
TUTKIMUS PUURAKENTAMISESTA



2021-06-30

Rev	Datum - Päiväys	Uppgjord av - Laatiija

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Yleistietoa CLT:stä	1
2.1	Puu materiaalina	1
3	Puurakentamisen ja puurakeiden suunnittelun ominaispiirteitä	3
3.1	Ominaispiirteet, puurakenteet yleisesti	3
3.2	Ominaispiirteet, puurakenteiden rakennesuunnittelu	4
3.3	Ominaispiirteet, puurakenteiden elementtisuunnittelu	4
3.4	Ominaispiirteet, puurakenteiden työmaatoteutus	5
3.4.1	Ruuvit, teräsosat, ääneneristyskumit yms.	5
3.4.2	Asennusjärjestys	5
3.4.3	Elementtien varastointi ja suojaus	5
3.4.4	Toleranssit	5
4	Puurakentamiseen liittyvät ominaispiirteet verrattuna betonirakentamiseen	6
4.1	Rakennusaikojen erot eri runkomateriaalien kesken	6
4.1.1	Kokemukset CLT-kohteiden toteutuksesta	6
4.2	Palotekniset rajoitukset	6
4.2.1	CLT:n palotekniset rajoitukset P1-paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksissa.	8
4.2.2	CLT:n palotekniset rajoitukset P2 – paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksissa	10
4.2.3	Paloturvallisuus - yhteenveto	13
4.2.4	Paloturvallisuus - yhteenveto	13
4.2.5	Paloturvallisuus - lähteet	14
4.3	Akustiikka	15
4.3.1	Ilma- ja askelääneneristävyys	16
4.3.2	Sivutiesiirtymät	21
4.3.3	Akustiikka - yhteenveto	23
4.3.4	Akustiikka - lähteet	24
4.4	Sisäilma ja kosteudenhallinta	25
4.4.1	Muoviton rakenne	25
4.4.2	CLT rakenteiden kosteus ja kuivumisen hallinta	25
4.4.3	Työmaan olosuhteet	28
4.4.4	Sisäilma ja kosteudenhallinta - yhteenveto	29
4.4.5	Sisäilma ja kosteudenhallinta - lähteet	30
5	Elinkaarikustannuslaskenta	31
5.1	Lähtötiedot ja laskelman laadintaperiaatteet	31

5.2	Osakustannusten kuvaus	31
5.2.1	Investointikustannus	31
5.2.2	Ylläpito- ja käyttökustannukset	32
5.2.3	Kiinteistön kunnossapitosuunnitelma (PTS)	32
5.3	Kokonaiselinkaarikustannus	33
5.3.1	Betonirunko	33
5.3.2	CLT-runko	35
5.3.3	CLT-runko lämmöneristeellä	36
5.4	Yhteenveto	38
6	Hiilijalanjätkilaskenta	39
6.1	Laskennan lähtötiedot ja laskentaohjelmisto	39
6.2	Laskennan tulokset	39
6.3	Yhteenveto	43

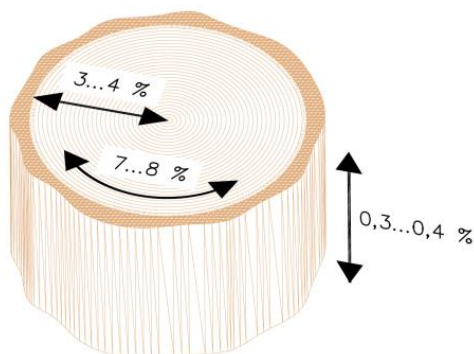
1 Johdanto

Selvityksessä tutkittiin puurakennuksen taloudellista suhtautumista betonirakennukseen investointi- ja elinkaarikustannuksen, rakennusvaiheen ja käytön aikaisen hiilijalanjäljen osalta. Tutkittiin myös mitä paloteknisiä rajoituksia puurakennuksella on verrattuna betonirakennukseen, millainen ero on rakennusajalla ja liittykö puurakennukseen ilmeisiä riskejä.

2 Yleistietoa CLT:stä

2.1 Puu materiaalina

Puun ominaisuudet ovat kehittyneet palvelemaan elävän puun tarpeita. Puu on anisotrooppinen materiaali, jonka kestävyys- ja kosteustekniset ominaisuudet vaihtelevat tarkastelusuunnasta riippuen. Puu on myös hygroskooppinen materiaali eli se luovuttaa ja sitoo kosteutta ympäröivästä ilmasta. Kosteuspitoisuuden muutokset vaikuttavat puun dimensioihin. Anisotrooppisuudesta johtuen puu kutistuu ja laajenee eri tavoin säteen, tangentin ja syiden suunnassa. Puu kutistuu kuivattaessa sitä täysin märästä absoluuttisen kuivaksi tangentin suunnassa keskimäärin 7...8 %, säteen suunnassa noin 3...4 % ja syiden suunnassa vain 0,3...0,4 %.



Kuva 1. Kuivumisen vaikutus puun dimensioihin, kun puu kuivuu märästä absoluuttisen kuivaksi.

Puun kosteuseläminen on otettava huomioon rakentamisessa. Kosteuseläminen aiheuttaa esimerkiksi rakennuksen rungon painumista ja puun suuri kutistuminen tangentin suunnassa aiheuttaa suurikokoisen puutavaran halkeilua. Ulkona ilmakeivä puutavaran kosteuspitoisuus vaihtelee välillä 15-25 % riippuen ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluista. Normaalikäytössä puun kosteus vaihtelee 8-25 % välillä. Mikäli puutavaran kosteuspitoisuudeksi halutaan alle 15 %, tulee se keinokuivata.

CLT (Cross Laminated Timber) on kantaviin rakenteisiin tarkoitettu massiivipuulevytuote. CLT-levyt koostuvat vähintään kolmesta ristikkäin liimatusta lamelli- eli lautakerroksesta. Lamellien materiaalina käytetään tyypillisesti sormijatkettua kuusi- tai mäntysahatavaraa.

Liimauksen jälkeen levyt työstetään oikeaan kokoon ja muotoon CNC-jyrsimen avulla. Myös ikkuna- ja oviaukot, talotekniikan, kiinnitysten, nostojen yms. tarvitsemat lävistyksiset työstetään levyihin valmiiksi. Mittatarkkuus on +/- 1 mm.

Levyn pintakäsittely ja viimeistely riippuu levyn käyttökohteesta. Näkyviin jäävät pinnat hiotaan ja pintakäsitellään valmiiksi tilauksen mukaisesti. Levyjä voidaan käyttää kantavina ja jäykistävinä rakenteina sekä seinä- että lattiarakenteissa. Sisätiloissa levyt voidaan pinnoittaa tai palomääräysten niin salliessa jättää sellaisenaan näkyville tavoitellusta ilmeestä riippuen.

Suomessa on kirjoitushetkellä kolme CLT-levyä valmistavaa yritystä. Myös monet ulkomaiset yritykset toimittavat CLT:tä Suomeen. CLT-levyjen saatavilla olevat koot, paksuudet sekä lamellien lujuuDET, koot ja ladontasuunnat vaihtelevat valmistajasta riippuen. Levyn paksuus voi olla 60...400 mm, leveys enintään 2,95...4,80 m ja pituus enintään 12...20 m.



Kuva 2. CLT-levyjä. (Puuinfo 2020)

CLT:n valmistus voidaan jakaa karkeasti seuraaviin vaiheisiin:

1. Puutavaran valinta, jaottelu ja höyläys
2. Liimaus, ladonta ja puristus
3. Sahaus, työstöt, pintakäsittely
4. Merkintä ja pakkaus

CLT-levyjen lamellien liimausta varten puutavara kuivataan tyypillisesti 12 ± 3 % kosteuspitoisuuteen. CLT:tä valmistetaan kahdella erilaisella liimaustavalla. Lamellit liimataan toisiinsa lapepinnoilta tai lapepintojen lisäksi myös syrjäpinnoilta.

3 Puurakentamisen ja puurakeiden suunnittelun ominaispiirteitä

3.1 Ominaispiirteet, puurakenteet yleisesti

Kantavuus

- Puurakenteiden kantavuus ei rajoita tavanomaisten rakennusten korkeutta tai jännevälejä.

Valmiusaste

- Korkea valmiusaste mahdollinen --> pidentää suunnittelu-aikaa, mutta lyhentää työmaa-aikaa.

Kosteuskäyttäytyminen

- Puurakenteet ovat herkkiä kosteudelle --> vaatimuksia kosteudenhallintaan.

Mittatarkkuus

- CLT:n mittatarkkuus on +/- 1 mm.
- CLT:n mittatarkkuus aiheuttaa vaatimuksia niihin liittyville betonirakenteille.

Massa

- Rakenteet betonirakenteita kevyempiä --> helpommat, nopeammat ja turvallisemmat nostot.
- Puurakenteissa ääneneristävyys tulee huomioida betonirakenteita tarkemmin, koska puurakenteiden massa ei riitä vaimentamaan äänen siirtymistä betonirakenteiden tavoin.

Nopeus

- Korkean esivalmistusasteen ja ns. kuivarakentamisen ansiosta CLT-rakennuksen voi pystyttää nopeammin kuin betonirakennuksen.
- Rakennusvaiheita ei tarvitse tahdistaa betonirakenteiden kuivumisen mukaan.

3.2 Ominaispiirteet, puurakenteiden rakennesuunnittelu

- Huomioitava valmistajien väliset erot rakenteen lujuusarvoissa ja dimensiorajoituksissa. Tieto valmistajasta tarvitaan aikaisessa vaiheessa suunnittelua, jotta laskenta ja elementointi saadaan suoritettua oikeilla tiedoilla.
- CLT-levyihin mallinnetaan kaikki tarvittavat talotekniikan, nostojen yms. tarvitsemat työstöt ja näiden suunnittelussa huomioitava tuotetoimittajan rajoitukset.
- Lähtötiedot esim. reikävarauksista tarvitaan betonirakennesuunnitteluun verrattuna varhaisemmassa vaiheessa.
- CLT-levyjen tilauksen tapahtuessa tietomallipohjaisesti myös tarvittavat varaukset ja reikä tiedot toimitetaan IFC-reikämallina.
- CLT:n kosteuskäyttäytymisestä johtuvat muodonmuutokset huomioitava suunnittelussa.
- CLT:n ja muiden materiaalien välisiä rajapintoja suunniteltaessa huomioitava tarkasti tolarenssiluokkien vaihtelut.
- Rakennesuunnittelussa käytettävät kiinnikkeet yms. liitososat ja niissä käytettävät tuotteet valittava suunnittelun alkaessa (huomioitava esim. ruuvivalmistajien tuotteiden väliset erot).
- Rakennuksen jäykistyksen suunnittelussa huomioitava rungon keveys ja rakennusosille kohdistuvat nosteet.
- Palosuunnittelu vaativampaa: huomioitava näkyvät pinnat, suojaverhoukset ja pintaluokkavaatimukset yms.
- Paloläpivientien suunnittelussa vähemmän vakioituja ratkaisuja kuin betonirakentamisessa.
- Äänitekniinen suunnittelu kohdekohtaista, hyvin vähän vakioituja ratkaisuja (lähtökohtaisesti kohteen suunnittelussa mukana akustikko).
- Vaadittava suunnittelutarkkuus lähtökohtaisesti suurempi, sillä osapuolilla vähemmän kokemusta puurakentamisesta ja vakioitujen suunnitteluratkaisujen määrä vähäinen. Huomioitava myös osapuolien vaihtelevat toteutustavat.
- Rakennetyyppien muodostamisessa huomioitava tarkemmin ääni-, palo- ja visuaaliset vaatimukset.

3.3 Ominaispiirteet, puurakenteiden elementtisuunnittelu

- Elementtien nostojen suunnittelu kohdekohtaista, esim. ruuvinostot, liinanostot yms.
- Työstöjen rajoitukset huomioitava tuotetoimittajan mukaan
- Elementtien tilaus lähtökohtaisesti IFC-mallin kautta, tarvittavat tiedot lamelloinneista, pintalaadusta, mitoista ja työstöistä saadaan mallista.
- Betonielementtisuunnittelusta poiketen sähkön tarvitsemat varaukset merkitään suunnitelmiin CLT-elementtisuunnittelijan toimesta
- Huomioitava asennusjärjestys, vaikuttaa elementtien pontituksiin.

3.4 Ominaispiireet, puurakenteiden työmaatoteutus

3.4.1 Ruuvit, teräsosat, ääneneristyskumit yms.

- Liittimien ja liitososien määrälaskenta ja tilaus huomioitava mukaan työmaan aikatauluun (ei rautakauppatavaraa ja pitkät tilausajat).
- Toteutuksessa käytettävä suunniteltuja kiinnikkeitä ja liitososia, sillä nämä eivät ole suoraan korvattavissa toisen valmistajan "vastaavilla" tuotteilla.
- Varustelu-/liitososien liittäminen elementteihin mahdollista ja nopeuttaa työmaatoteutusta, huomioitava urakkarajoissa ja tuotetilauksissa.
- Työmaalla tarvittavien lämmöneristys- ja tiivistystuotteiden määrät huomioitava työmaatilauksissa.

3.4.2 Asennusjärjestys

- Asennusjärjestys on oltava tiedossa rakennesuunnittelun aikana, sillä järjestys vaikuttaa elementtisuunnitteluun. Huomioitava pontitukset ja liitosten toteutettavuus.
- Asennusjärjestykseen vaikuttavat tontin koko, rakentamisen aikainen suojaustapa (telta, katot yms.), käytettävä kalusto ja mahdollisesti muut tahdistavat rakenteet.

3.4.3 Elementtien varastointi ja suojaus

- Työmaalla välivarastoitavat elementit suojattava täysin ulkopuolisilta rasituksilta.
- Näkyvien pintojen suojaukseen asennuksen ja työmaatoteutuksen aikana kiinnitettävä huomioita. Tarvittaessa asennettava erillissuojaus.

3.4.4 Toleranssit

- Puurakentamisessa mittatoleransseista puhutaan millimetreistä ja betonirakentamisessa sentteistä. Rakenteiden rajapinnassa oltava erityisen tarkka tarvittavien toleranssien täyttymisestä.
- Tarkemittaukset suoritettava ja tarkistettava ennen puurakenteiden asennusta. Mittausten avulla voidaan varmistua rakenteiden soveltuvuudesta puurakenteiden alustaksi ja pystytään mahdollisiin mittavirheisiin tarttumaan ajoissa.

4 Puurakentamiseen liittyvät ominaispiirteet verrattuna betonirakentamiseen

4.1 Rakennusaikojen erot eri runkomateriaalien kesken

4.1.1 Kokemukset CLT-kohteiden toteutuksesta

Sweco Rakennetekniikka Oy oli mukana vastaavana rakennesuunnittelijana Turkuun toteutettavassa puu- ja betonirakentamista vertailevassa kohteessa (TVT Asunnot Oy). Rinnakkain rakennetut rakennukset olivat pohjaratkaisuiltaan, pinta-aloiltaan ja sijainniltaan identtiset. Niiden kautta voidaan vertailla puu- ja betonirakenteisten kerrostalojen käyttäytymistä, kustannuksia, hiilijalanjälkeen vaikuttavia ratkaisuja ja asumistyytyväisyyttä.

Turkuun toteutettavassa kohteessa asennettiin puuelementtejä keskimäärin 100 kpl/viikko, kun vastaavasti betonielementtejä asennettiin kohteessa 60 kpl/viikko. Kohteen betonielementtien asennus oli hieman keskimääräistä hitaampaa, tavanomainen betonielementtien asennusnopeus on 80 kpl/viikko. Kohteen rakennusten puu- ja betonielementtien kokonaismäärät olivat lähes samat.

4.2 Palotekniset rajoitukset

Rakennukset jaetaan neljään paloluokkaan P0, P1, P2 ja P3. Paloluokkia P1, P2 ja P3 käytetään, kun rakennus suunnitellaan noudattaen palomääräysten paloluokkia ja lukuarvoja (taulukkomitoitus). Paloluokkaa P0 käytetään, kun rakennus suunnitellaan osin tai kokonaan perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät palotilanteet (toiminnallinen palomitoitus). Paloluokkien kuvaukset on esitetty taulukossa 1.

Puu on palava materiaali, mutta samalla paloturvallinen materiaali. Palotilanteessa puu hiiltyy tasaisesti, joten sen kuorman kestävyys ja sortuminen palotilanteessa on tarkasti ennakoitavissa. Puurakenteilla voidaan verrattain helposti saavuttaa 30, 60, 90 ja 120 minuutin palonkesto aika. Vaadittava rakenteellinen palonkesto aika saavutetaan rakenteiden suojaverhouksella, joka on tavallisimmin kipsikartonkilevy, ja puurakenteiden hiiltymävaramitoituksella. Palotilanteessa kipsissä oleva kidevesi höyrystyy pitäen levyn lämpötilan palon vastakkaisella puolella alhaisena, mikä ehkäisee puun syttymistä. Rakenteen ontelot voidaan täyttää palamattomalla eristemateriaalilla, joka suojaa puurakenteita ja hidastaa puun hiiltymistä. Puurunkoinen rakennus voidaan toteuttaa kaikissa paloluokissa.

Taulukko 1. Paloluokkien kuvaukset (Puuinfo 2021)

Paloluokka	Kuvaus	Tyypillisiä rakennuskohteita
P0	- Toiminnallisen palomitoituksen mukaan (henkilömäärää ja palokuormaa koskevat tiedot ilmoitettava)	- Yli 28 m korkea asuinrakennus - Yli 28 m korkea työpaikkarakennus
P1	- Rakennuksen kantavien rakenteiden oletetaan kestävän sortumatta palon ja jäähtymisvaiheen aikana ilman, että paloa sammutetaan (yleensä yli 2-kerroksisessa rakennuksessa) - Rakennuksen kokoa ja henkilömäärää ei ole rajoitettu	- Rakennukset, jotka eivät ole sallittuja paloluokissa P2 ja P3
P2	- Rakennuksen kantavien rakenteiden vaatimukset voivat olla P1-paloluokkaa lievemmat - Riittävä turvallisuustaso saavutetaan asettamalla vaatimuksia erityisesti pintaosien ominaisuuksille ja paloturvallisuutta parantaville laitteille - Rakennuksen kokoa ja henkilömäärää on rajoitettu käyttötarkoituksesta riippuen	- Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea asuinrakennus - Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea hoitolaitos (pois lukien suljettu rangaistuslaitos) - Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea majoitusrakennus - Enintään 8-kerroksinen 28 m korkea työpaikkarakennus - Enintään 4-kerroksinen 14 m kokoontumis- ja liikerakennus - 1-kerroksinen tuotanto- ja varastorakennus
P3	- Rakennuksen kantavilta rakenteilta ei yleisesti vaadita palonkestävyyttä, joitakin tapauksia lukuun ottamatta (esimerkiksi osastoivilla rakenteilla myös R-vaatimus) - Riittävä turvallisuustaso saavutetaan rajoittamalla rakennuksen kokoa ja henkilömäärää käyttötarkoituksesta riippuen	- Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea asuinrakennus (kerrokset samaa palo-osastoa) - Enintään 1-kerroksinen 9 m korkea hoitolaitos - Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea työpaikkarakennus - Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea majoitusrakennus - Enintään 2-kerroksinen 9 m korkea kokoontumis- ja liikerakennus - 1-kerroksinen 14 m korkea tuotanto- ja varastorakennus

4.2.1 CLT:n palotekniset rajoitukset P1-paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksissa.

P1-paloluokan rakennuksessa kerrosalaa, korkeutta ja henkilömäärää ei rajoiteta. Palomääräysten taulukkomitoituksen mukaan puurunkoisen rakennuksen voi toteuttaa P1-paloluokassa enintään 2-kerroksisena, koska yli 2-kerroksisten rakennusten runkomateriaalin tulee olla A2-luokkaa. P1-paloluokan puurakennuksessa tulee kuitenkin huomioida ulkoseinärakenteiden tarvikeluokkavaatimukset. Mikäli yli 2-kerroksinen puurunkoinen rakennus halutaan toteuttaa P1-paloluokassa, tulee sen suunnittelu perustua oletettuun palonkehitykseen (toiminnallinen palomitoitus). Taulukossa 2 on esitetty päiväkotij ja koulurakennusten rungon paloteknisiä vaatimuksia P1-paloluokassa.

Taulukko 2. Päiväkotij ja koulurakennusten rungon paloteknisiä vaatimuksia P1-paloluokassa.

Runko- materiaali	Kerrosten lkm.	Korkeus	Sprinklaus	Palo-osasto (m ²)	Runko
Puu	1-2	-	-	<2400	R60
	1	-	Pakollinen	<24000	R60
	2	-	Pakollinen	<12000	R60
Betoni	1-2	-	-	<2400	R60
	1	-	Pakollinen	<24000	R60
	2	-	Pakollinen	<12000	R60
	>2	< 28 m	-	<2400	R60 (A2)
	>2	< 28 m	Pakollinen	<6000	R60 (A2)
	>2	28 m - 56 m	-	<2400	R120 (A2)
	>2	28 m - 56 m	Pakollinen	<6000	R90 (A2)
	>2	> 56 m	Pakollinen	<6000	R120 (A2)

Palon leviämisen estämiseksi rakennus on jaettava palo-osastoihin. Betoni- ja puurunkoisten rakennusten osastoivien rakennusosien luokkavaatimukset eivät poikkea toisistaan.

Palon kehittymisen rajoittamiseksi rakennusosille asetetaan pintaluokkavaatimuksia. P1-paloluokan rakenteiden sisäpintojen luokkavaatimuksia on esitetty taulukossa 3 ja ulkoseinien ulkopinnan ja tuuletusvälin pintojen luokkavaatimukset taulukossa 4.

P1-paloluokan rakennuksen ulkoseinän on oltava pääosin rakennettu vähintään A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista. Yli 56 m korkean P1-paloluokan rakennuksen lämmöneristeen ja muun täyteen on oltava vähintään A2, s1, d0-luokkaa

Paloon vaaraa aiheuttavasti osallistuvat rakenneosat suojataan tarvittaessa suojaverhouk sellä. P1-paloluokassa suojaverhousta ei vaadita 1-2 kerroksissa rakennuksissa. P1-paloluokan yli 2-kerroksisen asuinrakennuksen kerrosten, joiden runkorakenne ei ole vähintään A2-s1, d0 -luokkaa, sisäpuolisten pintojen on oltava varustettuja vähintään A2-

s1, d0 -luokan tarvikkeista tehdyllä vähintään K₂₃₀ -luokan suojaverhouksella. Edellä mainittu ei koske palo-osaston ei-kantavia sisäisiä väliseiniä.

Taulukko 3. Sisäpuolisten pintojen pintaluokkavaatimukset ja vaatimuksen toteuttavia rakenteita P1-paloluokassa.

Käyttötarkoitus	Sprinklaus	Pinta	Pintaluokka-vaatimus	Vaatimuksen toteuttavia pintarakenteita
Kokoontumis- ja liiketilat (palo-osasto < 300 m ²)	Ei	Sisäpuoliset seinät ja katot	D-s2,d2	Esim. puupinta
Kokoontumis- ja liiketilat (palo-osasto > 300 m ²)	Ei	Sisäpuoliset seinät ja katot	C-s2,d1	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Kokoontumis- ja liiketilat (palo-osasto > 300 m ²)	Kyllä	Sisäpuoliset seinät ja katot	D-s2,d2	Esim. puupinta
Ullakko (kerrososastoitu alapuolisesta tilasta)	Ei	Ullakon tai yläpohjan ontelon sisäpinnat	D-s2,d2	Esim. puupinta
Ullakko (ei kerrososastointia)	Ei	Ullakon tai yläpohjan ontelon sisäpinnat	B, s1,d0	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Teknisen huollon tilat	Ei	Seinät ja katot Lattiat	B, s1,d0 D _{FL} -s1	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Uloskäytävät	Ei	Seinät ja katot	A2, s1, d0 D _{FL} -s1	Esim. Betoni, kipsilevy

Taulukko 4. Ulkoseinän ulkopinnan ja tuuletusvälin pintojen luokkavaatimukset ja vaatimukset toteuttavia rakenteita P1-paloluokassa..

Käyttötarkoitus	Ulkoseinän ulkopinta	Tuuletusvälin ulkopinta	Tuuletusvälin sisäpinta	Huom.	Vaatimuksen toteuttavia julkisivurakenteita
Enintään 56m korkea rakennus yleensä	B, s1, d0	B, s1, d0	B, s1, d0	1)	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Yli 56m korkea rakennus	A2, s1, d0	A2, s1, d0	A2, s1, d0		Esim. Betoni, tiili, kipsilevyt, sementtikuitulevyt
1-2.krs ja enintään 28m korkea kokoontumisrakennus	D-s2, d2	D-s2, d2	B, s1, d0	3) 4) 5) 6) 7)	Esim. puuverhous

1) Jos lämmöneriste ei eristäväältä osaltaan täytä B-s1, d0-vaatimusta, ulkopinnan pintarakenteiden on suojattava eristettä palolta niin, että suojaus vastaa EI 30 rakennusosaa tai tuuletusvälin sisäpinta on varustettava K2 30, A2-s1, d0 suojaverhouksella.

3) Palon leviämisen tuuletusvälissä on oltava rajoitettu kerroksittain ja palon leviäminen vaakasuunnassa osastoidun porrashuoneen ulkoseinän tuuletusväliin on oltava estetty.

4) Palon leviämistä julkisivusta ullakkoon ja yläpohjaan on rajoitettava niin, että se vastaa EI 30-rakennusosaa.

5) Julkisivurakenteen laajojen osien putoamista palon sattuessa on rajoitettava.

6) Jos lämmöneriste ei eristäväältä osaltaan täytä B-s1, d0-vaatimusta, ulkopinnan pintarakenteiden on suojattava eristettä palolta niin, että suojaus vastaa EI 15 rakennusosaa tai tuuletusvälin sisäpinta on varustettava K210, A2-s1, d0 suojaverhouksella.

7) 25 §:n mukaista eristekerroksen katkaisua vaakasuunnassa ei edellytetä, jos huomautuksen 6) vaatimukset täyttyvät.

4.2.2 CLT:n palotekniset rajoitukset P2 – paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksissa

P2-paloluokan rakennuksen kokoa ja henkilömäärää on rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen rajoitettava henkilöturvallisuuden takaamiseksi sekä sammutus- ja pelastustyön helpottamiseksi. Palomääräysten taulukkomitoituksen mukaan puu- tai betonirunkoisen päiväkotij- ja koulurakennuksen voi toteuttaa P2-paloluokassa enintään 4-kerroksisena. Yli 2-kerroksinen P2 paloluokan rakennus tulee varustaa automaattisella sammutuslaitteistolla. Taulukossa 5 on esitetty päiväkotij ja koulurakennusten rungon paloteknisiä vaatimuksia P2-paloluokassa.

Taulukko 5. Päiväkotij- ja koulurakennusten rungon paloteknisiä vaatimuksia P2-paloluokassa.

Runko- materiaali	Kerros lkm.	Korkeus	Kerrosala (m2)	Palo- osasto (m2)	Sprinklaus	Henkilömäärä	Runko
Puu	1	< 9 m	ei rajoitettu	< 2400	-	ei rajoitettu	R30
tai	1	< 9 m	ei rajoitettu	< 9600	Pakollinen	ei rajoitettu	R30
betoni	2	< 9 m	ei rajoitettu	< 2400	-	< 250	R30
	2	< 9 m	ei rajoitettu	< 4800	Pakollinen	< 500	R30
	3 - 4	< 14 m	< 12000	< 1200	Pakollinen	< 1000	R60

Palon leviämisen estämiseksi rakennus on jaettava palo-osastoihin. Betoni- ja puurunkoisten rakennusten osastovien rakennusosien luokkavaatimukset eivät poikkea toisistaan.

1-2 -kerroksisen P2-paloluokan rakennuksen lämmöneristeen on oltava eristäväältä osaltaan B-s1, d0-luokkaa. Yli 2-kerroksisen P2-paloluokan rakennuksen lämmöneristeen ja muun täyteen on oltava vähintään A2-s1, d0-luokkaa.

Palon kehittymisen rajoittamiseksi rakennusosille asetetaan pintaluokkavaatimuksia. P2-paloluokan rakenteiden sisäpintojen luokkavaatimuksia on esitetty taulukossa 6 ja ulkoseinien ulkopinnan ja tuuletusvälin pintojen luokkavaatimukset taulukossa 7.

Paloon vaaraa aiheuttavasti osallistuvat rakenneosat suojataan tarvittaessa suojaverhouksella. Päiväkoti- ja koulurakennusten pintojen suojaverhousvaatimuksia P2-paloluokassa on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 6. Sisäpuolisten pintojen pintaluokkavaatimukset ja vaatimuksen toteuttavia rakenteita P2-paloluokassa.

Käyttötarkoitus	Sprinkl Pinta aus		Pinta- luokka- vaatimus	Vaatimuksen toteuttavia pintarakenteita
Kokoontumis- ja liiketilat (palo-osasto < 300 m ²)	Ei	Sisäpuoliset seinät ja katot	D-s2,d2 1)	Esim. puupinta
Kokoontumis- ja liiketilat (palo-osasto > 300 m ²)	Ei	Sisäpuoliset seinät ja katot	C-s2,d1 1)	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Kokoontumis- ja liiketilat (palo-osasto > 300 m ²)	Kyllä	Sisäpuoliset seinät ja katot	D-s2,d2 1)	Esim. puupinta
Ullakko (kerrososastoitu alapuoli sesta tilasta)	Ei	Ullakon tai yläpohjan ontel on sisäpinnat	D-s2,d2	Esim. puupinta
Ullakko (ei kerrososastointia)	Ei	Ullakon tai yläpohjan ontel on sisäpinnat	B-s1,d0	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Teknisen huollon tilat	Ei	Seinät ja katot Lattiat	B-s1,d0 1) DFL-s1	Esim. palosuojattu puu, betoni, kipsilevy
Uloskäytävät	Ei	Seinät ja katot	A2-s1,d0 1) D FL-s1	Esim. Betoni, kipsilevy

1) Huom. pintaluokkavaatimus voi määräytyä suojaverhousvaatimuksen perusteella

Taulukko 7. Ulkoseinän ulkopinnan ja tuuletusvälin pintojen luokkavaatimukset ja vaatimukset toteuttavia rakenteita P2-paloluokassa.

Käyttötarkoitus	Ulkoseinän ulkopinta	Tuuletusvälin pinta	Tuuletusvälin sisäpinta	Huom. toteuttavia julkisivurakenteita
1-2 krs. rakennus yleensä	D-s2, d2	D-s2, d2	D-s2, d2	Esim. puuverhous, tiiliverhous, betoni
Yli 2-kerroksinen ja enintään 28m korkea kootumis- ja liikerakennus	D-s2, d2	D-s2, d2	A2-s1, d0 K210	2) 3 Esim. puuverhous, tiiliverhous, betoni 4) 5)

2) Lukuun ottamatta ensimmäistä kerrosta ja varateiden ylä- ja alapuolella olevia pintoja, joiden osallistuminen paloon voi vaarantaa varatien käytön.

3) Palon leviämisen tuuletusväliin on oltava rajoitettu kerroksittain ja palon leviäminen vaakasuunnassa osasto idun porrashuoneen ulkoseinän tuuletusväliin on oltava estetty.

4) Palon leviämistä julkisivusta ullakkoon ja yläpohjaan on rajoitettava niin, että se vastaa EI 30-rakennusosaa. Rajoittamista ei kuitenkaan edellytetä, jos yläpohjan kantavan rakenteen olennaiset osat on toteutettu vähintään A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista ja yläpohja täyttää EI 60 -luokan vaatimukset.

5) Julkisivurakenteen laajojen osien putoamista palon sattuessa on rajoitettava.

Taulukko 8. Päiväkoti- ja koulurakennusten pintojen suojaverhousvaatimuksia P2-paloluokassa.

Rakennuksen koko	Rakennusosa	Suojaverhous	Huom.
1-2 krs. rakennus, korkeus enintään 9m	Seinäpinnat	K210, B-s1, d0	Suojaverhousta ei vaadita <ul style="list-style-type: none"> • rakennusosassa, jonka lämmöneristeet eristäväältä osaltaan vähintään B-s1, d0 ja muut tarvikkeet vähintään D-s2, d2 • D-s2, d2 -luokan massiivipuuseinässä, joka tiheys on vähintään 350 kg/m³ • seinässä, jossa sisäpinta vähintään B-s1, d0 ja seinä rakennusosana vähintään EI 15 • pilareissa ja palkeissa, jotka täyttävät luokkavaatimukset R 30 ja D-s2, d0
	Kattopinnat	K210, B-s1, d0	
	Ulkoseinän rungon ulkopinnat (tuuletusraon sisäpinta)	Ei vaatimusta	
3-4 krs. rakennus, korkeus enintään 14m	Seinäpinnat	K230, A2-s1, d0	Palo-osastossa saa olla suojaverhoamatonta seinä- ja kattopintaa <ul style="list-style-type: none"> • ei-kantavat väliseinät • ≤ 20 %, ilman erityisvaatimuksia • > 20 % ... ≤ 80 %, jos rakennusosat R90 ja EI90 • > 80 %, jos rakennusosat R120 ja EI 120
	Kattopinnat	K230, A2-s1, d0	
	Lattiapinnat	K230, A2-s1, d0	
	Ulkoseinän rungon ulkopinnat (tuuletusraon sisäpinta)	K230, A2-s1, d0	

4.2.3 Paloturvallisuus - yhteenveto

- Puurakennuksen palosuunnittelu betonirakennuksen palosuunnitteluun on vaativampaa: huomioitava näkyvät pinnat, suojaverhoukset ja pintaluokkavaatimukset yms
- Kerroslukumäärä, kerrosala, korkeus ja henkilömäärä
 - Palomääräysten taulukkomitoituksen mukaan puurunkoisen päiväkotij- ja koulurakennuksen voi toteuttaa P1-paloluokassa enintään 2-kerroksisena. Rakennuksen kerrosalaa, korkeutta tai henkilömäärää ei ole rajoitettu.
 - Palomääräysten taulukkomitoituksen mukaan puurunkoisen päiväkotij- ja koulurakennuksen voi toteuttaa P2-paloluokassa enintään 4-kerroksisena. Rakennuksen kerrosala, korkeus ja henkilömäärä on rajoitettu.
 - Mikäli P1- tai P2-paloluokan rakennus halutaan toteuttaa edellä esitettyjä suurempana, tulee sen suunnittelu perustua oletettuun palonkehitykseen (toiminnallinen palomitoitus).
- Massiivipuuta voidaan jättää näkyväksi pinnaksi seuraavin edellytyksin: (näkyviin jätettävissä puupinnoissa tulee huomioida pintaluokkavaatimukset)
 - 1-2 -kerroksisessa P1-paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksessa puurakenteita ei tarvitse suojaverhota.
 - 1-2 -kerroksisessa P2-paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksessa massiivipuuseiniä ei tarvitse suojaverhota, jos seinän tiheys on vähintään 350 kg/m³.
 - 3-4 -kerroksisessa P2-paloluokan päiväkotij- ja koulurakennuksessa suojaverhoamatonta seinä- ja kattopintaa voi olla:
 - ei-kantavat seinät
 - ≤ 20 %, ilman erityisvaatimuksia
 - > 20 % ... ≤ 80 %, jos rakennusosat R90 ja EI90
 - > 80 %, jos rakennusosat R120 ja EI 120

4.2.4 Paloturvallisuus - yhteenveto

- Palomääräysten taulukkomitoituksen mukaan puurunkoisen rakennuksen voi toteuttaa P1-paloluokassa enintään 2-kerroksisena
- Mikäli yli 2-kerroksinen puurunkoinen rakennus halutaan toteuttaa P1-paloluokassa, tulee sen suunnittelu perustua oletettuun palonkehitykseen (toiminnallinen palomitoitus).
- Puurakennuksen palosuunnittelu betonirakennuksen palosuunnitteluun on vaativampaa: huomioitava näkyvät pinnat, suojaverhoukset ja pintaluokkavaatimukset yms.

4.2.5 Paloturvallisuus - lähteet

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 848/2017, (2017).

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta, 927/2020, (2020).

Paloturvallinen puutalo, asuin- ja toimitilarakentaminen, 2021, Puuinfo.

*Määräykset, paloturvallisuus, 2020, Puuinfo. Saatavilla:
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/maaraykset/paloturvallisuus/>*

*Puun käyttörakentamisessa, Puurakenteiden paloturvallisuus, 2020, Puuinfo. Saatavilla:
<https://puuinfo.fi/puutieto/kayttokohteet/paloturvallisuus/>*

4.3 Akustiikka

Rakennuksen hyvät ääniolosuhteet eli rakennusakustiikka on kokonaisuus, joka muodostuu ääneneristyksestä (ilma- ja askelääneneristys), huoneakustiikasta, meluntorjunnasta ja värinäneristyksestä. Akustiikkasuunnittelun tarkoituksena on saada aikaan rakennuksen tarkoitusta vastaavat ääniolosuhteet. Hyvän ääniympäristön suunnittelu edellyttää akustiikan erityisosaamista ja akustinen suunnittelu tulee aloittaa riittävän varhaisessa vaiheessa yhdessä tilasuunnittelun kanssa. Tässä kohdassa käsitellään puurakenteisten rakennusten akustiikkaa rakennesuunnittelun näkökulmasta, joka kattaa rakennusakustiikan osa-alueet huoneakustiikkaa lukuun ottamatta. Huoneakustiikka käsittelee mm. äänen heijastumista, vaimenemista, etenemistä ja muuta käyttäytymistä huonetilan sisällä.

Rakennuksen ääniympäristöön vaikuttavat rakennuksen sijainti, tilaratkaisut sekä rakennuksen ulkopuoliset ja sisäpuoliset äänilähteet. Ulkopuolisia äänilähteitä ovat esimerkiksi liikenne ja tiiviiseen kaupunkirakenteeseen kuuluvat äänet. Sisäpuolisia äänilähteitä ovat esimerkiksi toiminnasta syntyvä ääni, ilmastoinnin ja muun tekniikan käyntiäänet sekä opetuksessa käytettävien koneiden ja laitteiden äänet. Turvallinen ja pedagogisesti toimiva ääniympäristö voidaan toteuttaa esimerkiksi meluisten toimintojen sijoittelulla ja osastoinnilla sekä erilaisilla rakenteellisilla ja akustisilla ratkaisuilla. Opetuksessa käytettävien laitteiden äänitasoon tulee kiinnittää huomiota. (RT 103080 *Perusopetuksen tilat, suunnittelun lähtökohtia*)

Uudisrakennusten ilma- ja askelääneneristystä ja äänitasoja koskevat määräykset esitetään ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten ääniympäristöstä (796/2017). Ohjeita vaatimusten täyttämiseksi esitetään ympäristöministeriön ohjeessa rakennuksen ääniympäristöstä (2018). Ääneneristävyys vaatimuksia ja vaatimukset täyttäviä seinä- ja välipohjarakenteita on esitetty kohdassa 4.3.1.

Suomessa on siirrytty käyttämään ilmaääneneristävyuden mittalukuna standardisoitua äänitasoerolukua $D_{nT,w}$ ilmaääneneristysuvun R'_w sijasta, koska se vastaa paremmin ihmisen kokemusta ilmaääneneristävydestä. Tässä raportissa käytettyjen ääneneristävyttä kuvaavien termien määritelmät:

- *Ilmaääni* on äänilähteestä ympäristöön ilman välityksellä leviävä ääni, kuten puhe, musiikki, äänentoistolaitteiden ääni tai erilaisten taloteknisten laitteiden aiheuttama ääni.
- *Ilmaääneneristysluku* R_w on rakennusosan laboratoriossa mitattu tai laskennallisesti määritetty ilmaääneneristävyysluku.
- *Äänitasoeroluvulla* $D_{nT,w}$ tarkoitetaan mittalukua, joka kuvaa huonetilojen välistä ilmaääneneristystä.
- *Askelääni* on muihin tiloihin kuuluva runkoääni, jonka aiheuttaa esimerkiksi kulkeminen lattialla tai portaissa, esineiden putoaminen, huonekalujen siirtely tai tavarankuljettaminen.
- *Askeläänitasoluvulla* $L'_{nT,w}+C_{l,50-2500}$ tarkoitetaan mittalukua, joka kuvaa huonetilojen välistä askelääneneristystä. Mittaluvussa on mukana spektripainotustermi.

4.3.1 Ilma- ja askelääneneristävyys

Ympäristöministeriön asetuksessa (796/2017) uuden rakennuksen ääneneristykselle asetetut ääneneristuksen vaatimukset on esitetty taulukossa **Error! Reference source not found.** Asetuksen vaatimukset koskevat asuntoja, majoitus- tai potilashuoneita. Vaatimukset koskeva tilojen välistä ääneneristävyttä eli niihin sisältyvät kaikki äänen kulkureitit, mikä tulee ottaa suunnittelussa huomioon (ks. kohta **Error! Reference source not found.** sivutiesiirtymät).

Taulukko 9. Asuntojen sekä majoitus- ja potilashuoneiden ilma- ja askelääneneristuksen suunnittelussa ja toteutuksessa on noudatettavat lukuarvot.

Huonetila	Pienin sallittu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ (dB)	Suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{nT,w+C_i, 50-2500}$ (dB)
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Asetuksessa määrätään, että opetus-, kokous-, ruokailu-, hoito-, harrastus-, liikunta- ja toimistotilojen ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava tilan käyttötarkoitus huomioon ottaen siten, että niissä saavutetaan toimintaa vastaava riittävän hyvä ääniympäristö. Ääniympäristöohjeen ohjearvot näiden tilojen askel- ja ilmaääneneristävyydelle on esitetty taulukoissa 10 ja 11.

Taulukko 10. Askeläänitasoluvun ohjearvot opetus-, kokous-, ruokailu-, hoito-, harrastus-, liikunta- ja toimistotiloissa.

Tilatyyppe	Ohjearvo Askeläänitasoluku $L'_{nT,w+C_i, 50-2500}$ (dB)
Oppilaitosrakennuksessa kerrosten välillä yleensä	63
Teknisen työn opetustilasta ympäröiviin tiloihin	49
Musiikinopetustilasta ympäröiviin tiloihin	46
Sairaalassa, terveysasemalla yms. kerrosten välillä yleensä	63
Liikuntatilasta ympäröiviin tiloihin	46

Taulukko 11. Äänitasoerolukujen ohjearvot opetus-, kokous-, ruokailu-, hoito-, harrastus-, liikunta- ja toimistotiloissa.

Tilatyyppe	Ohjearvo Äänitasoeroluku DnT,w (dB)		
	Ympäröiviin tiloihin yleensä	Toiseen käyttötarkoitukseltaan saman tyyppiseen tilaan ^{b)} , kun välissä on ovi	Käytävään tai aulaan, kun välissä on ovi
Opetustila ^{a)}	44	42	34
Musiikinopetustila	60	52	44
Varhaiskasvatuksen opetustila	44	42	34
Neuvottelutila	48	42	34
Sairaalan, terveysaseman tms. hoitotila, kuten tutkimus- ja toimenpidehuone, vastaanottohuone, hoito- ja terapiahuone, lepohuone, päivähuone ^{c) d)}	48	42	39
Sairaalan, terveysaseman tms. potilaspaikka ^{d)}	48	42	34
Liikuntatila	57	48	42
Toimistohuone ^{d)}	40	40	30
Toimistorakennuksessa kahden eri toimijan välillä	52	-	-

^{a)} Jos opetustilassa on äänekkästä toimintaa tai äänekkäitä laitteita, kuten teknisen työn opetustilojen konesaleissa, ääneneristystarve on muita opetustiloja suurempi. Kerrosten välillä äänitasoeroluvun ohjearvo on 52 dB.

^{b)} Jos vierekkäin sijaitsevista tiloista toisessa on äänekkästä toimintaa tai äänekkäitä laitteita, ääneneristystarve voi olla suurempi.

^{c)} Jos tilassa on äänekkäitä laitteita, ääneneristystarve voi olla suurempi.

^{d)} Kerrosten välillä äänitasoeroluvun ohjearvo on 52 dB perustuen muuntojoustavuuteen ja suurempaan ääntä välittävään pinta-alaan.

Taulukoissa 12 ja 13 on esitetty kantavilla puu- ja betonirunkoisilla väliseinä- ja välipohjarakenteilla saavutettavia äänitasoerolukuja sekä askeläänitasolukuja. Taulukoissa esitettyjen äänitasoerolukujen saavuttaminen edellyttää rakenteilta ilmatiiveyttä sekä liitosten, saumojen ja läpivientien huolellista suunnittelua ja toteutusta. Taulukoissa ei ole esitetty tiloja jakavien ei-kantavien rakenteiden ääneneristävyyslukuja, koska lähtökohtaisesti puu- tai betonirunkoisessa rakennuksessa voidaan käyttää samoja ei-kantavia rakenteita.

Väliseinärakenteet

Puurakenteinen massiivinen väliseinä ei täytä opetus- eikä lepotilojen ääneneristävyysvaatimuksia. Seinän ilmaääneneristävyyttä on mahdollista parantaa lisäämällä seinärakenteen massaa esimerkiksi levytyksillä, mutta tällä tavalla menetetään näkyvän puupinnan hyödyt. Rakenteiden ääneneristävyyttä parannetaan tyypillisesti tuplarunko- tai lisärunkorakenteilla. Väliseinien liitokset ympäröiviin rakenteisiin suunnitellaan ja toteutetaan siten, että sivuavat rakenteet eivät heikennä tiloja erottavalla väliseinärakenteella saavutettavaa ääneneristävyyttä.

Taulukko 12. Väliseinärakenteilla saavutettavia äänitasoerolukuja.

	Rakennekerrokset	Äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ [dB]
VS1_CLT	1. CLT 140 mm	≥ 34
VS2_CLT	1. 2x EK-kipsilevy 13+13 mm 2. CLT 140 mm 3. 2x EK-kipsilevy 13+13 mm	≥ 44
VS3_CLT	1. CLT 140 mm 2. Ilmarako 10 mm 3. Teräsranka 66 mm + min. villa 50 mm 4. Havuvaneri 12 mm 5. Kipsilevy 13 mm	≥ 48
VS4_CLT	1. Palokipsilevy 18 mm 2. CLT 80 mm 3. Mineraalivilla 50 mm 4. CLT 80 mm 5. Palokipsilevy 18 mm	≥ 55
VS5_BET	1 Betoni 180 mm	≥ 55
VS6_BET	1. Betoni 200 mm	≥ 57

Välipohjarakenteet

Taulukon **Error! Reference source not found.** mukaan opetus- ja lepotilojen kerrosten välisen äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ ohjearvo on yleensä 52 dB ja askeläänitasoluvun $L_{n,w}+C_{l,50-2500}$ ohjearvo on yleensä 63 dB.

Taulukko 13. Välipohjarakenteilla saavutettavia äänitasoerolukuja ja askeläänitasolukuja.

	Rakennekerrokset (ylhäältä alas)	Äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ [dB]	Askeläänitaso- luku $L_{n,w}+C_{l,50-2500}$ [dB]
VP1_CLT	1. Betonilaatta 80 mm 2. Askeläänieriste 30 mm 3. CLT 200mm 4. Alaslasku jousirangoilla 5. 2x kipsilevy 13+13 mm	≥ 52	≤ 63
VP2_CLT	1. Askelääntä vaimentava pintamateriaali ($\Delta L_w \geq 13$ dB) 2. Betonilaatta 120 mm 3. CLT 200mm 4. Palovilla	≥ 52	≤ 63
VP3_LVL	1. Lattialevytys n. 30 mm tai betonilaatta n. 60 mm 2. LVL ripa- tai kotelolaatta + mineraalivilla 100 mm 3. Koolaus jousirangoilla 4. Palokipsilevy 15 mm	≥ 52	≤ 63
VP4_BET	1. Lattiatasoitelaasti 20 mm tai betonilaatta 80 mm 2. Ontelolaatta 320 mm	≥ 55	≤ 53
VP5_BET	1. Betonilaatta 80 mm 2. Askeläänieriste 30 mm 3. Ontelolaatta 320 mm	≥ 55	≤ 53

Äänekästä toimintaa tai äänekkäitä laitteita sisältävien tilojen vaatimukset ovat tiukemmat, kuin normaaleissa opetus- ja lepotiloissa. Äänekästä toimintaa tai äänekkäitä laitteita sisältävien tilojen välipohjarakenteiden ääneneristävyttä parannetaan tyypillisesti ääntä eristävillä alakattorakenteilla sekä betoni- että puurunkoisissa rakennuksissa.

Ulkoseinärakenteet

Melualueille rakentaminen edellyttää rakennuksen ulkovaipparakenteilta ääneneristävyttä. Ympäristöministeriön asetuksessa määrätään, että rakennuksen, jossa on asuntoja, majoitus- tai potilashuoneita, ulkovaipan ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava siten, että ääneneristys $\Delta L_{A,vaad}$ on vähintään 30 desibeliä ja impulssimaisen, kapeakaistaisen tai pienitaajuisen melun keskiäänitaso ei ylitä nukkumiseen tai lepoon käytettävissä huoneissa 25 desibeliä. Opetus- ja kokoontumistiloissa sovelletaan ainoastaan melutason päiväohjearvoa ($L_{A,eq,7-22}$) 35 dB, joka ei saa ylittyä (Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 993/1992).

Rakennuksen ulkovaipan ääneneristyksen mitoituksessa sovelletaan ensisijaisesti kaavamääräyksessä annettuja lukuarvoja. Ulkovaipan ääneneristävyysvaatimus $\Delta L_{A,vaad}$ selvitetään viimeistään rakennuslupavaiheessa erillisellä meluselvityksellä. Rakennuksen sisätilaan muodostuva melutaso riippuu rakennuksen ulkovaipan kaikkien rakennusosien, kuten ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden, ikkunoiden ja ikkunaovien sekä korvausilmaventtiilien kyvystä eristää ääntä. Taulukossa **Error! Reference source not found.** on esitetty ulkoseinärakenteiden ilmääneneristävyksiä.

Taulukko 5. Ulkoseinärakenteiden ilmääneneristävyksiä.

	Rakenekerrokset (ulkoa sisään)	Ilmääneneristävyys R_w (R_w+C , R_w+C_{tr}) [dB]
US1_CLT	1. Julkisivuverhous 2. Tuuletusrako 3. CLT 260 mm	47 (46, 41)
US2_CLT	1. Julkisivuverhous 2. Tuuletusrako 3. Mineraalivilla 180 mm 4. CLT 140 mm	49 (48, 42)
US3_BET	1. Betoni 70 mm 2. Min.villa 220 mm 3. Betoni 150 mm	60 (59, 54)

Taulukkoon 15on laskettu taulukon **Error! Reference source not found.** v aipparakenteilla saavutettava äänitasoero, kun huoneen mitat ovat 7x11 m², ulkoseinän pinta-ala 51 m², ikkunoiden pinta-ala 12 m².

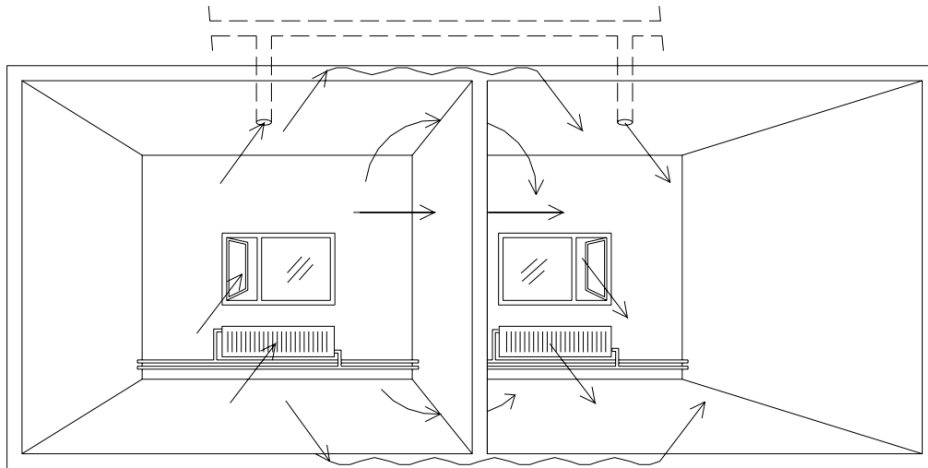
Taulukko 15. Taulukon **Error! Reference source not found.** vaipparakenteilla saavutettavat äänitasoerot eri ikkunavaihtoehdoilla.

Tunnus	Ulkoseinä		Ikkuna	Saavutettava äänitasoero $\Delta L_{A,tot}$
	$R_w+ C_{tr}$	$R_w+ C_{tr}$		
US1_CLT	41	37		32
US2_CLT	42	37		33
US3_BET	54	37		34
US1_CLT	41	42		35

US2_CLT	42	42	35
US3_BET	54	42	39

4.3.2 Sivutiesiirtymät

Ympäristöministeriön asetuksen (796/2017) ääneneristysvaatimukset koskevat ääneneristävyyttä rakennuksessa tilojen välillä. Rakennuksessa saavutettava ääneneristävyys riippuu ensinnäkin äänen siirtymisestä asuinhuoneistosta toiseen suoraan niitä erottavan rakennusosan kautta ja lisäksi äänen kaikista muista kulkureiteistä. Ääni siirtyy tilasta toiseen vaakasuunnassa niitä erottavan väliseinän kautta, mutta myös ulkoseinän, käytäväseinän ja välipohjan sekä LVI-järjestelmän kautta. Äänen siirtymistä tilasta toiseen muita reittejä kuin tiloja erottavan rakennusosan kautta sanotaan sivutiesiirtymäksi. (Karelia 2017) Sivutiesiirtymäreittejä on havainnollistettu kuvassa **Error! Reference source not found..**



Kuva 3. Havainnekuva äänen siirtymäreiteistä. (Talorakentamisen akustiikka, 2006)

Rakenteellinen sivutiesiirtymä sisältää äänen sivutiereitit rakenteiden kautta. Rakenteellinen sivutiesiirtymä on keskeinen tekijä puurakennuksissa tilojen välillä saavutettavan ääneneristävyyden kannalta. Rakenteellisella sivutiesiirtymällä on yhteys rakennuksen runkojärjestelmään ja ratkaisuihin, jotka ovat mahdollisia sivutiesiirtymän vähentämiseksi. Tavallisesti puurakennuksissa tilojen rajalla rakenteisiin järjestetään jokin joustava kerros eli tärinäneristin. (Karelia 2017)

Betonirakenteissa sivutiesiirtymän väheneminen perustuu liittyvien rakennusosien massaun. Betonirakenteisiin verrattuna kevyissä puurakenteissa sivutiesiirtymän vähentämisen kannalta keskeistä on seinä- ja välipohjarakenteiden välisten liitosten toteuttaminen tärinäneristettyinä pysty- ja vaakasuunnassa. Rakennuksen jäykistämisen kannalta liitokset ovat ongelma korkeissa rakennuksissa, koska niiden tulisi olla joustavia, mutta kuitenkin välittää rakennuksen vaakakuormia. (Karelia 2017) Kuvassa **Error! Reference source not found.** on esitetty tärinäneristyksessä käytettäviä tuotteita.



Kuva 4. Vasemmalla tärinäneristyskaistoja ja oikealla tärinäneristettyjä kiinnikkeitä. (Rotho Blaas)

Tärinäneristyksessä käytettäviä tuotteita valmistavat esimerkiksi Rotho Blaas Srl ja Getzner Werkstoffe GmbH.

4.3.3 Akustiikka - yhteenveto

- Puurakenteille ei ole vielä muodostunut vakioituja ratkaisuja.
 - Suunnittelu kohdekohtaista.
 - Lähtökohtaisesti kohteen suunnittelussa mukana akustikko.
- Massiivipuurakenteinen väliseinä ilman akustisia lisärakenteita ei täytä opetus- eikä lepotilojen ääneneristävyysvaatimuksia.
- Sekä betoni- että puurunkoisten rakennusten välipohjissa käytetään alakattorakenteita ääneneristävyuden parantamiseksi.
- Betonirakenteissa sivutiesiirtymän väheneminen perustuu liittyvien rakennusosien massaan. Betonirakenteisiin verrattuna kevyissä puurakenteissa sivutiesiirtymän vähentämisen kannalta keskeistä on seinä- ja välipohjarakenteiden välisten liitosten toteuttaminen tärinäneristettyinä pysty- ja vaakasuunnassa.

4.3.4 Akustiikka - lähteet

Ympäristöministeriön asetus rakennusten ääniympäristöstä, 796/2017 (2017)

Ympäristöministeriön ohje rakennusten ääniympäristöstä (2018)

RT 103080 Perusopetuksen tilat, suunnittelun lähtökohtia (2019)

Puukerrostalojen ääneneristys, asiantuntijaselvitys, Karelia 2017)

Talonrakentamisen akustiikka, 2006

Verkkosivu: <https://www.rothoblaas.com/products/soundproofing>

Verkkosivu: <https://www.getzner.com/en/applications/construction/building-acoustics/innovative-sound-control-in-timber-construction>

4.4 Sisäilma ja kosteudenhallinta

4.4.1 Muoviton rakenne

Tiiveytensä ansiosta CLT toimii vaipparakenteissa höyrynsulkuna eikä erillisten höyrynsulkumuovien käyttö ole tarpeellista. Liitosten suunnittelussa ja toteutuksessa tulee olla huolellinen, jotta rakennuksesta tulee ilmatiivis

4.4.2 CLT rakenteiden kosteus ja kuivumisen hallinta

Massiivisia puurakenteita sisältävän rakennuksen kosteudenhallintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota. Puumateriaalin eloperäisyydestä johtuen puun pinnalle alkaa herkästi kasvaa mikrobikasvustoa otollisissa olosuhteissa. Kosteusvaurioiden ehkäisemiseksi puun kosteuspitoisuus tulee pitää riittävän alhaisena koko toimitusketjun ajan, mutta toisaalta puun liian nopea kuivuminen aiheuttaa rakenteiden halkeilua.

Massiivisia puurakenteita sisältävän rakennuksen kuivatus käyttöolosuhteisiin tulee tehdä hallitusti. Rakennuksen kuivatuksessa oleellista on sovittaa betonirakenteiden kuivuminen hallitusti puurakenteiden ympäristöön. Puurakenteiden kuivaus on järjestettävä riittävän hitaaksi, jotta vältetään puurakenteiden halkeilulta. Betonirakenteiden kuivatuksessa tulee ottaa huomioon puurakenteiden asettamat reunaehdot.

Puun halkeilu on ilmiönä väistämätön. Puurakenteiden halkeilu on seurausta puun kosteuselämisestä, kun puurakenteiden rakenteellinen kestävyys ei ylity eikä rakenteissa ole valmistusvirheitä. Mikäli puun muodonmuutokset on estetty, kuivumisen seurauksena puuhun syntyy syitä vastaan kohtisuoria vetorasituksia ja vetojäännityksen ylittäessä vetokestävyyden, syntyy halkeama. Halkeamien syntyminen on todennäköisintä talvella (lämmityskaudella), kun sisäilman suhteellinen kosteus on alhainen.

CLT-rakenteissa halkeamien vaikutus rakenteiden esteettisyyteen on merkittävä ja pahimmassa tapauksessa hallitsematon halkeilu voi johtaa elementtien kuormituskapasiteetin heikkenemiseen. Halkeamien muodostumisen ehkäisemiseen tulee kiinnittää huomiota.

Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017, 12 §) määrätään, että rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava rakennushankkeen kosteudenhallintaselvityksen laatimisesta.

Kosteudenhallintaselvityksen sisältöä on esitelty tarkemmin TOPTEN -ohjekortissa 117c01. Asetuksen (782/2017) 13 pykälässä määrätään, että vastaavan työnjohtajan on huolehdittava työmaan kosteudenhallintasuunnitelman laatimisesta rakennushankkeen kosteudenhallintaselvitykseen pohjautuen. Standardin SFS 5978 mukaan kosteudenhallintasuunnitelmassa on puurakenteiden osalta esitettävä seuraavat asiat:

1. Hankkeessa käytettävät puumateriaalit ja -tuotteet
2. Puutavaran, puuelementtien ja rakennusosien tavoitekosteudet tehdasvalmistuksen eri vaiheissa.
3. Puutavaran, puuelementtien ja rakennusosien tavoitekosteudet työmaalle tuotuna, asennuksen aikana ja valmiina rakenteena.
4. Vastaanottotarkastukset ja vastuuhenkilöt
5. Rakentamisen aikaiset kosteuslähteet

6. Puurakenteiden suojaustasot rakentamisen aikana eri puurakennusosille ja arvioitu tarvittava suojausaika.
7. Puun suojausmenetelmät työmaalla; varastointi ja varaston suojaus, pakalleen asennetun osan suojaus suojaustason mukaisesti, sekä kastuneiden puuosien kuivaustapa.
8. Rakenteiden hallittu kuivaus rakennuksen käyttöolosuhteisiin sisältäen kosteuden aiheuttamien riskien kartoituksen, torjunnan ja poikkeustapausten herkkyyden arvioinnin, sekä puun kosteuspitoisuuksien, kuivumisaikojen ja tarkoituksenmukaisten kuivausolosuhteiden määrittämisen. Lisäksi huomioidaan työmaa-aikataulun vaikutukset ja varasuunnitelmat, sekä kuivumisolosuhteiden järjestäminen.
9. Kosteusmittaus suunnitelma, jossa esitetään mittausmenetelmät, aikataulu, vastuhenkilö ja dokumentointi.

Halkeamien muodostumiseen voidaan vaikuttaa rakentamisen eri vaiheissa:

1. Valmistus
2. Kuljetus
3. (Varastointi)
4. Työmaan runkovaihe (elementtiasennus)
5. Rakennuksen käyttöönotto

Valmistus

CLT-levyjen valmistuksessa halkeamien muodostumiseen voidaan vaikuttaa merkittävästi käyttämällä riittävän kuivaa puutavaraa. Puutavaran kosteuspitoisuuden tulisi olla mahdollisimman lähellä käyttötilanteen kosteuspitoisuutta. Mikäli CLT-levyjä varastoidaan tehtaalla, tulee myös varastointiolosuhteiden vastata käyttötilanteen lämpötila ja kosteusolosuhteita.

Syrjäliimaamattoman CLT-levyn pinnassa muodonmuutokset tapahtuvat pintalamellien saumoissa, jolloin saumojen raot kasvavat kuivumisen seurauksena. Pintalamellien välisten rakojen syntymistä voidaan vähentää lamellien syrjäliimauksella, mikä toisaalta lisää halkeamien syntymistä lamellien keskelle. Halkeamien syntymistä voidaan hallita myös CLT-levyn pinnan urituksella.

Puutavaran valinnalla ja lamellien ladonnalla voidaan osaltaan vaikuttaa halkeamien muodostumiseen. Halkeamien muodostumista voidaan vähentää käyttämällä pintalamelleissa kvarttisahattua puutavaraa tai asettamalla levyn pintalamellit siten, että puutavaran ydin on CLT-levyn ydintä kohti.

Kuljetus

Pitkien ja järeiden puurakenteiden nostot ja kuljetus ovat periaatteessa samanlaisia kuormitustapauksia kuin rakenteiden käyttö valmiissa rakennuksissa. Tästä syystä suunnitelmiin pitää sisällyä nosto- ja kuljetussuunnitelma, jossa esitetään tarvittavat nostovoimat ja nostopaikat sekä mahdolliset sivuttaistuennat. Sama koskee kuljetuksen aikaisia tuentoja ja rakenteiden sitomisia siten, että ne eivät pääse kaatumaan.

Kuljetukseen liittyväistä halkeiluista ei ole yleisellä tasolla yksittäistapauksia lukuun ottamatta tiedossa vaurioita, joten kuljetus toimii nykyistenkin työtapojen mukaan

kelvollisesti. Periaatteessa varsinkin pitkien kuljetusten aikana on kastumisriski olemassa. Käytännössä rakenteet suojataan muoveihin tai vastaaviin kuljetuksen aikana. Lyhytaikainen kastuminen ei aiheuta rakenteellista riskiä, koska kosteuden imeytyminen massiiviseen puuhun on melko hidasta.

Varastointi työmaalla

CLT-rakenteita ei suositella varastoitavaksi työmaalla. Mikäli CLT-rakenteita joudutaan varastoimaan työmaalla, tulee rakenteet tukea työmaavarastoinnin aikana periaatteessa samoista kohdin kuin valmiissa rakenteessa. Halkeilunkin kannalta puurakenteet on suojattava kastumiselta työmaalla. Erityisesti on estettävä jatkuva kosketus veteen. Lyhytaikainen kosketus veteen ei ole merkittävä, koska vesi ei tällöin voi imeytyä puuhun ja kosteusmuodonmuutokset jäävät tapahtumatta eikä samalla halkeiluriski lisääny.

Työmaan runkovaihe (sääsuojaus)

Massiivisista puurakenteista koostuvaa rakennusta ei suositella toteutettavan ilman sääsuojausta. Mikäli rakennus halutaan toteuttaa ilman sääsuojausta, tulee rakennusaikainen kosteusrasitus huomioida mm. rakennedetaljeissa, rakennusjärjestyksessä, rakenteiden kuivumiskyvyssä ja kosteudenkestävyydessä. Rakenteellista tai kattavaa sääsuojausta käytettäessä voidaan merkittävästi rajoittaa ja poistaa kastumisen aiheuttamia riskejä. Myöskään talviolosuhteet eivät haittaa työskentelyä. ST3 luokan sääsuojauksella voidaan estää runkovaiheen aikainen kosteuden siirtyminen puurakenteisiin sekä mahdollisesti edistää puurakenteiden kuivumista jo runkovaiheen aikana.

Puurakenteisten rakennusten käyttöönotto

Rakennusten käyttöönotossa on kiinnitettävä huomiota rakenteiden riittävän hitaaseen kuivumiseen. Rakennuksen kuivatuksessa oleellista on sovittaa betonirakenteiden kuivuminen hallitusti puurakenteiden ympäristöön. Rakennuksen käyttöönotossa voidaan erottaa kaksi vaihetta: Lämmitys- ja sisävalmistusvaihe.

1. Lämmitysvaihe

Rakennuksen lämmitys voidaan aloittaa yleensä heti, kun rakennuksen vaippa tulee riittävän tiiviiksi. Tällöin kuivataan usein betonirakenteita. Lämmityksen alkuvaiheessa ilman kosteus on yleensä hyvin korkea. Tällöin puu kostuu, vaikka se olisikin säilynyt aikaisemmat rakennusvaiheet pahemmin kastumatta. Massiivipuorakenteissa kosteaa ympäristöä suurempi ongelma on kuitenkin rakenteiden liian nopea kuivuminen.

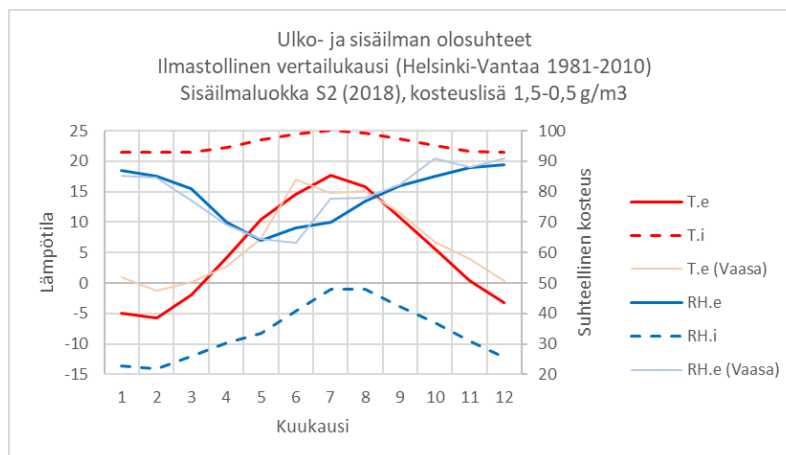
2. Sisävalmistusvaihe

Sisävalmistusvaiheessa suurin osa kosteudesta on saatu pois rakenteista ja vaarana on puurakenteiden liian nopea kuivuminen ja halkeiluvaaran kasvu varsinkin talviaikana kovilla pakkasilla. Tällöin rakennukseen tulee ulkoa korvausilmaa, jonka absoluuttinen kosteus on pieni. Kun ulkoa tullut ilma lämpenee, sen suhteellinen kosteus putoaa ja voi olla pienimmillään suuruusluokkaa 10-20 %. Tästä syystä puurakenteiden kuivaus tulee tehdä hallitusti.

4.4.3 Työmaan olosuhteet

Seuraavissa kuvissa on esitetty ulko- ja sisäilman olosuhteiden vaihteluiden vaikutuksia puurakenteiden kosteuspuitoisuuteen. Olosuhteiden vaihtelusta johtuen massiivisia puurakenteita sisältävien rakennusten kuivattamista suunniteltaessa tulee CLT:n valmistus- ja toimituskosteuden lisäksi ottaa huomioon rakentamisajankohta ja aikataulu. Jotta edellä esitetyt tekijät voidaan huomioida riittävän tarkasti, massiivisia puurakenteita sisältävien rakennusten kuivatus on suunniteltava aina hankekohtaisesti.

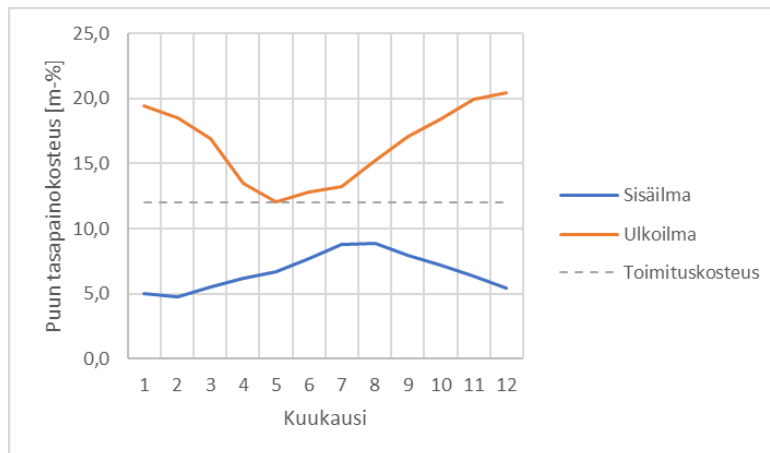
Kuvassa **Error! Reference source not found.** on esitetty ilmastollisen vertailukauden (Helsinki-Vantaa 1981-2010) ulko- ($T.e$, $RH.e$) ja sisäilman ($T.i$, $RH.i$) olosuhteet kuukausikeskiarvoina. Kuvassa on lisäksi esitetty Vaasan lentoasemalta vuonna 2020 mitatut ulkoilman olosuhteiden kuukausikeskiarvot. Sisäilman lämpötilalle on käytetty sisäilmastoluokituksen 2018 mukaista luokkaa S2 ja sisäilman kosteuslisänä 1,5 g/m³, kun $T_e < 5$ °C ja 0,5 g/m³, kun $T_e > 15$ °C (väliarvot interpoloitu).



Kuva 5. Ilmastollisen vertailukauden ulko- ja sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Vaasan lentoaseman ulkoilman olosuhteet.

Kuvasta **Error! Reference source not found.** nähdään, että ilmastollisen vertailukauden ja Vaasan vuoden 2020 ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot vastaavat melko hyvin toisiaan kesän osalta. Talvella 2020 Vaasassa mitatut ulkoilman lämpötilat ovat olleet tilastollista vertailukautta korkeampia.

Kuvassa **Error! Reference source not found.** on esitetty puun tasapainokosteuden vaihtelu ilmastollisen vertailukauden mukaisissa ulko- ja sisäilmaolosuhteissa. Puun tasapainokosteus on laskettu Hailwood-Horrobin kokeellisen hydrataatiomallin mukaan.



Kuva 6. Puun tasapainokosteuden vaihtelu tilastollisen vertailukauden ulko- ja sisäilmassa.

Laskennallisesti puun tasapainokosteus vaihtelee tilastollisen vertailukauden ulkoilmassa välillä 12-20 %. Tilastollisen vertailukauden mukaisessa S2-luokan sisäilmassa puun tasapainokosteus vaihtelee laskennallisesti välillä 4-9 %.

Puurakenteiden kuivaus tulisi tehdä enintään 6 % portaissa. CLT:n toimituskosteus on tyypillisesti 12 ± 3 %. Kuvasta **Error! Reference source not found.** nähdään, että S2-luokan mukainen sisäilma on liian kuivaa puurakenteiden kuivaamiseen lämmityskaudella, mikä tulee ottaa huomioon rakennuksen kosteudenhallintasuunnitelmassa.

4.4.4 Sisäilma ja kosteudenhallinta - yhteenveto

- Rakennushankeen kosteudenhallintaselvityksen laatimisesta vastaa rakennushankkeeseen ryhtyvä. Vastaava työnjohtaja huolehtii työmaan kosteudenhallintasuunnitelman laatimisesta kosteudenhallintaselvitykseen pohjautuen.
- Massiivisia puurakenteita sisältävän rakennuksen kuivatus käyttöolosuhteisiin tulee tehdä hallitusti.
- Rakennuksen kuivatuksessa oleellista on sovittaa betonirakenteiden kuivuminen hallitusti puurakenteiden ympäristöön.
- Puun halkeilu on ilmiönä väistämätön. Halkeilun määrään voidaan kuitenkin vaikuttaa kosteudenhallinnan suunnittelulla.
- Massiivisista puurakenteista koostuvaa rakennusta ei suositella toteutettavan ilman sääsuojasta.
- Lämmityskaudella sisäilman kosteus saattaa laskea liian alhaiseksi CLT:n kuivatuksen kannalta, mikä tulee ottaa huomioon kosteudenhallintasuunnitelmassa.

4.4.5 Sisäilma ja kosteudenhallinta - lähteet

Puurakenteiden halkeilun hallinta - opas, 2006, VTT

RIL 244-2007 - Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta, 2007, RIL ry

RIL 107-2012 - Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet, 2012, RIL ry

Puun kosteuskäyttäytyminen, 2011, Puuinfo

CLT Handbook (U.S. Edition), 2013, FPInnovations

Massiivipuurakenteet työmaaolosuhteissa, 2018, Puulehti 3/18, Puuinfo

SFS 5978 - Puurakenteiden toteuttaminen, rakennuksien kantavia rakennusosia koskevat säännöt, 2014, Suomen standardisoimisliitto SFS

TOPTEN-ohjekortti 117c01 Kosteudenhallintaselvitys, Merkitys ja sisältö.

Rakennusvalvonta. Yhtenäiset käytännöt. Saatavilla:

<http://www.pksrava.fi/doc/tulkintakortit/>

Insinööripuutuotteet, monikerroslevy (CLT), 2020, Puuinfo. Saatavilla:

<https://puuinfo.fi/puutieto/insinoorituotteet/monikerroslevy-clt/>

5 Elinkaarikustannuslaskenta

5.1 Lähtötiedot ja laskelman laadintaperiaatteet

Kohde koostuu kahdesta erillisestä kaksi kerroksisesta rakennuksesta, joiden yhteispinta-ala on 9000 m². Tontin pinta-alaksi on laskelmassa arvioitu 16 600 m².

Elinkaarikustannus on arvioitu kolmella runkoratkaisulla:

- **Betonirunko**
- **CLT-runko**
- **CLT-runko lämmöneristeellä**

Laskentamenetelmänä on käytetty nykyarvomenetelmää ja elinkaarikustannukset on esitetty 20 vuoden tarkastelujaksolle alkaen rakentamisen aloituksesta.

Elinkaarikustannuslaskelman kustannuksien ennusteet, korkotaso, kustannuksien nousun arviointi sekä ylläpitokustannuksissa käytetyt energian ja veden hinnat ovat arvioita, jotka perustuvat mm. rakennuksista kerättyihin keskimääräisiin toteumatietoihin ja paikkakunta-kohtaisiin energian ja veden hintoihin.

Laadinnassa arvioidut korot ja hintojen nousu:

- Diskonttauskorko 3%
- Vuosittaiset käyttö-, kunnossapito- ja ylläpitokustannukset on huomioitu reaalihinnoilla
- Sähkön hinnan nousua vuosittain ei ole otettu huomioon
- Energian hinnan nousua vuosittain ei ole otettu huomioon

Laskenta perustuu Green Building Council Finlandin (GBCF) elinkaarikustannusmittarin laskentaohjeeseen. Mittarin taustalla on eurooppalaisen CEN / TC 350 - Sustainability of Construction Works -perheen elinkaarikustannusten puitestandardi EN 15643-4. GBCF-laskentaohjetta on sovellettu seuraavin osin: energian hinnan nousua vuosittain ei ole otettu huomioon.

5.2 Osakustannusten kuvaus

5.2.1 Investointikustannus

Investointikustannus on laadittu Haahtelan tavoitehinta-arvio menetelmällä. Alla on esitetty investointikustannukset kolmelle eri runkoratkaisulle.

Laskelmassa käytetyt investointikustannukset:

- **Betonirunko:** 22 699 000 € (alv 0%)
- **CLT-runko:** 23 099 000 € (alv 0%)
- **CLT-runko lämmöneristeellä:** 22 899 000 € (alv 0%)

Rungon osuus (runko ja vesikattorakenteet) kokonaisinvestointikustannuksista betonirungolla on noin 15 % ja CLT-rungolla on noin 17%.

Investointikustannukset kolmella eri runkoratkaisulla eroavat vain runkorakenteiden osalta toisistaan, eroavaisuudet ovat seuraavat:

- **Betonirunko:** ulkoseinä ks. rakennetyyppi US3, välipohja betoni (pintamateriaali + tasoite 10mm + pintavalu 80mm + ontelolaatta O32), kantavat väliseinät betoni
- **CLT-runko:** ulkoseinä ks. rakennetyyppi US1, välipohja ks. rakennetyyppi VP1, kantavat väliseinät CLT
- **CLT-runko lämmöneristeellä:** ulkoseinä ks. rakennetyyppi US2, välipohja ks. rakennetyyppi VP1, kantavat väliseinät CLT

5.2.2 Ylläpito- ja käyttökustannukset

Ylläpito- ja käyttökustannukset on arvioitu (tavoitehinta-arvio) Kustannustieto Taku 2020 -ohjelmistolla normaaliin vastaavan rakennuksen käytön tasoon perustuen olemassa olevista rakennuksista kerättyihin keskimääräisiin toteumatietoihin. Energian kulutus on arvioitu karkean E-lukulaskelman pohjalta. Ylläpidon vuosittaisissa kustannuksissa ei ole huomioitu hintojen nousua.

Ylläpito- ja käyttökustannukset sisältävät seuraavat:

- Hallinto
- Hoito ja huolto (rakennus ja ulkoalueet, jätehuolto)
- Siivous
- Energia ja vesi
- Vuosikorjaukset (0,4% investointikustannuksesta / vuosi, laskennassa käytettävä investointikustannus ei sisällä hankevarauksia)
- Vakuutukset

Ylläpito- ja käyttökustannukset arvion mukaan:

- **Betonirunko:** 550 219 € / vuosi (alv 0%)
- **CLT-runko:** 555 502 € / vuosi (alv 0%)
- **CLT-runko lämmöneristeellä:** 551 143 € / vuosi (alv 0%)

Ylläpito- ja käyttökustannukset kolmella eri runkoratkaisulla eroavat energiakustannusten osalta toisistaan, CLT-rungon laskennallinen energiankulutus on suurin johtuen ulkoseinän lämmönläpäisykertoimesta eli u-arvosta. Lisäksi vaihtoehdot eroavat toisistaan investointikustannuksesta laskettavan vuosikorjauskustannuksen osalta.

Ulkoseinien lämmönläpäisykertoimet eli u-arvot rakennetyyppien mukaan:

- **Betonirunko:** ulkoseinän u-arvo on 0,17 W/m²K
- **CLT-runko:** ulkoseinän u-arvo on 0,39 W/m²K
- **CLT-runko lämmöneristeellä:** ulkoseinän u-arvo on 0,16 W/m²K

5.2.3 Kiinteistön kunnossapitosuunnitelma (PTS)

PTS -korjausten kustannukset on arvioitu karkealla tasolla perustuen tavanomaisiin korjaustoimenpiteisiin 20 vuoden ajanjaksolla. PTS -korjauskustannusteen

lähtökohta on säilyttää kiinteistön tekninen toimintakunto tarkastelujakson ajan. PTS -korjauskustannukset sisältävät rakenne-, LVIA- ja sähkötekniset järjestelmät.

PTS -korjauskustannuksia määritettäessä on käytetty apuna ohjekorttia KH90-00403 ja Haahtelan kustannustieto 2020 -julkaisun tietoja. Esitetyt PTS-korjauskustannukset on laskettu 20 vuoden syklillä siten, että korjaustoimenpiteet toteutetaan laskelman aloitusajankohdasta 10, 15 ja 20 vuoden kohdalla.

Merkittävimmät PTS-korjauskustannuserät:

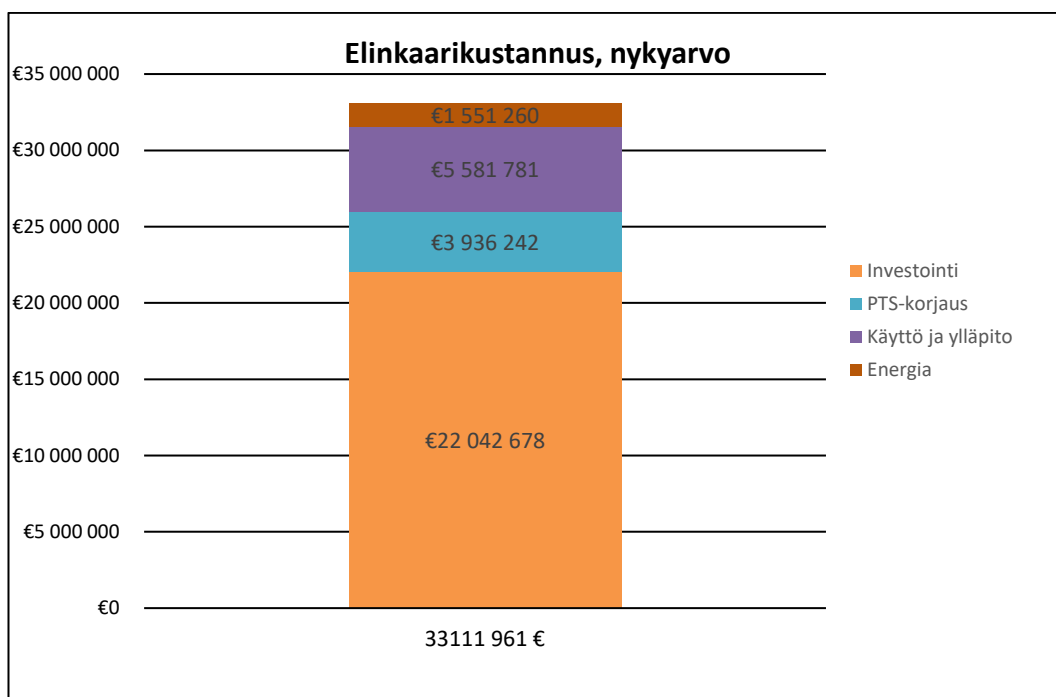
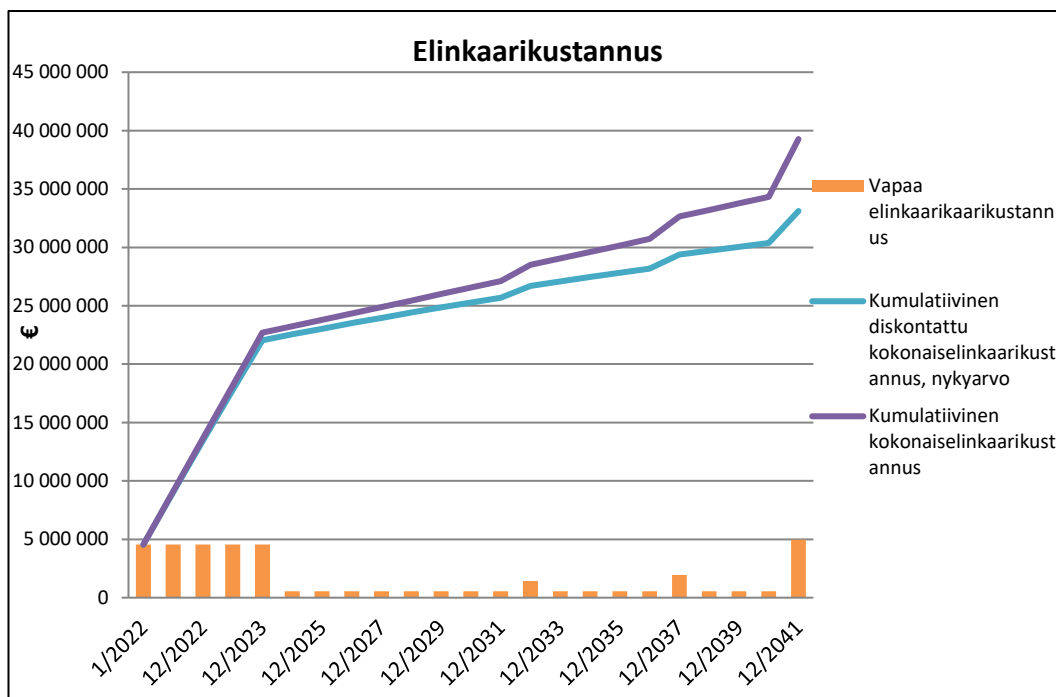
- 10-vuotiskorjaus, kokonaiskustannustaso ~90 €/brm²
 - IT-, hälytys ja valvontajärjestelmät, suihkut ja hanat (termostaattisekoittimet), ovien heloitus, valaisimet, pihan leikkivarusteet, talovarusteet
- 15-vuotiskorjaus, kokonaiskustannustaso ~145 €/brm²
 - keittölaitteet, termostaattiventtiilit, märkätilojen pinnat ja kalusteet, pienet julkisivukorjaukset (mm. elementtien saumat tai huoltomaalaus), pihan pintarakenteet
- 20-vuotiskorjaus, kokonaiskustannustaso ~460 €/brm²
 - seinäpintojen maalaus ja saumaus, lattiapintojen uusiminen, ilmanvaihtopuhaltimet, jäähdytys- ja kylmätekniikka, lämmönsiirtimet, suihkut ja hanat (termostaattisekoittimet), valaisimet, pihan puurakenteet (aidat, pihatason), metalliulko-ovet

5.3 Kokonaiselinkaarikustannus

5.3.1 Betonirunko

Tarkastelujakson pituus:	20 vuotta
Rakennuksen bruttoala:	9599 brm ²
Diskonttaus korko: (GBCF-laskentaohje)	3 %

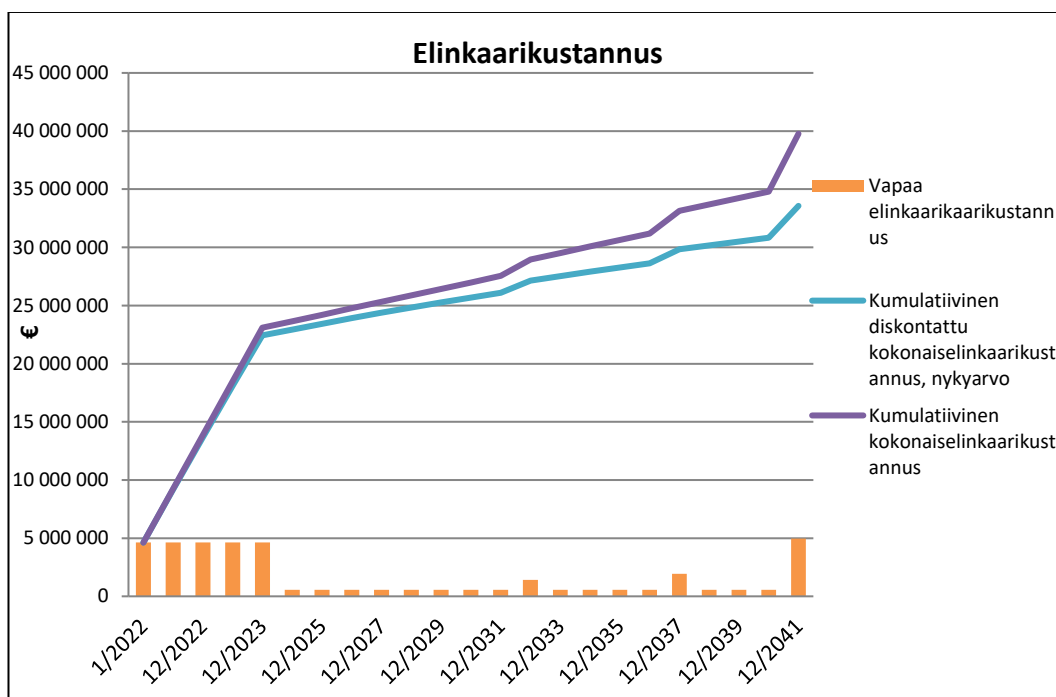
Kustannuserittely	Nykyarvo / tarkastelujakso	Nykyarvo
	€/ vuosi	€
Investointi	1 102 134	22 042 678
PTS-korjaus	196 812	3 936 242
Käyttö ja ylläpito	279 089	5 581 781
Energia	77 563	1 551 260
yhteensä	1 655 598	33 111 961

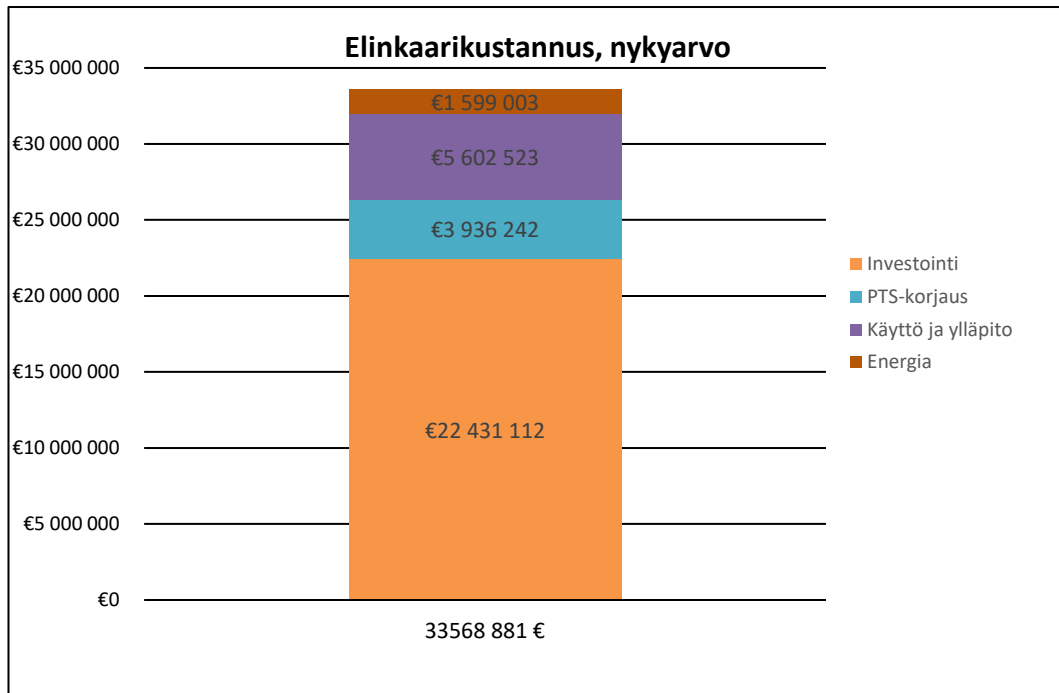


5.3.2 CLT-runko

Tarkastelujakson pituus:	20 vuotta
Rakennuksen bruttoala:	9599 brm ²
Diskonttaus korko: (GBCF-laskentaohje)	3 %

Kustannuserittely	Nykyarvo / tarkastelujakso	Nykyarvo
	€ / vuosi	€
Investointi	1 121 556	22 431 112
PTS-korjaus	196 812	3 936 242
Käyttö ja ylläpito	280 126	5 602 523
Energia	79 950	1 599 003
yhteensä	1 678 444	33 568 881

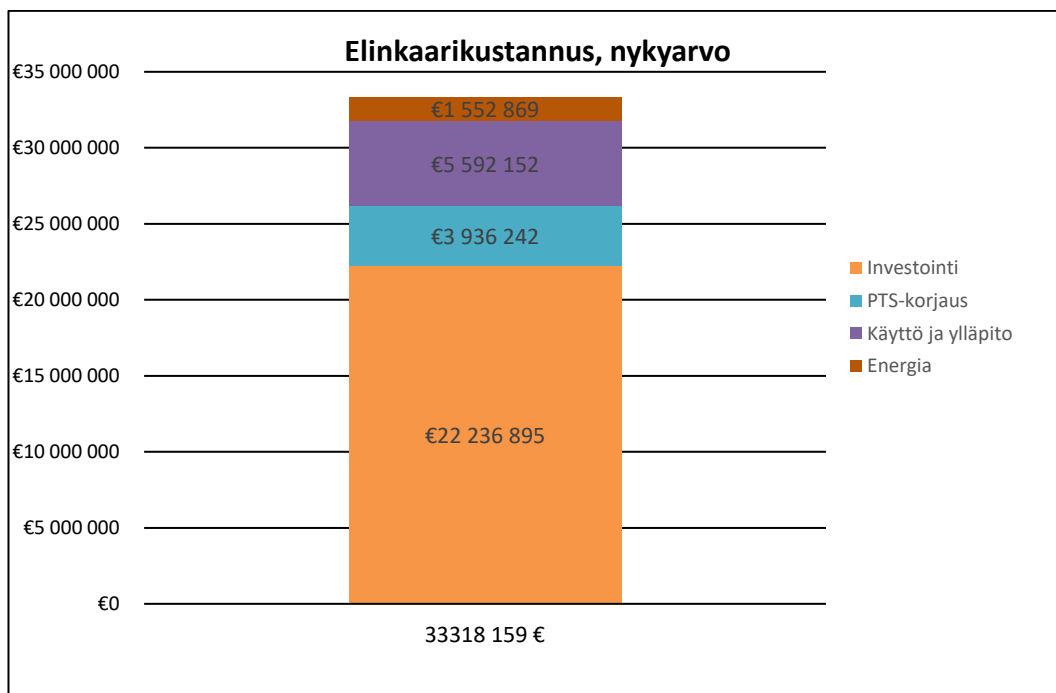
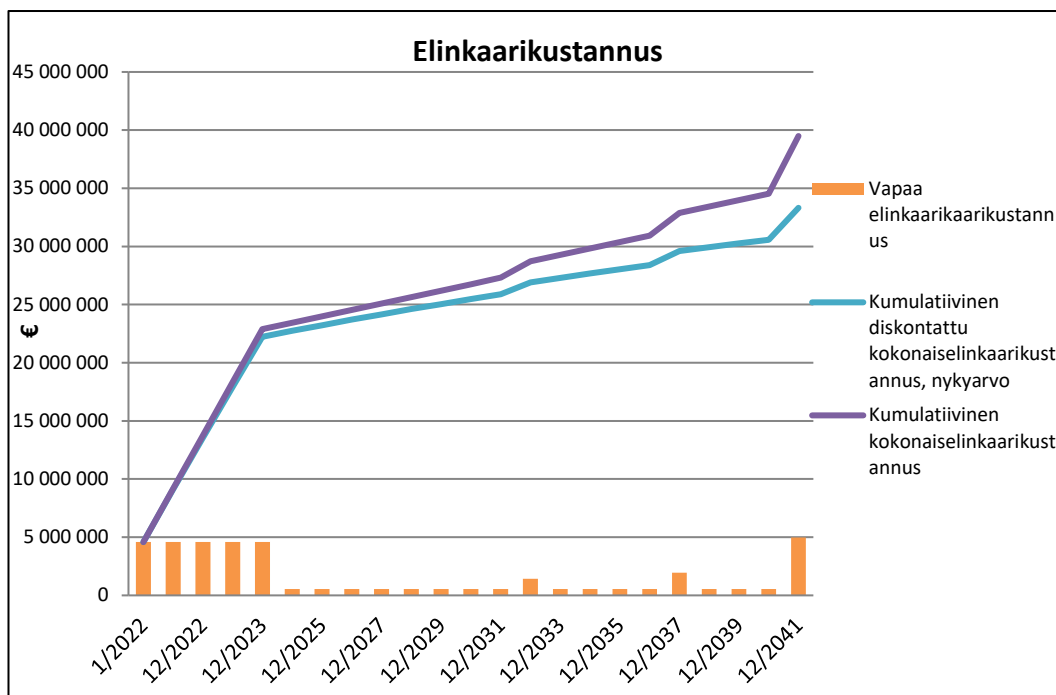




5.3.3 CLT-runko lämmöneristeellä

Tarkastelujakson pituus:	20 vuotta
Rakennuksen bruttoala:	9599 brm ²
Diskonttaus korko: (GBCF-laskentaohje)	3 %

Kustannuserittely	Nykyarvo / tarkastelujakso	Nykyarvo
	€ / vuosi	€
Investointi	1 111 845	22 236 895
PTS-korjaus	196 812	3 936 242
Käyttö ja ylläpito	279 608	5 592 152
Energia	77 643	1 552 869
yhteensä	1 665 908	33 318 159



5.4 Yhteenveto

Eri runkovaihtoehtojen välille kokonaislinkaarikustannuksen erot syntyvät pääosin investointikustannuksesta ja laskennallisen energiankulutuksen kustannuksesta.

Kokonaislinkaarikustannus (nykyarvo) eri runkovaihtoehdoilla:

- **Betonirunko:** 33 111 961 € (alv 0%)
- **CLT-runko:** 33 568 881 € (alv 0%)
- **CLT-runko lämmöneristeellä:** 33 318 159 € (alv 0%)

Betonirungon kokonaislinkaarikustannus on pienin, CLT-rungon suurin, erotus on 456 920 € (alv 0%).

Kokonaislinkaarikustannuksiin voidaan vaikuttaa rungon valinnan lisäksi mm. seuraavilla:

- Investointikustannukset:
 - Rakennuksen muoto, arkkitehtuuri
 - Varustelutaso, pintamateriaalit
- Käyttö- ja ylläpitokustannukset
 - talotekniset järjestelmät
 - lämmitysmuoto

Laskelmat on laadittu tilaajalta saatuihin tietoihin ja hankesuunnitelmaan (3.11.2020) perustuen. Laskelmat on laadittu kohteen suunnitteluvaiheessa ilman tietoa lopullisista teknisistä ratkaisuista. Tämän vuoksi tietoja tulee pitää suuntaa antavina ja niitä on syytä tarkentaa suunnittelun edetessä ja kiinteistön kunnossapitosuunnitelman (PTS) laatimisen yhteydessä.

6 Hiilijalanjälkilaskenta

Kohteelle laadittiin hiilijalanjälkilaskenta Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmän 2019 mukaisesti. Rakennuksen vähähiilisuuden arvioinnilla pyritään pienentämään rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä huolellisen ennakkosuunnittelun avulla. Tarkastelujakso laskennassa on 50 vuotta sisältäen koko rakennuksen elinkaaren. Rakennuksen energiankulutuksen hiilijalanjälki huomioidaan kohteelle lasketun E-luvun kautta.

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan ihmisen toiminnan aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Hiilijalanjäljen laskenta sisältää rakennuksen materiaalit (tontti, rakennus ja talotekniikka), kuljetukset työmaalle ja työmaatoiminnot, käytön ja korjaukset sekä purun ja kierrätyksen. Tuloksissa esitetään myös lasketut hiilikädenjäljet.

Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan sellaisia ilmastohyötyjä, joita rakennuksen elinkaaren aikana voidaan saavuttaa ja joita ei syntyisi ilman rakennushanketta. Hiilijalanjäljen – sekä -kädenjäljen yksikkönä on hiilidioksidiekvivalentti (CO₂e), mikä huomioi hiilidioksidipäästöjen lisäksi myös muut merkittävät kasvihuonekaasupäästöt, keskeisimpinä metaanin (CH₄) ja ilokaasun eli dityppioksidin (N₂O).

Nykyään hiilijalanjäljen laskeminen rakennushankkeelle on vapaaehtoista, mutta rakennusmääräyksiin on tulossa 2020-luvulla raja-arvot, jotka rakennushankkeissa tulee alittaa.

6.1 Laskennan lähtötiedot ja laskentaohjelmisto

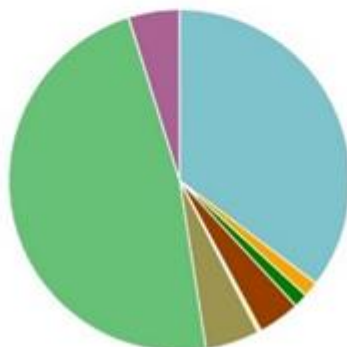
Kohde koostuu kahdesta erillisestä kaksi kerroksisesta rakennuksesta, joiden yhteispinta-ala on 9000 m². Ikkunapinta-alaksi arvioitiin 30 % rakennuksien ulkoseinästä. Kohteen hiilijalanjäljen laskeminen suoritettiin One Click LCA -ohjelmistolla käyttäen ohjelmiston oletusarvoja sekä –pinta-aloja rakenteille ja rakenneosille. Hiilijalanjälkeä sekä -kädenjälkeä arvioitiin kolmella runkoratkaisulla rakennesuunnitelmien mukaisesti: betonirunko, CLT-runko ja CLT-runko lämmöneristeellä. Käytetyn energian hiilijalanjäljen arviointia varten kohteelle laskettiin karkea E-luku.

6.2 Laskennan tulokset

Alla olevassa taulukossa on esitettyä jokaiselle runkoratkaisulle laskettu hiilijalanjälki sekä hiilikädenjälki. Kuvissa 1-6 on esitettyä tarkemmin kunkin runkoratkaisun tuloksia jaoteltuna elinkaaren eri vaiheisiin. Noin puolet elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä syntyy käytön aikana rakennuksen energian kulutuksesta. Energian kulutuksen päästöjen määrä pysyy samana betoni – ja CLT-runkoisissa vaihtoehdoissa. Myös muut kuin valmistuksen elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt eivät muutu eri runkoratkaisuissa. Valmistusvaiheen hiilidioksidipäästöissä näkyy betonin suurempi hiilijalanjälki verrattuna CLT:hen. Tulokset eroavat merkittävästi hiilikädenjäljen osalta betoni – ja CLT-rakenteiden välillä. Hiilijalanjäljen osalta erot CLT-rakenteiden ja betonirakenteen välillä ovat 10 %:n luokkaa.

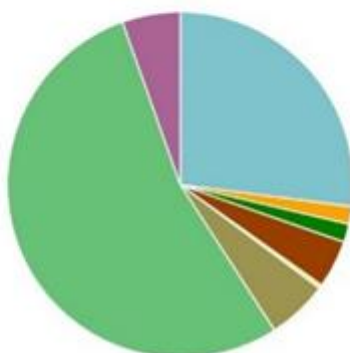
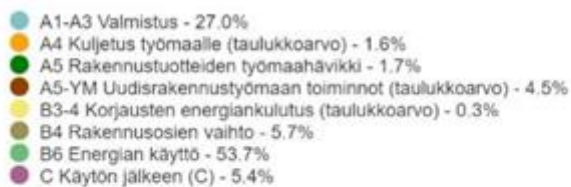
Runkoratkaisu	Hiilijalanjälki	Hiilikädenjälki
	kg CO ₂ e / m ² / vuosi	kg CO ₂ e / m ² / vuosi
Betoni	13.92	-3
CLT	12.37	-11.76
CLT lämmöneristeellä	12.40	-10.74

Ilmaston lämpeneminen kg CO₂e/m²/a - Elinkaaren vaiheet



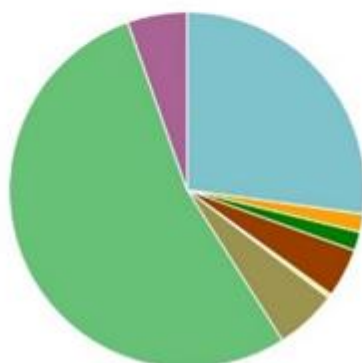
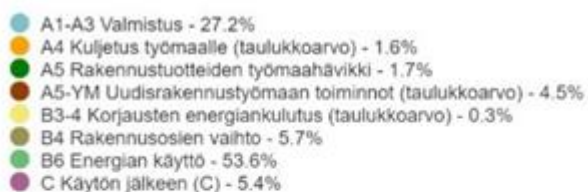
Kuva 1: Hiilijalanjälkilaskennan tulokset elinkaarivaiheittain betonirunko -laskentatapaukselle.

Ilmaston lämpeneminen kg CO₂e/m²/a - Elinkaaren vaiheet



Kuva 2: Hiilijalanjälkilaskennan tulokset elinkaarivaiheittain CLT-runko -laskentatapaukselle.

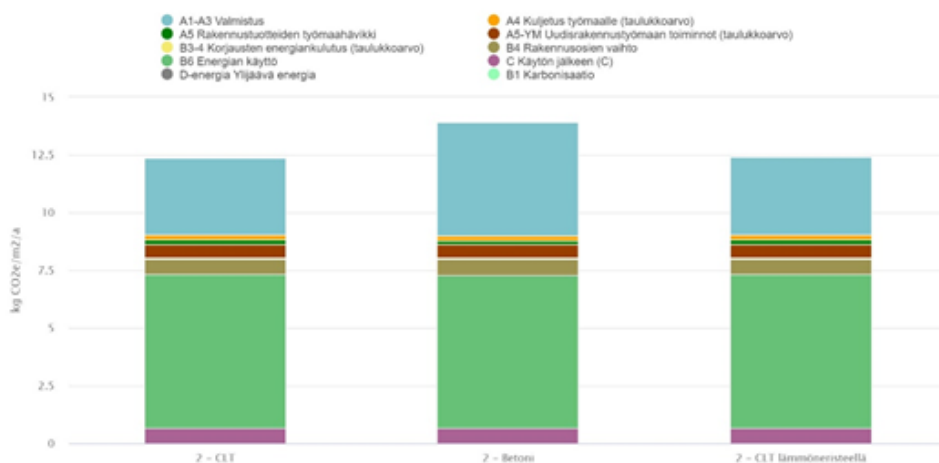
Ilmaston lämpeneminen kg CO₂e/m²/a - Elinkaaren vaiheet



Kuva 3: Hiilijalanjälkilaskennan tulokset elinkaarivaiheittain CLT-runko lämmöneristeellä -laskentatapaukselle.



Kuva 4: Eri runkovaihtoehtojen hiilijalanjälkilaskennan tulokset.



Kuva 5: Eri runkovaihtoehtojen hiilijalanjälkilaskennan tulokset eriteltynä elinkaaren vaiheisiin.

