siihen liittyvien aukkojen suojaaminen oli vaikeaa. Johtopäätös oli se, että teipillä ei ollut mahdollista suojata täysin. [23.]

Kuva 15. Teipattu CLT-lattiarakenteen liitos [23.]

Oli myös vaikeaa varmistaa, että antavatko laudat ja vanerit täyden suojan. Koska lattiarakenteen vuotavat osat sijaitsivat suunnilleen samoissa kohdissa pystysuunnassa, vesi pystyi jatkamaan useisiin alempiin lattiarakenteisiin. Ne olivat myös vuotavia samoissa kohdissa. Kuvassa 16 esitetään lattiarakenteiden päällä olevaa kerääntynyttä vettä, jotka laskeutuivat yllä olevista kerroksista. Veden poistaminen nopeasti osoittautui vaikeaksi ja suuremmilla vesikertymillä oli vaikeaa imuroida pois kaikki vesi oikea-aikaisesti. Koska suurin osa lattiarakenteista oli alttiina vedelle, niiden kosteuspitoisuus näillä pinnoilla oli korkea kunnes ne olivat kuivuneet. [23.]

Kuva 16. Useita kertoja vettä kerääntyi lattiarakenteeseen. Sadevesi laskeutui pääasiassa yllä olevien kerroksien lattiarakenteista. [23.]

Kaikkiaan 200 analysoidusta mittauspisteestä puolet kasvoi jonkin verran ja noin kolmannes kohtuullisesti tai laajasti. Kosteuspitoisuus vaihteli alhaisesta korkeaan kosteuspitoisuuteen paikoissa, joissa oli homeen kasvua. Se riippui siitä, että tapahtuiko kostutus jatkuvasti, tai oliko se edelleen kostea tai jos kosteus oli kuivunut näytteenottohetkellä. Homeen kasvu johtuu CLT:n altistumisesta vapaalle vedelle, joka muodostuu sadeveden seurauksena. Kasvua ei havaittu paikoissa, jotka eivät ole alttiina vedelle. Tämä on odotettua, koska homeen riskisimulaatiot eivät osoittaneet kasvuriskiä, kun vesialtistusta ei tapahtunut. Kosteuspitoisuus vaihteli alhaisesta korkeaan kosteuspitoisuuteen paikoissa, joissa oli homeen

kasvua. Se riippui siitä, että tapahtuiko kostutus jatkuvasti, tai oliko se edelleen kostea tai jos kosteus oli kuivunut näytteenottohetkellä. [23.]

## 5.3 Tapaustutkimus 3

Viron tutkimusneuvoston rahoittamassa tutkimuksessa tutkittiin CLT-rakentamista ilman katesuojaa. Viimsi State Gymnasium koulu on yksi Viron ensimmäisistä julkisista monikerroksisista rakennuksista, jotka on rakennettu pääasiassa CLT:stä. Kuvassa 17 esitetään tapaustutkimuksen kohteen CLT-rungon pystytysvaiheen aikana. Pysty- ja vaakarakenteessa käytettiin CLT-elementtejä. Tässä tapaustutkimuksessa ei pystytetty väliaikaista telttaa tai alustavaa kattoa sääsuojaksi asennusprosessin aikana. Tapauksessa otettiin huomattavan suurempi riski, koska ei ollut asianmukaista kosteussuunnitelmaa hankkeen tarjousvaiheessa. CLT-elementtejä suojeli vain pakkauksissa käytetty PE-kalvo (polyeteenikalvo). Se laitettiin tuotantoprosessin aikana, jotta päästäisiin haluttuun 13% kosteuspitoisuuteen. Kosteuspitoisuudella oli liikkumavaraa vain 2%, eli kosteuspitoisuus sai olla enintään 15%. [24.]

Kuva 17. Kuvia kohteen CLT-rungon pystytyksestä. [24.]

Tätä tapaustutkimusta varten oli tarkoitus ennustaa ja kartoittaa CLT-elementtien kriittisimmät tilanteet, missä rakenteet ovat alttiina sääolosuhteille asennusprosessin aikana minimaalisilla varotoimenpiteillä. Kaikki pystysuorat elementit oli suljettu ja kosteudelta suojattu, mutta kaikki vaakasuorat elementit avattiin ennen asennusta, jonka jälkeen ne peitettiin.

Näin ollen kriittisimmät ovat kaikki vaakasuorat elementit ja kehäelementit. Työmaan kosteussuunnitelma jaettiin CLT-elementtien täysimittaiseen seurantaan niiden todellisen kosteustilan perusteella ja pienikokoisten CLT-elementtien seurantaan, joita verrattiin työmaa-aikaisiin CLT-rakenteisiin . Lisäksi tehtiin laboratoriomittauksia kapillaarien imeytymiseen veden migraation vaikutuksen ymmärtämiseksi. Kuten kuvasta 18 nähdään seinäelementit kuljetettiin PE-kalvopakkauksessa ja ne pidettiin myös sen sisällä säilytyksen aikana työmaalla ja asennuksen jälkeen. Lattiaelementin peitekalvo poistettiin ennen asennusta, koska se oli saumakohtainen. [24.]

Kuva 18. PE-kalvolla peitetyt CLT -elementit ennen asennusta, asennuksen aikana ja sen jälkeen. [24.]

CLT-elementtien asennuksen jälkeen vesipitoisuutta seurattiin kosteusmittarilla. Rinnakkainen testaus pienikokoisilla pysty- ja vaakasuorilla CLT-elementeillä (300 × 1000 × 60 mm) tehtiin lähellä työmaata vertaamaan suojattujen CLT-elementtien kosteuspitoisuutta suojaamattomiin elementteihin tosielämän rakennuksessa. Kolme vakio tilannetta luotiin erilaisten kosteusolosuhteiden aikaansaamiseksi:

- sulkematon elementti ja altistettu kaikille sääolosuhteille
- sulkematon elementti mutta suojan alla
- tehtaalla suljettu elementti ja pidettiin avaamattomina. [24.]

Työmaavierailut osoittivat sitä, että vaikka vaakasuorat pinnat peitettiin alustavalla kalvolla, mikrobien kasvua ei estetty ja ääritapauksissa kasvu oli nähtävissä paljaalla silmällä. Kuvassa 19 esitetään kuvia lattiaelementeistä, missä on mikrobikasvustoa ja myöskin vettä lattian päällä. [24.]

Kuva 19. Vettä (vasemmalla) ja mikrobien kasvua (oikealla). [24.]

Pienikokoisten CLT-elementtien testaus osoitti, että suojaamattomat vaakasuorat CLT-elementit saavuttivat yli 25% kosteuspitoisuuden suurien sademäärien jälkeen. Pitkäaikaisen suoran veden kosketuksen jälkeen kosteuspitoisuus voi nousta jopa 40% viikossa. Nämä tulokset tukevat selvästi tilapäisen suojan käyttöä sadetta vastaan puurakennusten rakentamisen aikana. Kun CLT oli suojattu rakentamisen aikana alustavilla PE-kalvoilla ja kosteuden turvallisuusperiaatteita noudatettiin, CLT:n kosteuspitoisuus oli alhaisempi. Alueet, joilla on suurin kosteusriski ovat vaakasuorat lattiaelementit ja lattian ja seinän liitokset, kun vesi poistettiin välittömästi CLT-elementeistä. Kriittiset tilanteet työmaalla eivät ylittäneet 17% turvallista kosteuspitoisuuden ylärajaa CLT-elementeissä, joissa on höyryä läpäisevä eristys, eikä kosteus siirtynyt sisäiseen puurakenteeseen. [24.]

# 6 Tulokset

Kosteuteen liittyvät tulokset tutkimuksissa menestyivät vaihtelevasti tässä opinnäytetyössä. Tutkimukset sisälsivät sääsuojaamattoman CLT-rakentamisen tuloksia työmaaolosuhteissa. Tutkimuslähteinä käytettiin pääasiassa ulkomailla toteutettuja CLT-runkoisia rakennuksia. Tapaustutkimukset suoritettiin Ruotsissa ja Virossa. Näiden maiden sääolosuhteet eivät ole verrannollisia Suomen sääolosuhteiden kanssa, vaikka ne muistuttavat Suomen ilmasto-olosuhteita. Suomessa on tosi lyhyet ajanjaksot verrattuna esim. Keski-Euroopan maihin, missä sääolosuhteet ovat suotuisat sääsuojaamattomalle rakentamiselle.

Lyhyet rakennusajat ovat tärkeä tekijä sääsuojaamattomassa rakentamisessa ja se vaatii suurta varovaisuutta. Tämän lyhyen rakennusajan aikaväli on enintään 2 viikkoa. CLT-levy kestää 30-40mm:n sademäärän, ennen kuin kosteuspitoisuus alkaa kohota. On tarpeellista suojaa esim. muovilla sademäärän ollessa 10-40mm, vaikka rakennusaika olisi lyhyt. On käytettävä katesuojaa rakennusajan oltaessa yli 2 viikkoa tai sademäärän ylittäessä 40mm. Tutkimuksissa todettiin, että on tärkeää suojata rakennus sääolosuhteilta varsinkin sateelta kaikkina aikoina. Vaikka tutkimuksissa ilmeni esimerkkejä oikeista projekteista, missä onnistuttiin rakentamaan ilman sääsuojausta, todettiin, että on tärkeää suojata rakennus sääolosuhteilta varsinkin sateelta kaikkina aikoina. Rakennuksen suojaaminen lisäisi tuottavuutta, mutta se lisäisi myös kustannuksia rakentamisessa.

Työmailla käytettiin eri menetelmiä kosteuden hallitsemiseksi kuten esim. teippaus, saumojen tai reikien peittäminen vanerilevyillä ja lattian reunojen peittäminen huopapaperilla. Tutkimuksissa päästiin sellaiseen johtopäätökseen, että teipillä ja vanerilla ei ollut mahdollista suojata täysin. Teipillä oli hankala suojaa sateen aikana, epätasaisissa pinnoissa ja siihen liittyvissä aukoissa. Vanerilla oli myös vaikea varmistaa suojaus, kun lattian vuotavat reiät sijaitsivat suunnilleen samoissa kohdissa eri kerroksissa ja vesi pystyi jatkamaan matkaa useita kerroksia.

Tulosten perusteella näyttää vaikealta tai mahdottomalta välttää mikrobien lisääntymistä CLT-rakentamisen aikana ilman sääsuojaa siten, että rakennusmääräyksiä noudatetaan. Joissakin tapaustutkimuksissa oli suoritettava huomattavaa kunnostustyötä. CLT:lle ei näytä olevan kosteusturvallisia kokoonpanomenetelmiä tai toimenpiteitä ilman sääsuojaa. Tämän takia tutkimuksissa suositellaan käyttää sääsuojausta, mieluiten täydellistä sääsuojaa. Tutkimuksissa osoitettiin myös, että ilman katesuojaa tai telttasuojaa CLT-rungon pystyttäminen ilman pysyviä kosteusvaurioita on erittäin riskialtista, mutta silti pohjimmiltaan mahdollista.

# 7 Yhteenveto

Syy miksi pääasiassa rakennettaisiin ilman sääsuojaa on taloudellinen syy. Sääsuoja saattaa lisää tuottavuutta, mutta se lisää myös kustannuksia. Sääsuojasta ei kannata tinkiä kustannuksen takia. Sääsuojalla rakentamisella on huomattavasti enemmän hyviä puolia verrattuna rakentamiseen ilman sääsuojaa. Jotta CLT-rakentamisen ja ylipäätänsä puurakentamisen hyvä maine ei vaarannu kustannus syiden takia, tarvitaan lisätutkimuksia puurakentamisesta ilman sääsuojaa. Tutkimuksia ei löytynyt lainkaan CLT:n käyttäytymisestä Suomessa työmaa olosuhteissa ilman sääsuojaa.

Suomen valtio on asettanut tavoitteeksi julkiselle puurakentamiselle kaikesta julkisesta uudisrakentamisesta 45% vuonna 2025. Kuntien asettamat tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi nollaan tukevat puurakentamista. Se tukee erityisesti massiivipuun käyttöä kuten esim. CLT. Massiivipuu runkoiset rakennukset muodostavat pitkäaikaisia hiilivarastoja. Puurakentamisen yleistyminen edellyttää myös lisätutkimuksia puurakentamisesta yleisesti ja myöskin rakentamisesta ilman sääsuojaa. [25.]

## Lähteet


1. Siikanen, Unto. 2016. Puurakentaminen

2. Siikanen, Unto. 2014. Rakennusfysiikka.

3. Puun käyttö rakentamisessa. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/kayttokohteet/

4. Lujuusteknisiä ominaisuuksia. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/

5. Lämpöteknisiä ominaisuuksia. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lampoteknisia-ominaisuuksia/

6. Kosteustekniset ominaisuudet. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/puun-kosteustekniset-ominaisuudet/

7. Puun käytön ympäristövaikutukset. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/

8. Puu tuotetaan kestävästi. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/puu-tieto/ymparistovaikutukset/puu-tuotetaan-kestavasti/

9. Puun käyttöä voidaan lisätä. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puun-kayttoa-voidaan-lisata/

10. Puuhun sitoutuu hiiltä. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/puu-tieto/ymparistovaikutukset/puuhun-sitoutuu-hiilta/

11. Puurakenteissa hiili säilyy pitkään. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puu-info.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puurakenteissa-hiili-sailyy-pitkaan/

12. Puutuotteiden valmistus tuottaa enemmän energiaa kuin kuluttaa. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puutuotteiden-valmistus-tuottaa-enemman-energiaa-kuin-kuluttaa/

13. Kirjakuvitukset 3. Ylermi. Kuva verkosta. http://www.ylermi.info/kirjakuvitukset%203.htm

14. Puun kosteuskäyttäytyminen. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/

15. Monikerroslevy (CLT). Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/monikerroslevy-clt/

16. The CLT Handbook. 2019. Verkkoaineisto. https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdfer/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019.pdf

17. Oy Crosslam Kuhmo LTd. Verkkoaineisto. Crosslam. https://www.crosslam.fi/oy-crosslam-kuhmo-ltd.html

18. RT 21-11289 Puutavara jatkojalosteet. 2017. Rakennustieto

19. Gülzow, Richter, Steiger. 2011. Influence of wood moisture content on bending and shear stiffness of cross laminated timber panels. https://www.researchgate.net/publication/229077947_Influence_of_wood_moisture_content_on_bending_and_shear_stiffness_of_cross_laminated_timber_panels

20. Kosteudenhallinta puurakentamisessa. Verkkoaineisto. Puuinfo. https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/kosteudenhallinta-puurakentamisessa/

21. SFS 5978 Puurakenteiden toteuttaminen. 2014. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

22. Öberg, J., Wiege, E. 2018. Moisture risks with CLT-panels subjected to outdoor climate during construction. http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1222631/FULLTEXT01.pdf

23. Olsson, Lars. 2020. Moisture safety in CLT construction without weather protection. https://www.researchgate.net/publication/342583164_Moisture_safety_in_CLT_construction_without_weather_protection_-_Case_studies_literature_review_and_interviews

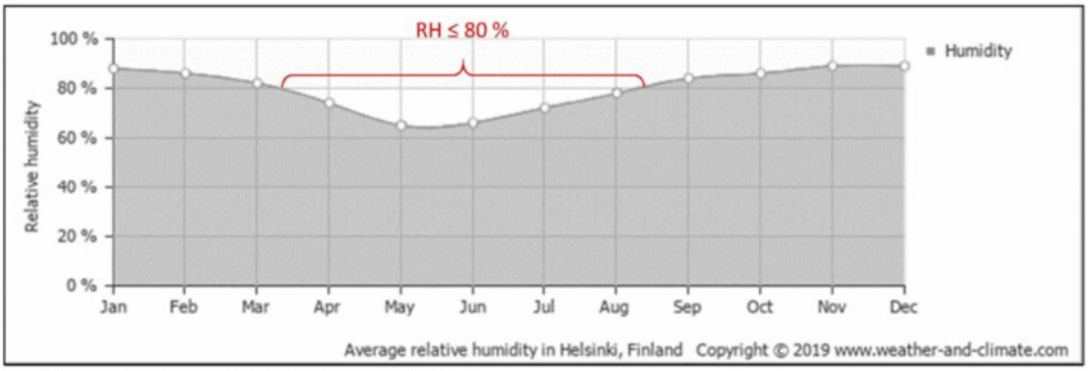
24. Liisma, E., Kuus, B., Kukk, V., Kalamees, T. 2019. A case study on the construction of a CLT building without a preliminary Roof. https://www.researchgate.net/publication/334328865_A_case_study_on_the_construction_of_a_CLT_building_without_a_preliminary_roof

25. Julkisen puurakentamisen kansalliset tavoitteet. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Julkisen-puurakentamisen-kansalliset-tavoitteet-45F5028E_8436_408A_8CD7_510C6C1AD000-161609.pdf/1fc95a52-5c50-4c9b-1f5d-325395658d72/Julkisen-puurakentamisen-kansalliset-tavoitteet-45F5028E_8436_408A_8CD7_510C6C1AD000-161609.pdf?t=1603259868530

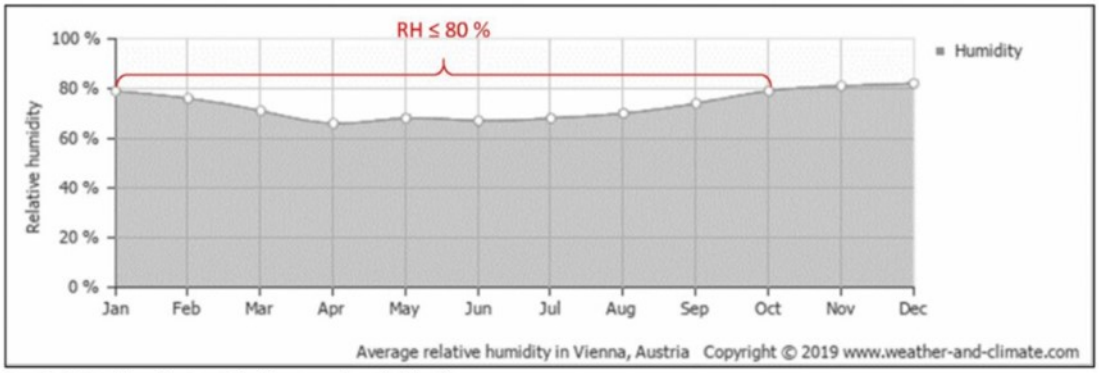
# Liitteet

Liite 1. Ilmasto-olosuhde vertailu Suomen ja Itävallan välillä [20.]

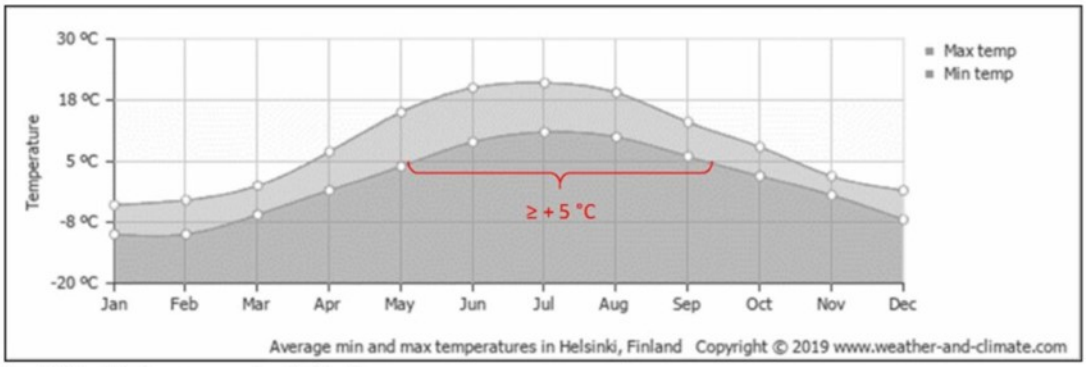
Liite sisältää Suomen ja Itävallan ilmasto-olosuhde vertailuja. Ilmasto-olosuhteissa tutkittiin sademäärää, lämpötilaa ja suhteellista kosteutta vuoden ajanjaksolla.



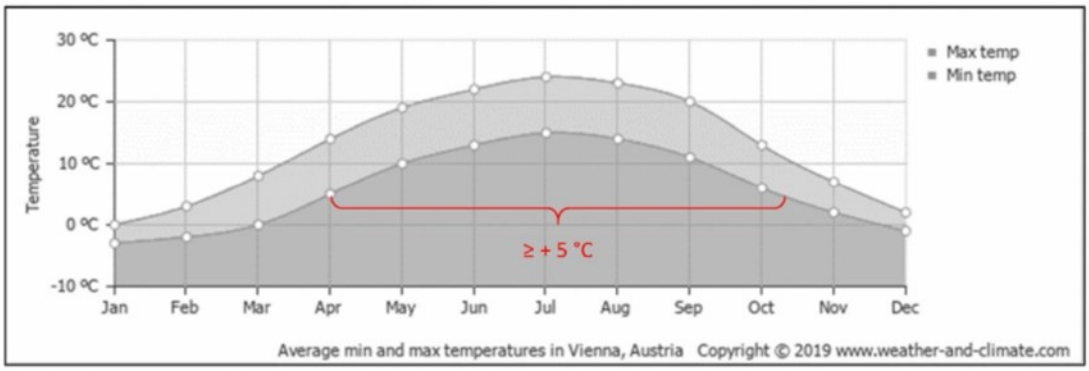

Kuva 1. Suhteellinen kosteus Suomessa vuoden aikajaksolla.



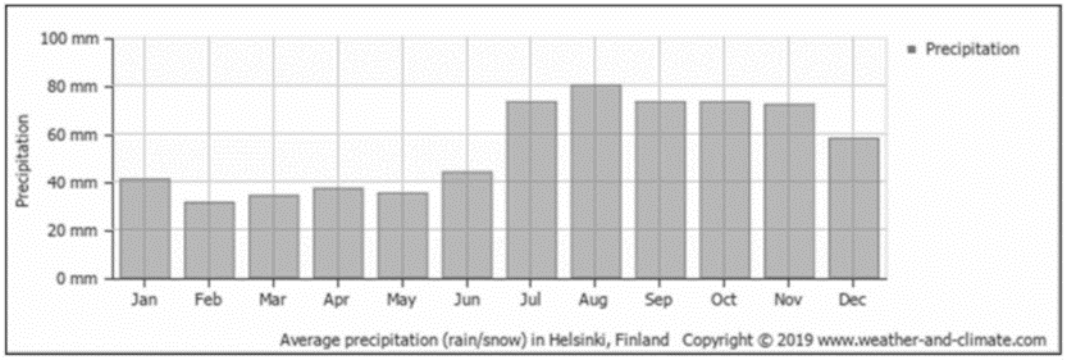

Kuva 2. Suhteellinen kosteus Itävallassa vuoden aikajaksolla.



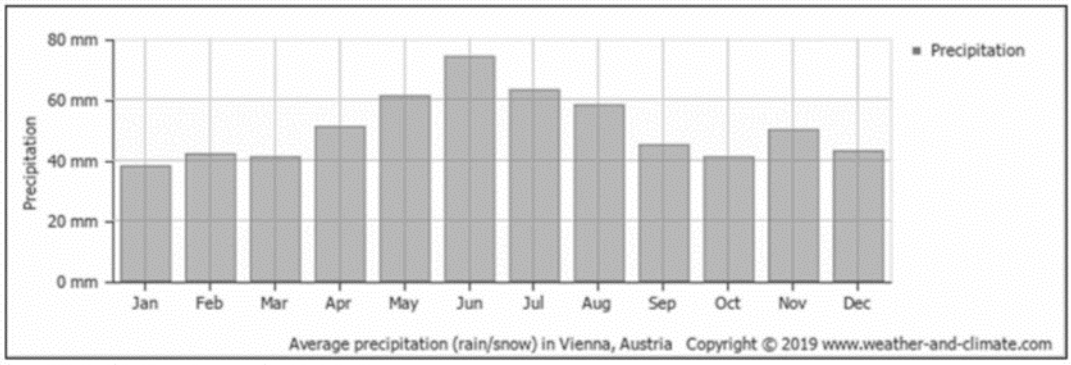

Kuva 3. Lämpötila Suomessa vuoden aikajaksolla.




Kuva 4. Lämpötila Itävallassa vuoden aikajaksolla.




Kuva 5. Sademäärä Suomessa vuoden aikajaksolla.




Kuva 6. Sademäärä Itävallassa vuoden aikajaksolla.