

Korkeiden puurakennusten kantavien rakenteiden palomitoitus

Mikko Malaska, professori

Metalli- ja kevytrakenteiden tutkimusryhmä
Rakennetun ympäristön tiedekunta, Tampereen yliopisto
<https://research.tuni.fi/metke/about/>

Esityksen sisältö

- 1 Tampereen yliopiston palolaboratorio
- 2 Korkeita puurakennuksia koskevat palomääräykset
- 3 Sahatavaran hiiltyminen
- 4 CLT-rakenteen hiiltyminen
- 5 Tampereen yliopiston CLT-rakenteiden palotutkimus

Metalli- ja kevytrakenteiden tutkimusryhmä

research.tuni.fi/metke



PALOTUTKIMUS

Mikko Malaska, TkT
Professori

Rakenteiden palonkestävyys ja
palomitoitus

Akkreditoitu
palotestauslaboratorio

Toiminnallinen palotekninen suunnittelu
Puurakenteiden palonkestävyys



TERÄSRAKENTEET

Kristo Mela TkT
Tenure track -tutkija

Korkealujuusteräket
rakentamisessa

Suunnittelun
automaatio ja kantavien
rakenteiden optimointi

Sandwich-paneelit ja
kylmämuovatut
teräsrakenteet

KEVYT- JA ERIKOISRAKENTEET, PUURAKENTEET

Sami Pajunen, TkT
Professori

Teollinen
puurakentaminen

Puu- ja hybridi-
rakenteet

Edistyneet simulaatio- ja
mitoitusmenetelmät



TUTKIMUS- AIHEET

Tampereen yliopisto

Akkreditoitu palolaboratorio

Polttokoelaitteisto valmistui 1997

Eurooppalaisen palotestauslaboratorioiden järjestö EGOLF:in jäsen vuodesta 2017 alkaen

2016

1997

2017

Akkreditoitu palotestaus ISO/IEC 17025:2017 vuodesta 2016 alkaen



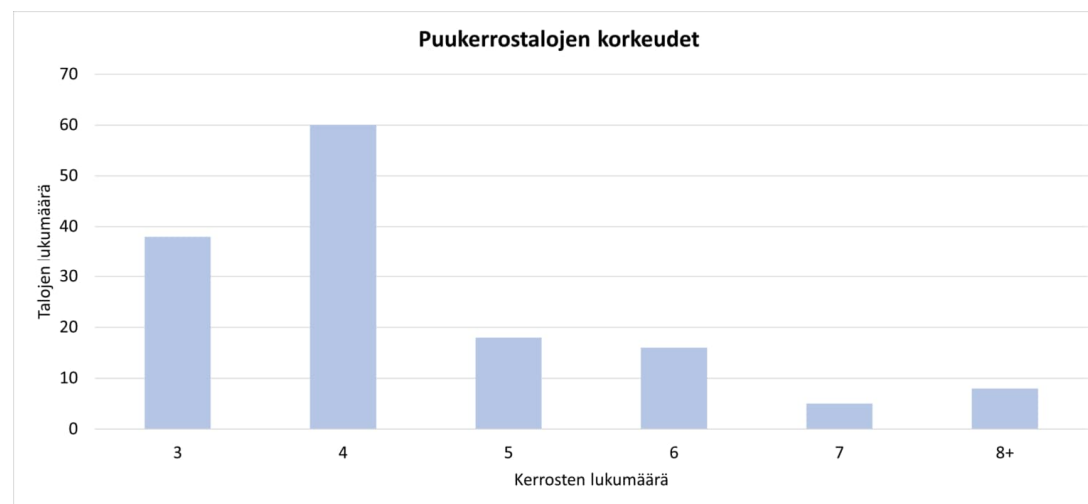
Polttokoeuunissa voidaan testata:

- pystysuunnassa 3 m x 3 m ja
- vaakasuunnassa 3 m x 4 m koekappaleita

Puukerrostalot

Kantava runko on pääosin puinen

		Kerroksia	Korkeus	Kohde
Suomessa	- 2023	3 - 8		144 rakennusta
	2019	14	48	Lighthouse, Joensuu
	2021	13	42	Tuuliniitty, Espoo
		16	56	Puukruunu, Oulu
Ulkomailla	2019	18	85,4	Mjøstårnet, Norja
		29	98	Kreuzberg, Berlin
			130	Dutch Mountains, Eindhoven



Lähde: Puuinfo, <https://puuinfo.fi/arkkitehtuuri/asuinkerrostalot/suomessa-toteutetut-puukerrostalot/>

Puukerrostalon palotekninen suunnittelu

Kerrosluku

Paloturvallisuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset täyttyvät, jos rakennus suunnitellaan ja rakennetaan:

≤ 8

- Noudattaen Ympäristöministeriön asetuksessa esitettyjä luokkia ja lukuarvoja;

> 8

- Perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet.
- Paloluokka P0

P2-paloluokan rakennuksen käyttötarkoitusta ja kokoa koskevat rajoitukset (YMa 848/2017)

Rakennus	Kerrosluku enintään	Korkeus ¹⁾ enintään
Yleensä	2	9 m
1-kerroksinen tuotanto- tai varistorakennus	1 ²⁾	ei rajoitusta
Palovaarallisuusluokan 2 tuotanto- tai varistorakennus	1 ²⁾	ei rajoitusta
Yli 2-kerroksinen asuinrakennus, hoitolaitos (pois lukien suljettu rangaistuslaitos), majoitusrakennus ja työpaikkarakennus ³⁾	8 *	28 m *
Yli 2-kerroksinen kokoontumis- ja liikerakennus ³⁾	4 *	14 m *

* Rakennus on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.

Kantavien rakenteiden palomitoitus

Oletettuun palonkehitykseen perustuva tarkastelu

Yli 2-kerroksinen rakennus

Olennaiset kantavat rakenteet suunnitellaan kestävämmän riittävän luotettavasti palo- ja jäähtymisvaihe.

- Palolle altistettujen rakenteiden rasituksia käsittelee eurokoodi SFS EN 1991-1-2 ja sitä koskevat kansalliset valinnat.
- Puurakenteiden materiaaliakohtaisia ohjeita on annettu eurokoodissa SFS EN 1995-1-2.

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

Rakennus	Rajoitukset	Olennaisten kantavien rakenteiden kestävyys palossa	Mitoituspalokuorman tiheys MJ/m ²
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{5,k}^{1) 2)}$
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{5,k}^{1) 2)}$
1-kerroksinen, - majoitustila - hoitolaitos - kokoontumis- ja liiketila	Yli 50 paikkaa Yli 25 paikkaa Yli 250 henkilöä	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{5,k}^{1) 2)}$
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{5,k}$, vähintään 600 MJ/m ^{2 2)}
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{5,k}$, 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	$Q_{5,k}$, vähintään 600 MJ/m ^{2 2)}
Yli 2-kerroksinen	Korkeus enintään 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$Q_{5,k}$, vähintään 600 MJ/m ^{2 2)}
Yli 2-kerroksinen	Korkeus yli 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$2,0 * Q_{5,k}$, vähintään 900 MJ/m ²

Q_{5,k} on tilastollisesti tai laskennallisesti määritetty laskennallisen palokuorman tiheyden arvo (80% frekvenssi).

Tarkastelu tehdään täysin kehittyneelle palolle. Jos voidaan osoittaa, että lieskahtamista ei tapahdu, mitoitus voidaan tehdä paikalliselle palolle. Lieskahtamisen katsotaan tapahtuneen, kun kuuman savukerroksen keskilämpötila saavuttaa 500 celsiusastetta tai kun säteily savukerroksesta lattiaan on yli 20 kilowattia neliometrille.
Kellarikerrokset mitoitetaan palo- ja jäähtymisvaiheen rasituksille.

¹⁾ Ylin kellarikerros, vähintään 600 MJ/m².
²⁾ Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset, $2,0 * Q_{5,k}$, vähintään 900 MJ/m².

Lähde: YMa 927/2020

Luonnollisen palon mallit

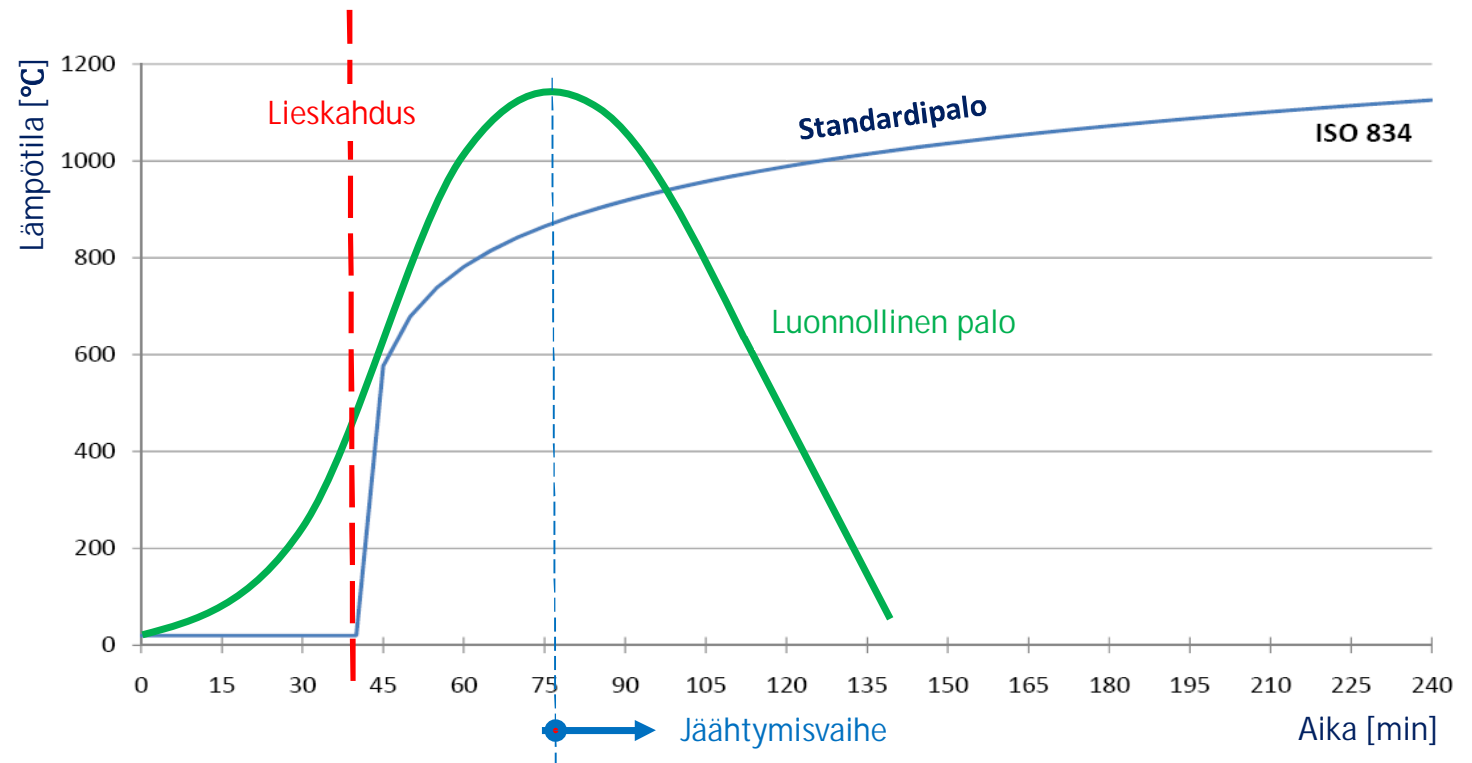
SFS EN 1991-1-2 Kohta 3.3

Standardipalo

- Luokitukseen perustuvassa mitoituksessa sovellettu palorasitus
- Ei jäähtymisvaihetta

Luonnollisen palon mallit

- Palo- ja jäähtymisvaihe
 - Parametrinen palo
 - Vyöhykemallit
 - Virtausdynamiikkaan perustuvat simulaatiot



Puun hiiltyminen palossa

SFS-EN 1995-1-2 Kohta 4.2.2

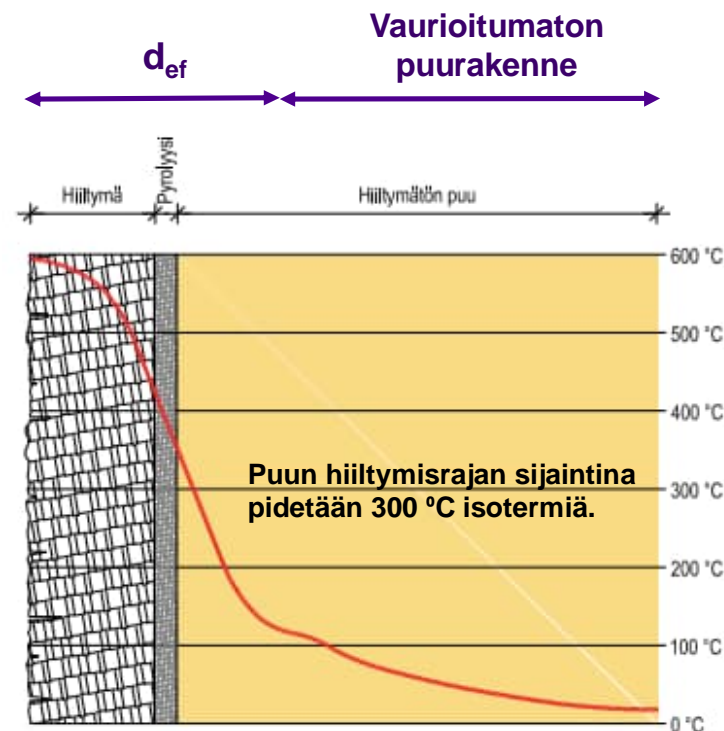
- Mitoituksessa sovelletaan ns. **tehollista poikkileikkausta**, joka saadaan **vähentämällä alkuperäisestä poikkileikkauksesta tehollisen hiiltymissyvyyden verran** kaikilta niiltä sivuilta, jotka ovat palolle alttiina.
- Sahatavaran hiiltymissyvyys standardipalossa, kun β_0 on hiiltymisen nopeuden mitoitusarvo

$$d_{ef} = d_{char,0} + k_0 d_0 = \beta_0 t + k_0 d_0$$

Hiiltymissyvyyden
mitoitussarvo

Lujuuden ja jäykkyyden menettäneen kerroksen paksuus

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



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

Sahatavaran hiiltyminen

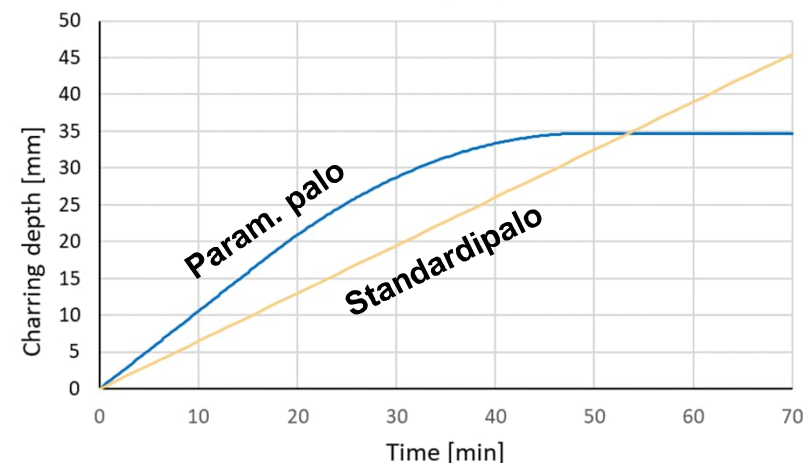
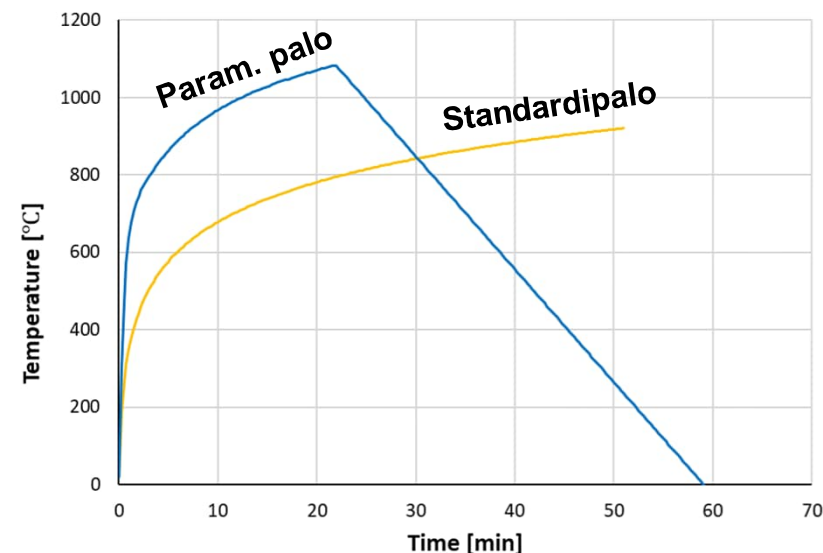
Standardipalo ja luonnollinen palo EN 1995-1-2 Liite A

- Standardipaloaltistuksessa sahatavara ja liimapuu:
 $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$
- Parametrinen altistus: Nykyisen eurokoodin liite A esittää menetelmän suojaamattoman havupuun hiiltymissyvyyden arvon määrittämiseksi parametrisia lämpötila-aikakäyriä käyttäen. Valmisteilla oleva uusi standardiversio tulee tarkentamaan nykyistä ohjeistusta.

$$d_{ef} = d_{char,par} + d_{0,par}$$

$$d_{char,par} = 2 \cdot \beta_{par} \cdot t_0$$

$$\beta_{par} = 1,5 \cdot \beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08}$$

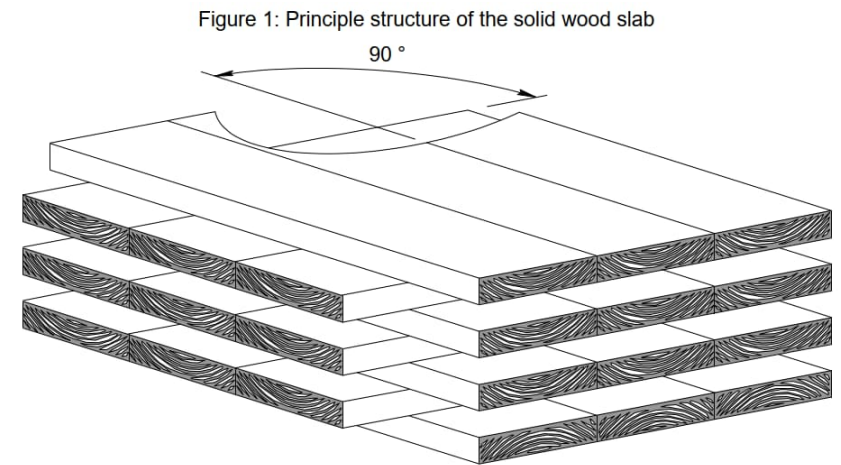


Parametrinen palo:

$$\Gamma = 7,550 \text{ MJ/m}^2, O = 0,055 \text{ m}^{1/2}$$

CLT-rakenne

- Cross Laminated Timber (CLT) koostuu ristiinliimatuista lautakerroksista (lamellikerros).
- Kerroksia on useita, tavallisimmin kolme tai viisi.

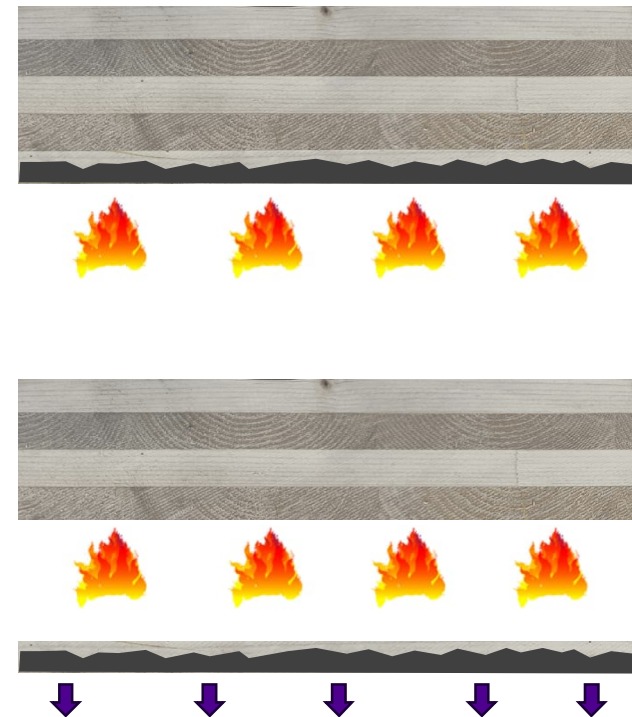


Kuvan lähde:

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

Liiman vaikutus CLT-levyn hiiltymiseen

- CLT-paneelien valmistuksessa käytetty liima voi pehmetä lämpötilan vaikutuksesta jo ennen kuin puu alkaa hiiltymään. Tämä voi johtaa edelleen puurakennetta suojaavan hiilikerroksen putoamiseen ennen kuin suojaava lamelli on ehtinyt hiiltyä loppuun saakka.
- Putoavan kerroksen takana olevan puun lämpötila on huonelämpötilaa selvästi korkeampi, mistä johtuen hiiltyminen alkaa tässä lamellikerroksessa suuremmalla nopeudella kuin ensimmäisessä lamellikerroksessa.



CLT:n hiiltyminen standardipalossa

Hiiltyneen lamellikerroksen putoamisen jälkeen hiiltyminen etenee kaksinkertaisella nopeudella, kunnes suojaavan hiilikerroksen paksuus on 25 mm.

Valmisteilla oleva Eurokoodiluonnos prEN 1995-1-2 täydentää voimassa olevan standardin ohjeistusta.

Table 7.5 Notional design charring rates β_n for plane members (prEN 1995-1-2, 2021)

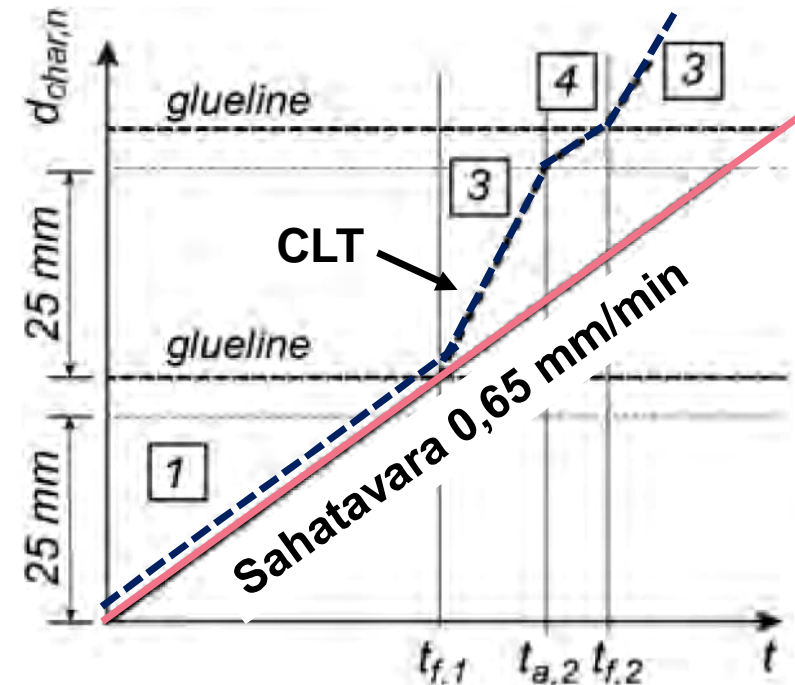
	Phases 1 and 4 (mm/minute)	Phase 3 (mm/minute)
Plane members		
Gaps 0–2 mm	0.65	1.3
Gaps 2–5 mm	0.78	1.56

Taulukon lähde:

Fire Safe Use of Wood in Buildings, Global Design Guide (2022) ed. A. Buchanan & B. Östman

European Charring Model (ECM)

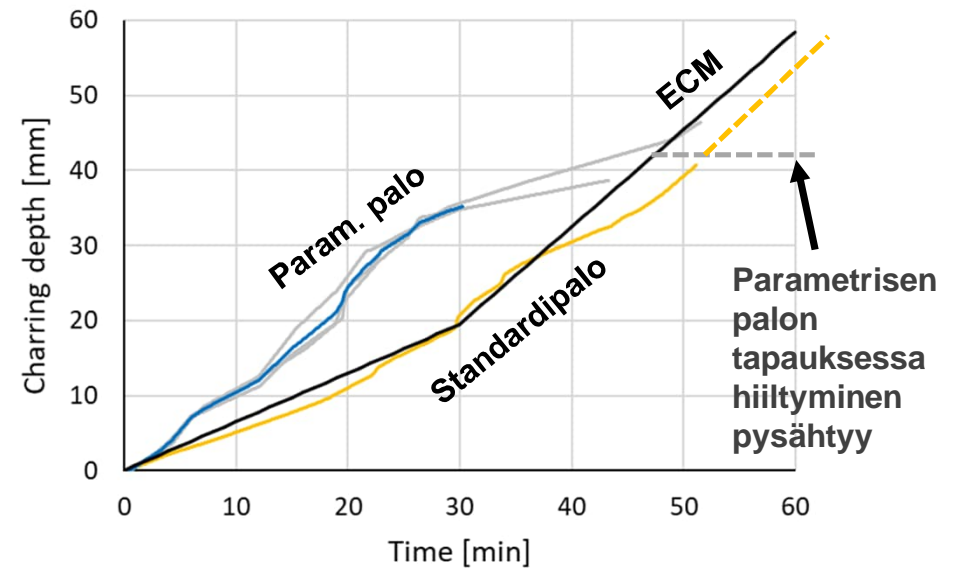
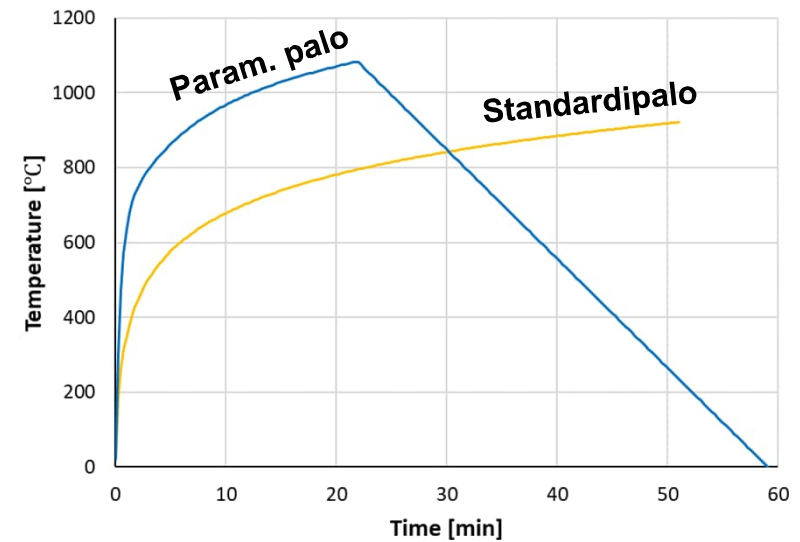
- for initially unprotected sides of timber members
- bondline integrity not maintained



CLT:n hiiltyminen luonnollisessa palossa

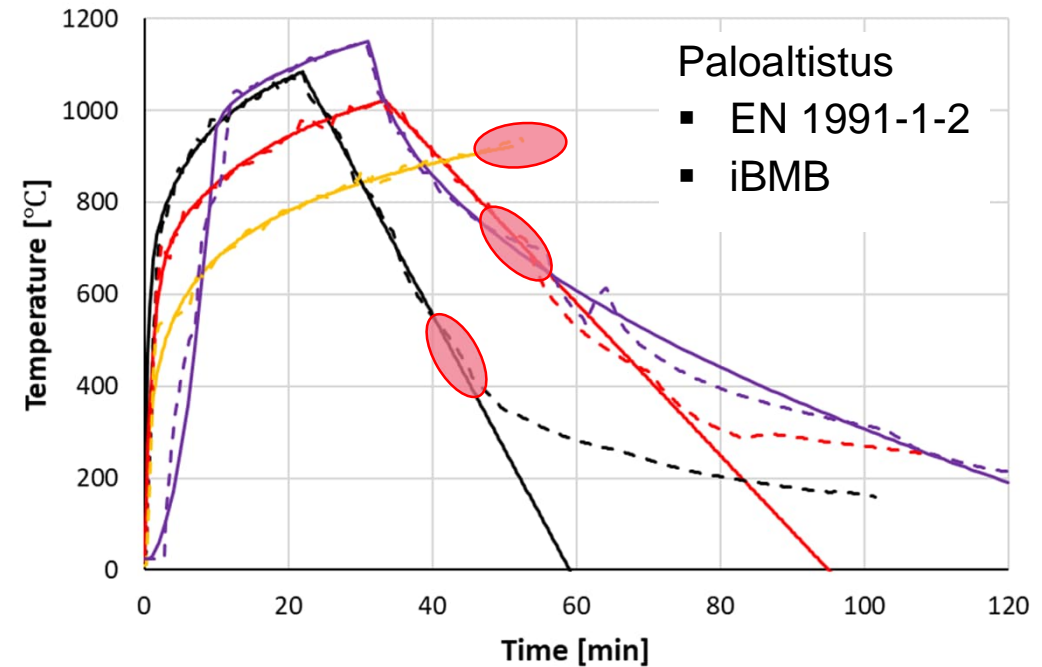
- Valmisteilla oleva Eurokoodiluonnos prEN 1995-1-2 ei tule todennäköisesti esittämään ohjeita luonnolliselle palolle altistetun CLT-rakenteen hiiltymissyvyyden määrittämiseksi.
- CLT-rakenteen hiiltymisestä jäähtyvän palon vaiheessa on olemassa vain vähän koetuloksia tai muuta tutkimustietoa.

Kuvissa on esitetty Tampereen yliopistolla tehtyjen kuormittamattomien polttokokeiden tuloksia.



Tampereen yliopisto tutkii:

- CLT-rakenteen hiiltymistä luonnollisen palon mallin mukaisissa palorasituksissa.
- CLT-välipohjarakenteen murtumista jäähtymisvaiheen aikana.
- Numeerisia menetelmiä hiiltymissyvyyden laskennalliseen määrittämiseen (SAFIR).
- Palotestausmenetelmää hiiltymissyvyyden ja -nopeuden kokeelliseen määrittämiseen.

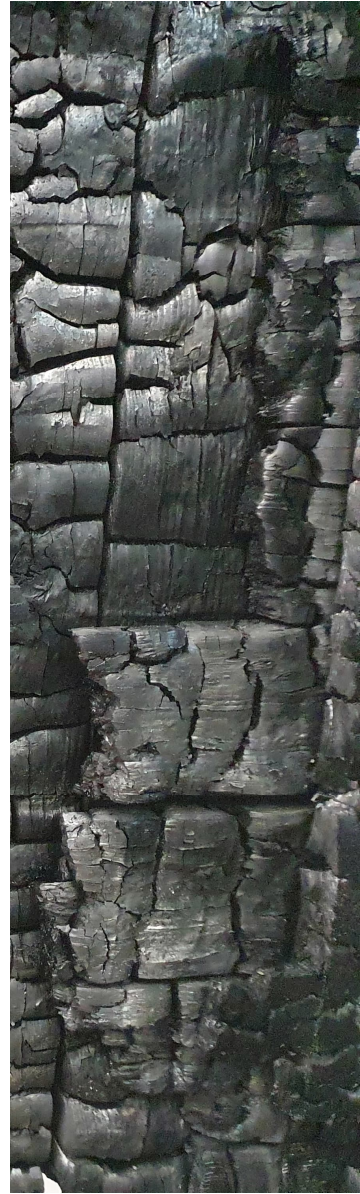


$$d_{ef} = \boxed{\text{Hiiltymissyvyys}} + \boxed{\text{Lujuuden menettänyt kerros}}$$

$$d_{ef} = d_{char,par} + d_{0,par}$$

Yhteenveto

- Yli 8-kerroksisen puukerrostalon olennaiset kantavat rakenteet suunnitellaan perustuen oletettuun palonkehitykseen ja kestävään riittävän luotettavasti sekä palo- että jäähtymisvaihe.
- Eurokoodi antaa ohjeet jäähtymisvaiheen hiiltymisen määrittämiseksi sahatavaralle sekä sellaisille puutuotteille, joissa liima ei vaikuta tuotteen hiiltymiseen.
- Ohjeistus puuttuu sellaisilta CLT-tuotteilta, joilla lamellit irtoavat, kun hiiltymä on edennyt liimasaumaan. Esimerkkinä monet polyuretaaniliimalla valmistetut tuotteet.
- Tampereen yliopistolla on käynnissä tutkimushanke, jossa selvitetään hiiltyvän lamellikerroksen ennenaikaisen putoamisen vaikutusta hiiltymiseen sekä CLT-välipohjarakenteen murtumiseen palon jäähtymisvaiheessa.
- Kuormittamattomilla koekappaleilla tehtyjen polttokokeiden tuloksia analysoidaan parasta aikaa ja kuormitetut kokeet toteutetaan vuoden 2024 aikana (Mika Alasen väitöskirjatutkimus).



Kiitos mielenkiinnosta

Mikko Malaska, professori

mikko.malaska@tuni.fi

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

Metalli- ja kevytrakenteiden tutkimusryhmä

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