



Kantavien puurakenteiden palokäyttäytyminen ja -mitoitus

Paloseminaari, Kalastajatorppa, Helsinki 3.2.2026

Mikko Malaska, professori

Metalli- ja kevytrakenteiden tutkimusryhmä
Rakennetun ympäristön tiedekunta, Tampereen yliopisto

Esityksen sisältö

- 1 Palomääräykset
- 2 Puun ja CLT:n hiiltyminen palossa
- 3 Eurokoodin mitoitusohjeet
- 4 Tampereen yliopiston tutkimus
- 5 Johtopäätökset

Kantavien puurakenteiden palomitoitus

Rakenteen tulee kestää palo- ja jäähtymisvaiheet

- Silloin, kun henkilöturvallisuuden takia tai vahinkojen suuruuteen nähden on tarpeellista, rakennuksen on riittävän luotettavasti kestävä sortumatta koko palokuorman palaminen ja jäähtyminen
- Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus
 - ❖ Yli 2-kerroksinen rakennus
 - ❖ Tietyissä tapauksissa 2-kerroksinen rakennus

Taulukko 4. Mitoituksen perusteet, kun olennaisten kantavien rakenteiden mitoitus perustuu oletettuun palonkehitykseen

Rakennus	Rajoitukset	Olellaisten kantavien rakenteiden kestävyys palossa	Mitoituspalokuorman tiheys MJ/m ²
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{R,k}^{1) 2)}$
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{R,k}^{1) 2)}$
1-kerroksinen, - majoitustila - hoitolaitos - kokoontumis- ja liiketila	Yli 50 paikkaa Yli 25 paikkaa Yli 250 henkilöä	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{R,k}^{1) 2)}$
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{R,k}$, vähintään 600 MJ/m ² 2)
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{R,k}$, vähintään 600 MJ/m ² 2)
2-kerroksinen, - majoitustila - hoitolaitos - kokoontumis- ja liiketila	Yli 50 paikkaa Yli 25 paikkaa Yli 250 henkilöä	Palo- ja jäähtymisvaihe	$Q_{R,k}$, vähintään 600 MJ/m ² 2)
Yli 2-kerroksinen	Korkeus enintään 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$Q_{R,k}$, vähintään 600 MJ/m ² 2)
Yli 2-kerroksinen	Korkeus yli 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$2,0 \cdot Q_{R,k}$, vähintään 900 MJ/m ²

Tarkastelu tehdään täysin kehittyneelle palolle. Jos voidaan osoittaa, että lieskahtamista ei tapahdu, mitoitus voidaan tehdä paikalliselle palolle. Lieskahtamisen katsotaan tapahtuneen, kun kuumen savukerroksen keskilämpötila saavuttaa 500 celsiusastetta tai kun säteily savukerroksesta lattiaan on yli 20 kilowattia neliömetrille.
Kellarikerrokset mitoitetaan palo- ja jäähtymisvaiheen rasituksille.
1) Ylin kellarikerros, vähintään 600 MJ/m².
2) Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset, $2,0 \cdot Q_{R,k}$, vähintään 900 MJ/m².

Lähde: YMa 927/2020

Mitoituspalot

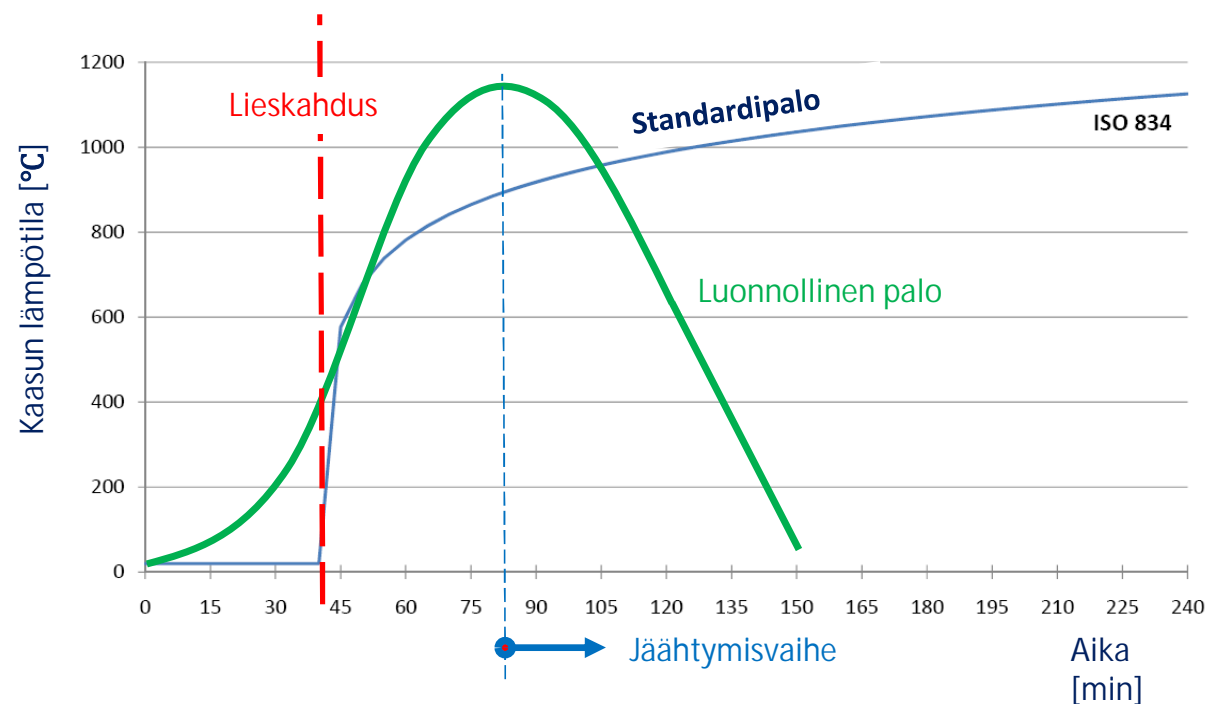
Rakenteet tulee suunnitella ja rakentaa siten, että ne säilyttävät kantavuutensa kyseeseen tulevan paloaltistuksen ajan.

Standardipalo (ISO 834)

- Luokitukseen perustuvassa mitoituksessa sovellettu mitoituspalo (R-vaatimus)
- Tarkastelut tehdään määritellylle ajalle ottamatta huomioon jäähtymisvaihetta

Luonnollisen palon mallit

- Tarkastelut voidaan tehdä koko palon kestoajalle mukaan lukien jäähtymisvaihe
- Ottavat huomioon palotilan ominaisuudet
- Parametriset palomallit, vyöhykemallit, virtausdynamiikkaa soveltavat mallit



Puun hiiltyminen palossa

- Mitoituksessa sovelletaan ns. **tehollista poikkileikkausta**, joka saadaan vähentämällä alkuperäisestä poikkileikkauksesta **tehollisen hiiltemissyvyyden** verran kaikilta niiltä sivuilta, jotka ovat palolle alttiina.
- Tehollinen hiiltemissivvyys muodostuu kahdesta vyöhykkeestä:
 - ❖ Hiiltynyt puukerros
 - ❖ Lämpötilan vaikutuksesta lujuudeltaan heikentynyt puukerros

$$d_{ef (STAND)} =$$

$$d_{char,n}$$

+

$$d_{ef (PARAM)} =$$

$$0,5 \beta_{par} (t_{end} + t_{max})$$

+

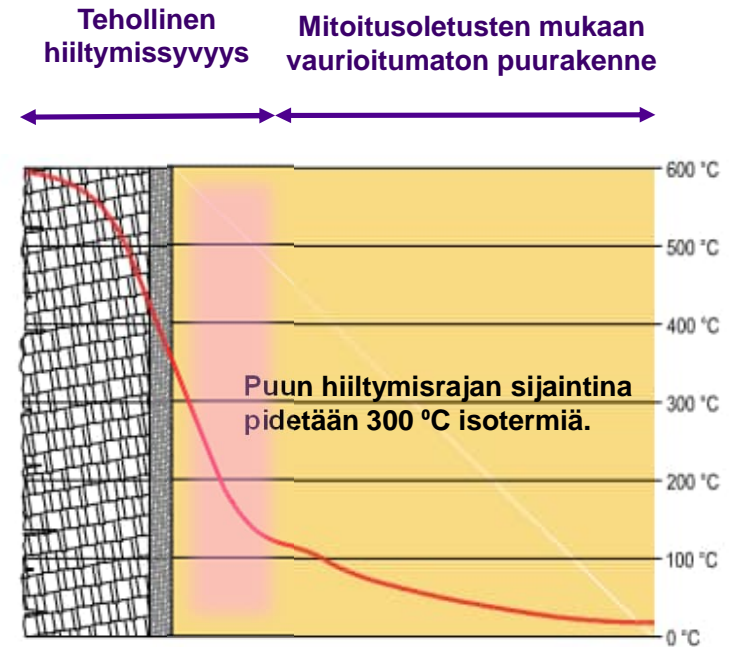
$$d_0$$

$$k_{ef} + \frac{\Gamma}{50} - \frac{\Gamma^2}{20}$$

Hiiltemissyvyyden
mitoitusarvo

Lujuuden ja jäykkyyden menettäneen kerroksen paksuus

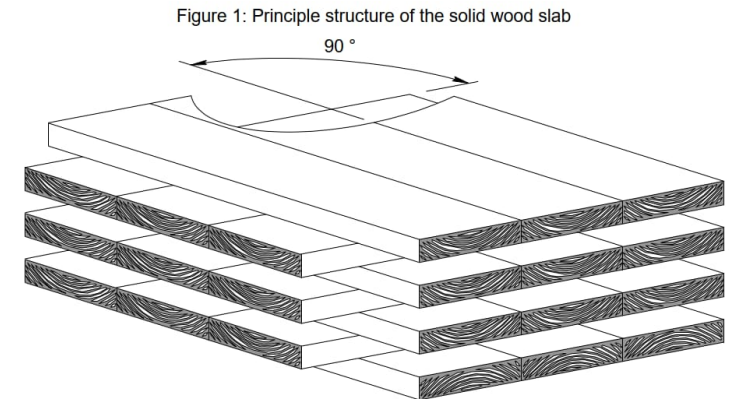
- Puu alkaa menettää lujuuttaan ja jäykkyyttään paljon ennen hiiltemistään, jo 50 °C lämpötilassa



Kuva muokattu lähteestä: Puumfo 2021, Paloturvallinen puutalo – Asuin- ja toimitilarakentaminen

CLT - ristiinliimattu massiivipuulevy

- Käytetään mm. kerrostalo- ja koulurakentamisessa
- Cross Laminated Timber (CLT) koostuu ristiinliimatuista lautakerroksista (lamellikerroksista)
- Kerroksia on useita, tavallisimmin kolme, viisi tai seitsemän
- Lamellikerrokset liimataan toisiinsa:
 - ❖ Polyuretaaniliimat (**PUR**), erittäin alhaiset päästöt, nopea puristusaika, kovettuu huoneenlämpötilassa, yleisesti käytetty
 - ❖ Formaldehydipohjaiset liimat (**MUF, PRF**) – erittäin korkea lämmönkestävyys, kovettuu korkeassa lämpötilassa, formaldehydin aiheuttamat terveysriskit

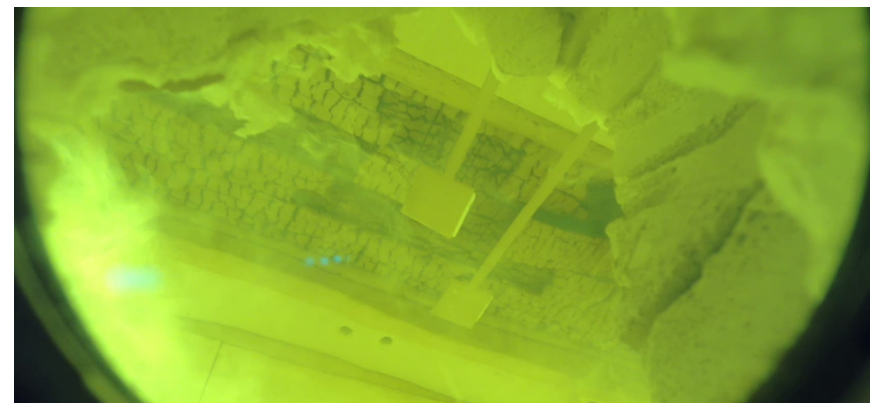
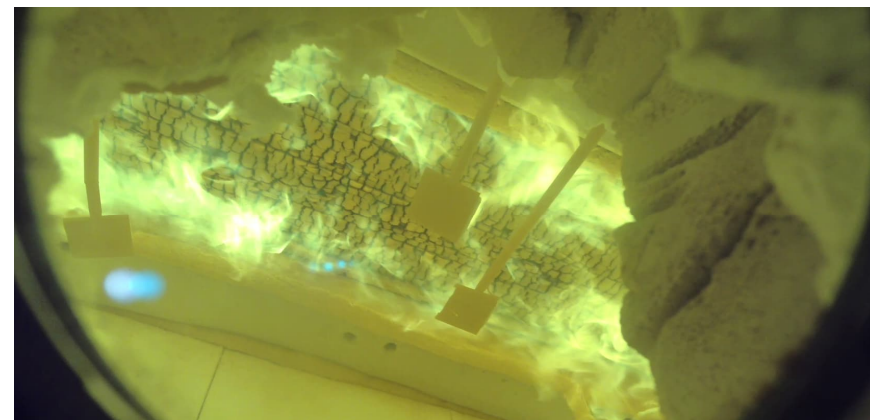


Kuvan lähde:

EAD 130005-00-0304, Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings

CLT:n hiiltyminen palossa

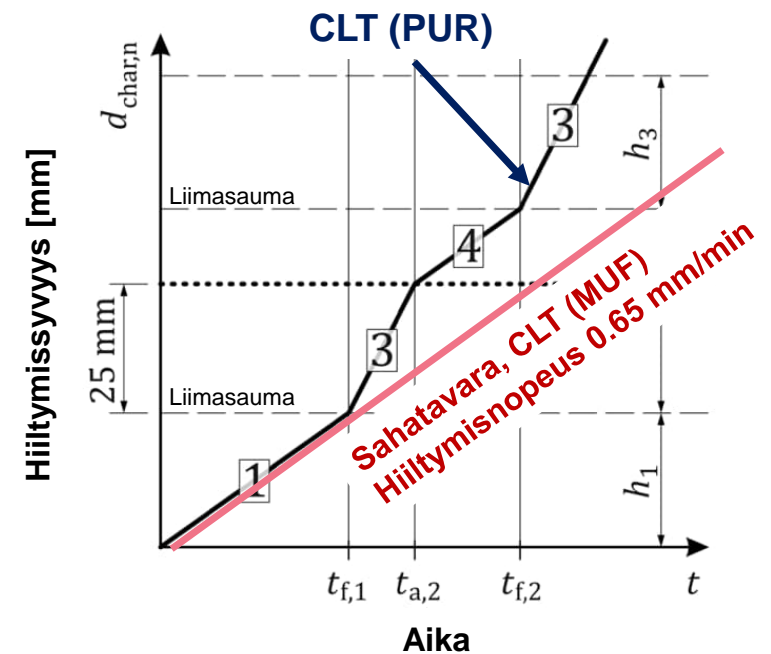
- CLT-paneelien valmistuksessa käytetty liima voi pehmetä lämpötilan vaikutuksesta jo ennen kuin puu alkaa hiiltymään. Tämä voi johtaa edelleen puurakennetta suojaavan hiilikerroksen putoamiseen.
- Putoavan kerroksen takana olevan puun lämpötila on huonelämpötilaa selvästi korkeampi, mistä johtuen hiiltyminen alkaa tässä lamellikerroksessa suuremmalla nopeudella kuin paneelin ensimmäisessä lamellikerroksessa.
- Liimasaumojen luokitus Eurokoodissa EN 1995-1-2:2025
 - ❖ Bond line integrity maintained (lamellit eivät irtoa)
 - ❖ Bond line integrity not maintained (lamellit irtoavat)



Mitoitusohjeet (Eurokoodi)

1) Luokkiin ja lukuarvoihin perustuva mitoitus

- EN 1995-1-2:2004 esittää ohjeet koko palon ajan suojaamattomien ja alkuaan suojattujen puurakenteiden palomitoitukseen - Menetelmä kattaa sahatavaran ja liimapuun
- EN 1995-1-2:2025 (toisen sukupolven eurokoodi, joka on julkaistu, mutta ei vielä voimassa)
 - ❖ Ohjeet kattavat aikaisempaa laajemmän valikoiman puutuotteita, mukaan lukien CLT
 - ❖ CLT-rakenteiden ohjeet kattavat molemmat tapaukset:
 - ❖ Bond line integrity maintained
 - ❖ Bond line integrity not maintained.



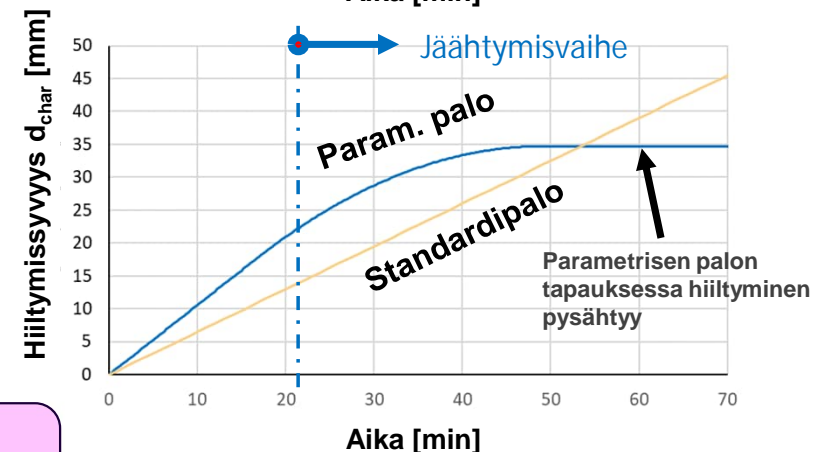
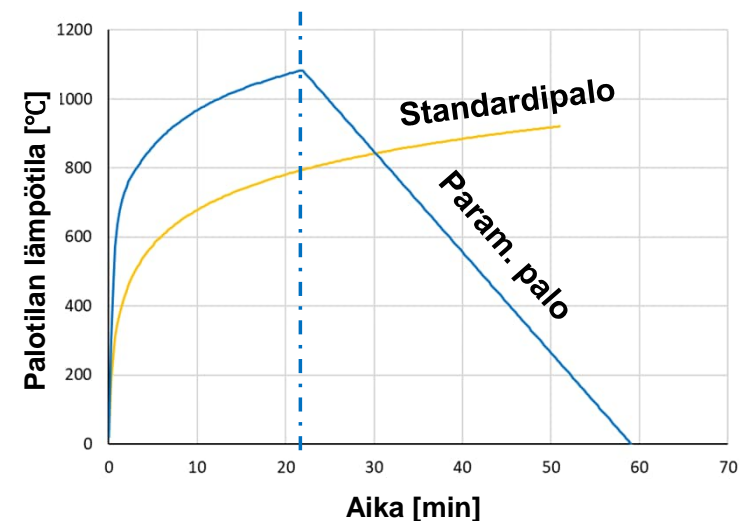
Kuvaa muokattu lähteestä: SFS-EN 1995-1-2:2025

Mitoitusohjeet (Eurokoodi)

2) Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus

- EN 1991-1-2 esittää ohjeet parametrisille lämpötila-käyrille, jotka sisältävät kuumenemis- ja jäähtymisvaiheet
- EN 1995-1-2:2004 esittää analyyttisen menetelmän, .
suojaamattoman havupuun hiiltymisnopeuden ja -syvyyden määrittämiseksi parametrisessä paloaltistuksessa
- EN 1995-1-2:2025
 - ❖ Malli ottaa huomioon suojaamattomasta kantavasta puurakenteesta syntyvän palokuorman
 - ❖ CLT-rakenteiden osalta ohjeet kattavat tapauksen:
 - ❖ Bond line integrity maintained

❖ Standardi ei anna ohjeita tapaukselle "Bond line integrity not maintained" vaikka monet CLT-tuotteet kuuluvat tähän ryhmään!



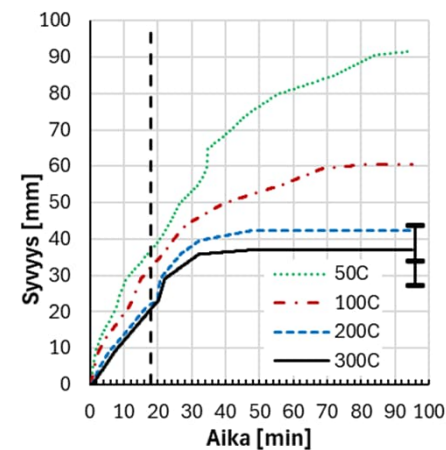
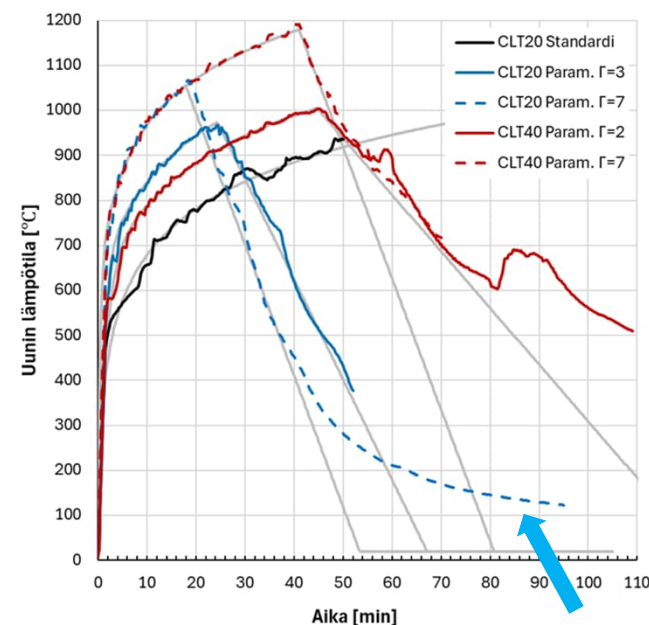
”Kantavien puurakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuva palomitoitus”

- Tampereen Yliopiston tutkimushanke 1.9.2024 – 31.10.2025
 - Rahoitus: Palosuojelurahasto
- 1) Selvitys palomääräysten vaatimuksista ja ohjeista: Suomi, Ruotsi, Iso-Britannia, Yhdysvallat, Kanada
 - 2) Polttokokeet, joilla tuotettiin puuttuvaa tietoa CLT-rakenteiden palokäyttäytymisestä jäähtymisvaiheessa (PUR, bond line integrity not maintained)
 - 3) Selvitys siitä, miten Eurokoodin mukaiset parametriset lämpötila-aikakäyrät kuvaavat kirjallisuudessa esitettyjen huonepalokokeiden tuloksia

CLT:n hiiltymisen polttokokeissa

- Lämpöaalto jatkaa etenemistään syvemmälle puurakenteeseen jäähtymisen aikana.
- Lämpötilat puurakenteen sisällä jatkavat nousuaan pitkään sen jälkeen, kun palo on sammunut.
- Hiiltymisen eteneminen pysähtyy jäähtymisvaiheessa.
- Puun lämpötila hiiltymisrajan takana jatkaa nousuaan ja puurakenne menettää lujuutta myös sen jälkeen, kun hiiltymisen eteneminen on pysähtynyt.

- Miten pitkälle hiiltymisen etenee eri mitoituspaloissa?
- Miten syväälle lämpöaalto ja lujuudeltaan heikentynyt vyöhyke etenevät eri mitoituspaloissa?
- Sortuuko rakenne jäähtymisvaiheessa?



Alla olevat tulokset ovat kokeesta, jossa CLT:n lamellipaksuus oli 20 mm ja $\Gamma=7$.

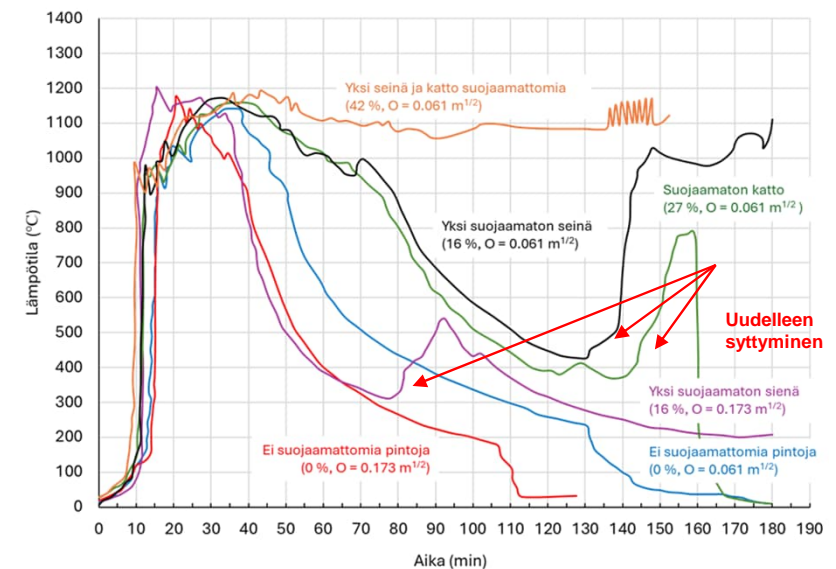
Lujuudeltaan heikentynyt vyöhyke

Hiiltymissyvyys

Havaintoja huonepalokokeista

- Suojaamattoman puun määrällä ei ole merkittävää vaikutusta palotilan maksimilämpötilaan
- Suojaamattoman puupinnan syttyminen uudelleen palon hiipumis- ja jäähtymisvaiheessa nosti palotilan lämpötilaa merkittävästi
- Jäähtyvän palon uudelleen syttymistä on havaittu myös sellaisissa tapauksissa, joissa vain yksi seinä (16 % vaipan alasta) tai ainoastaan katto (27 %) on ollut suojaamatonta puupintaa.
- Uudelleen syttymistä ei ole tapahtunut kokeissa, joissa CLT-rakenteen valmistuksessa oli käytetty lämmönkestävää liimaa.
- Uudelleen syttymisestä ei ole havaintoja sellaisissa kokeissa, joissa kaikki puupinnat ovat olleet palosuojattuja.

- Miten estetään puupinnan uudelleen syttyminen?
- Pitäisikö suojaamattoman pinnan määrälle asettaa raja-arvoja? Muiden maiden määräyksissä määrä on rajoitettu ja suojaamattoman pinnan sijainnille on asetettu rajoituksia.

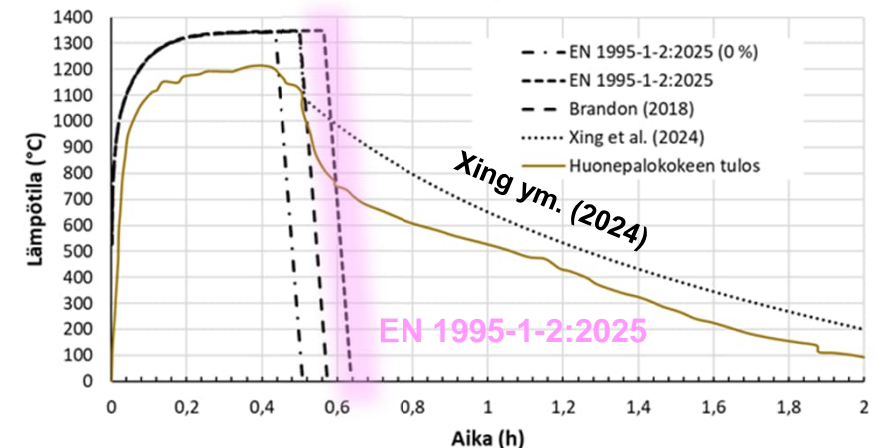
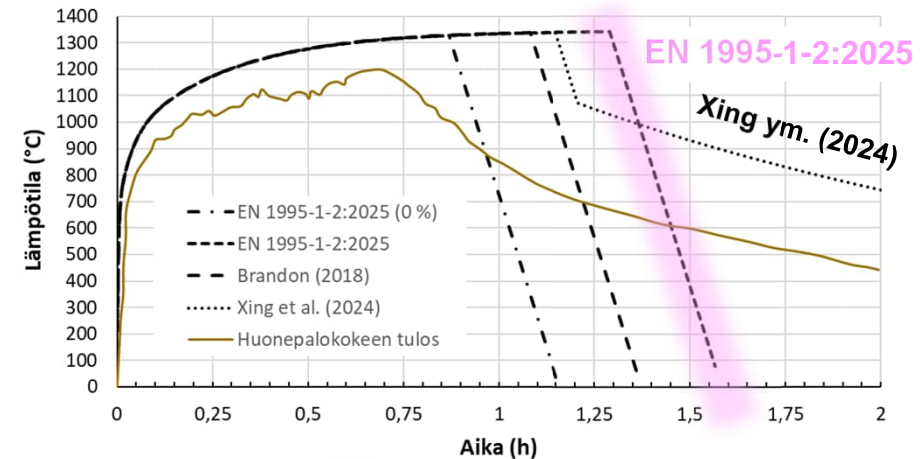


Lähde: Su, J., Lafrance, P.-S., Hoehler, M., Bundy, M. (2018). Fire Safety Challenges of tall wood buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross laminated timber compartment fire tests.

Havaintoja palomalleista

- Eurokoodin SFS-EN 1995-1-2:2025 parametrinen malli ottaa huomioon palokuorman, tilan vaipan aukot, tilaa rajoittavien pintojen lämmönabsorptiokyvyn sekä suojaamattomista puupinnoista syntyvän palokuorman.
- SFS-EN 1995-1-2:2025 menetelmä ei ota huomioon lamellien irtoamista. Ohjeet eivät siis sovellu tapaukseen ”bond line integrity not maintained”.
- Xing ym. (2024) on esittänyt menetelmän, joka ottaa huomioon edellisten lisäksi myös lamellien irtoamisen, hiiltymisnopeuden vaihtelun palon aikana sekä palotilan ulkopuolella palavan osuuden palokuormasta.
- Tehtyjen vertailujen perusteella Xing ym. (2024) menetelmä vastaa koetuloksia Eurokoodin parametrissa mallia paremmin.

Palotilan lämpötila ajan funktiona. Huoneen katto suojaamatonta CLT:tä. Kokeissa erilainen aukkotehijän arvo.



Huonepalokokeiden tulosten lähde: McNamee, R., Zehfuss, J., Bartlett, A.I., Heidari, M., Robert, F., Bisby, L.A. (2020). Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling. Interflam 2019. Fire and Materials. 45, 847–857. John Wiley & Sons Ltd. .

Johtopäätökset ja jatkotutkimus

- Luokkiin ja lukuarvoihin perustuvassa suunnittelussa Eurokoodi antaa ohjeet kantavien CLT-rakenteiden palonkestävyyden määrittämiseen riippumatta CLT:n valmistuksessa käytetystä liimatyyppistä.
 - Eurokoodin ohjeita voidaan soveltaa myös oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa silloin, kun määritetään palonkestävyyttä sahatavaralle tai CLT-tuotteelle, jonka valmistuksessa on käytetty palonkestävää liimaa.
-
- Eurokoodi ei anna luonnollisen palon mukaiselle paloaltistukselle soveltuvaa menetelmää tehollisen hiiltymissyvyyden määrittämiseksi sellaisille CLT-tuotteille, joiden valmistuksessa ei ole käytetty palonkestäviä liimoja. Tällaisia tuotteita käytetään yleisesti, ja niiden osalta tarvitaan kokeellisia tuloksia, menetelmäkehitystä sekä toiminnallisessa suunnittelussa käytettävien numeeristen analyysimenetelmien verifiointia paloturvallisten suunnitteluratkaisujen varmistamiseksi.
 - Silloin, kun rakennuksen tulee kestää koko palo mukaan lukien jäähtymisvaiheen, suojaamattoman puupinnan määrälle tulisi määritellä raja-arvot. Raja-arvoissa tulisi ottaa huomioon myös pintojen sijainti toisiinsa nähden.

Kiitos mielenkiinnosta

Tutkimusta on rahoittanut Palosuojelurahasto (VN/15281/2024)

Tutkimushanke: Kantavien puurakenteiden oletettuun palonkehitykseen perustuva palomitoitus
1.9.2024–31.10.2025

Mikko Malaska, professori

mikko.malaska@tuni.fi

<https://orcid.org/0000-0002-8215-9765>

Rakennetun ympäristön tiedekunta, Tampereen yliopisto

<https://research.tuni.fi/metke/about/>

