



14-kerroksisen puukerrostalon rakenteiden palonkehitykseen perustuva mitoitus - menetelmät

TkT Mikko Salminen

**SPIY, Paloturvallinen puurakentaminen
-seminaari, 25.4.2017**

PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIALA OY



PUURAKENTEET - PALOMITOITUS

- Perustuu lähinnä tehollisen poikkileikkauksen menetelmään, jossa hiiltynyttä kerrosta ei oteta huomioon tehollisessa poikkileikkauksessa

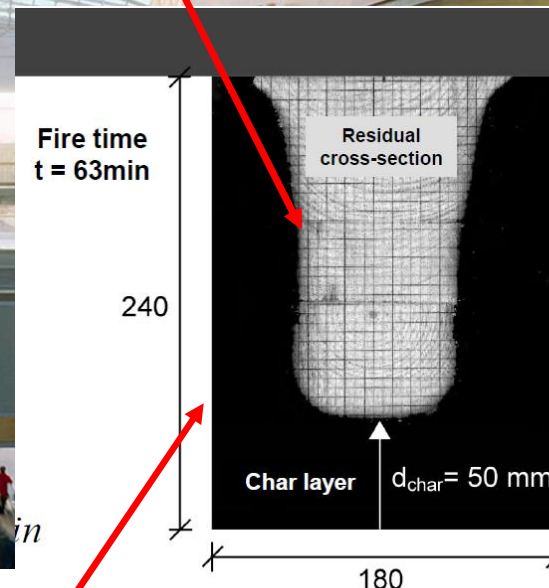
Standardipalo: vakio
hiiltymisnopeus EN 1995-1-2:n

Table 3.1 – Design charring rates β_0 and β_n of timber, LVL, wood panelling and wood-based panels

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Softwood and beech		
Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Hardwood		
Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels		
Wood panelling	0,9 ^a	–
Plywood	1,0 ^a	–
Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a	–

^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.

~300 °C:een isotermi



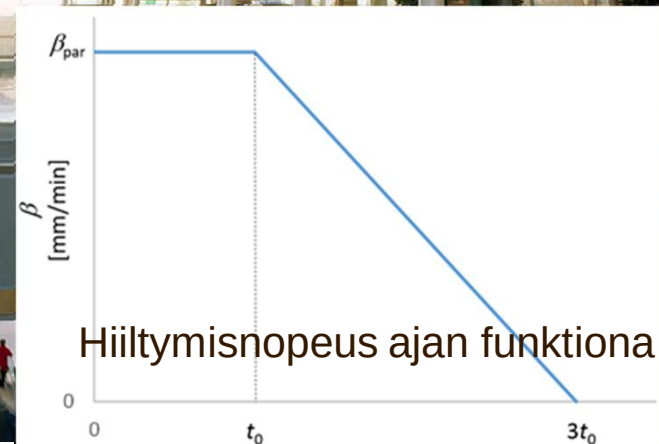
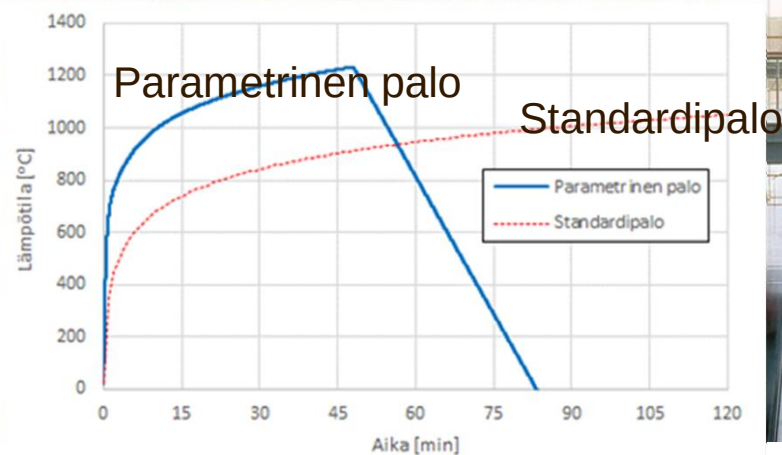
Frangi, A. 2012. Fire resistance assessment of timber structures, Basic design methods, Worked examples. Workshop 'Structural Fire Design of Buildings according to the Eurocodes' – Brussels, 27-28 November 2012.

PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIALA OY



PUURAKENTEET – EN 1995-1-2, LIITE A:N MALLI

- Voidaan käyttää yhdessä EN 1991-1-2, Liite A:n parametristen palokäyrien kanssa
- Ottaa huomioon tilan vaipan termisiä ominaisuuksia, aukotuksen ja palokuorman tiheyden (jollain tarkkuudella)
- Aluksi vakio hiiltymisnopeus, sitten lineaarinen hidastuminen
- Rajoituksia käytölle annettu EN 1995-1-2:ssa ja EN 1991-1-2:ssa. Lisäksi antaa kevyen vaipan tapauksessa (puu) liian suuria lämpötiloja



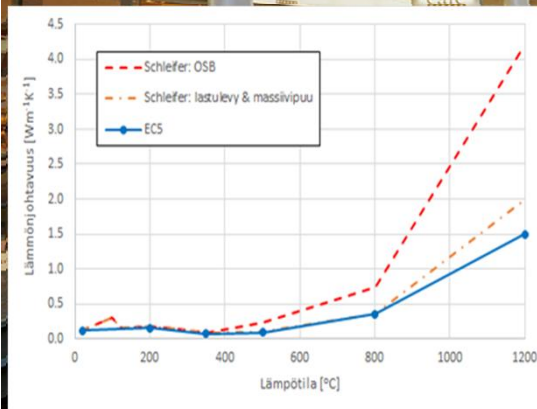
Esimerkki parametrisestä
palokäyrästä

PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIOLA OY

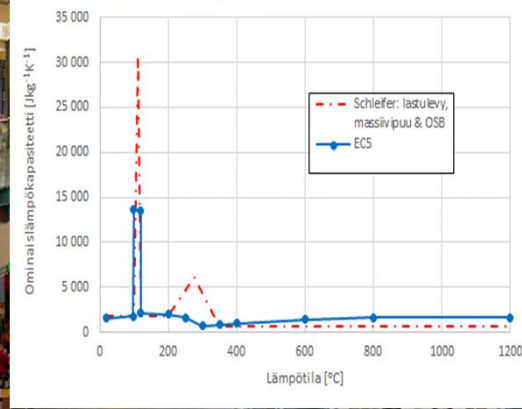


PUURAKENTEET – EN 1995-1-2, LIITE B

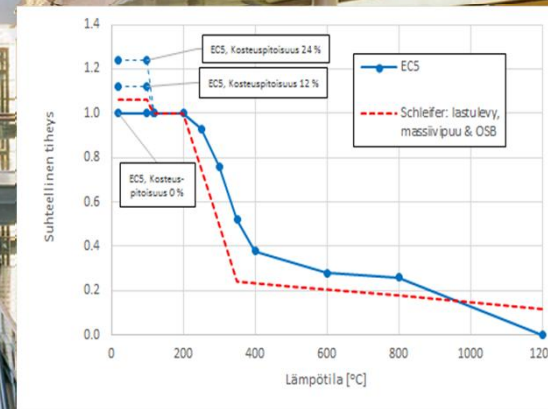
- Kehittyneitä laskentamenetelmiä (FEM) voidaan käyttää hiiltymissyvyyden määrittämisessä (**myös luonnollisissa paloissa**)
- Annetut puun termiset ominaisuudet soveltuvat kuitenkin vain **standardipalorasitukseen**



Lämmönjohtavuus



Ominaislämpökapasiteetti

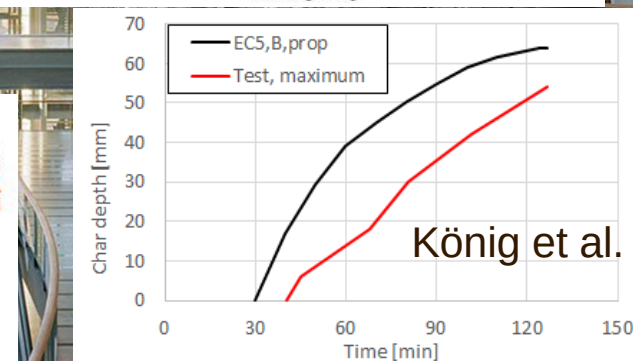
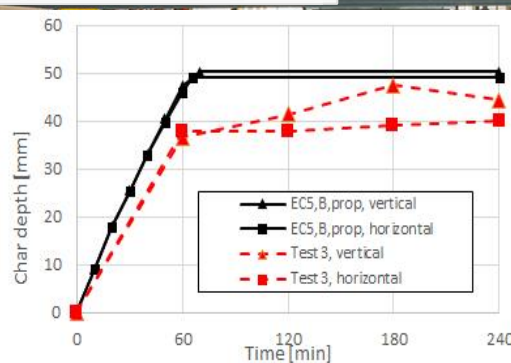
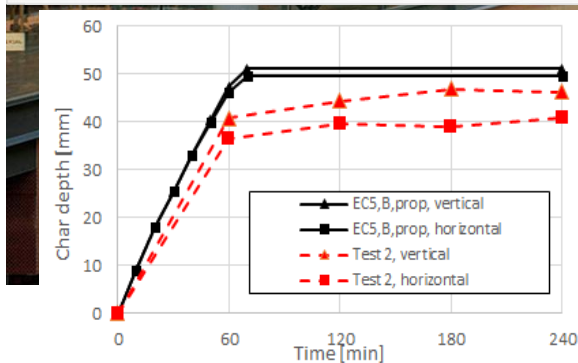
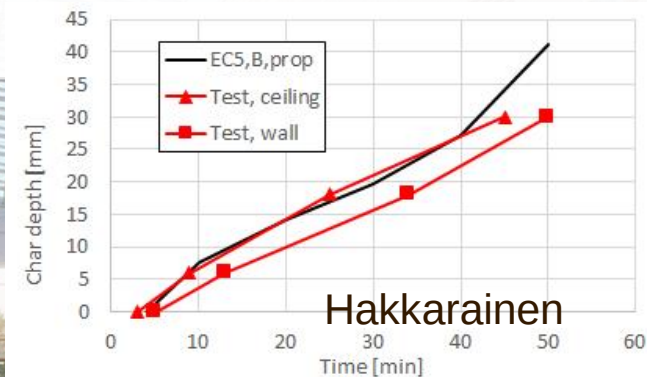


Suhteellinen tiheys

PUURAKENTEET – KEHITETTY MATERIAALIMALLI

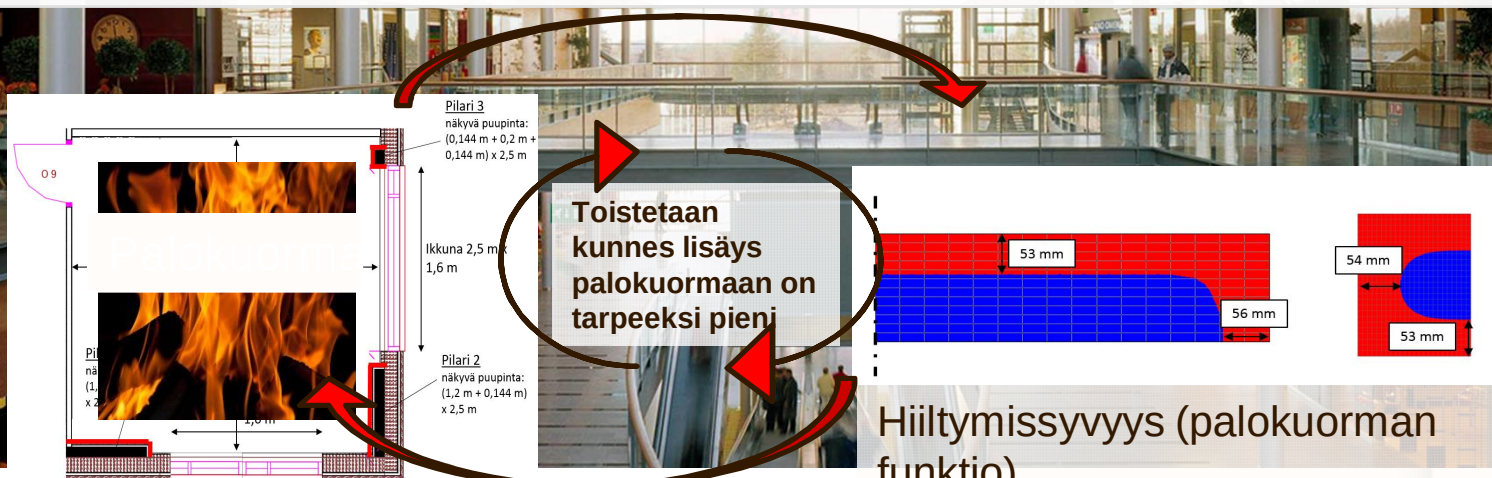
- MCM (= Modified Conductivity Model) perustuen soveltuviin polttokokeisiin ja muihin tutkimuksiin (mm. Cachim & Franssen, Hopkin et al.)

Temperature [°C]	Modified thermal conductivity based on the comparison of this study [W/mK]	Thermal conductivity according to EC5 [W/mK]
20	0,12	0,12
200	0,15	0,15
350	0,07	0,07
500	0,13	0,09
800	0,51	0,35
1200	2,18	1,50



PUURAKENTEET – SUOJAAMATON PUU JA SIITÄ SYNTYVÄ LISÄYS PALOKUORMAAN

- Kun toiminnallista mitoitusta käytetään, tarvitaan lähtötiedoksi palokuorman tiheys [MJ/m²]
- EC1:n mukaan palokuormaan luetaan mukaan kantavat rakenteet (mikäli voivat palaa)
- Lopullinen palokuorma ja hiiltymissyvyys määritettävä iteratiivisesti



Palokuorma (hiiltymissyvyyden funktio)

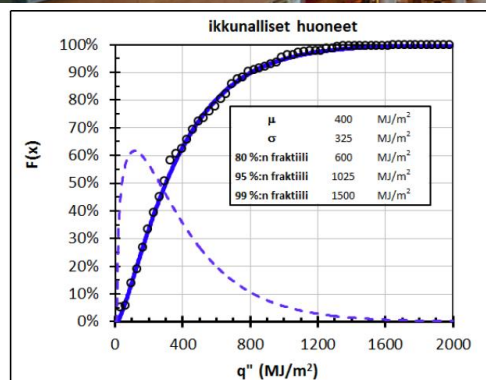
Hiiltymissyvyys (palokuorman funktio)

PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIOLA OY



PUURAKENTEET – ESIMERKKI TOIMINNALLISESTA MITOITUKSESTA

- Esitetty julkaisussa *Puukerrostalon toiminnallinen palotekninen suunnittelu*, 2015, Puuinfo
- Voidaanko käyttää suojaamatonta puuta puukerrostalon kantavissa rakenteissa?
- Esimerkissä oletetaan, että riskianalyysin avulla on määritetty mitoituspalon toistumisajaksi vähintään 769 000 vuotta (EC0, CC2) (sprinklereiden vaikutus, palokuormatiheyden jakauma, palokunnan toiminta otettu huomioon)
- Harmathyn ja Lien parametrilla palomallia käytetty asunnon lämpötilojen laskennassa (hyvä vastaavuus koetuloksiin)

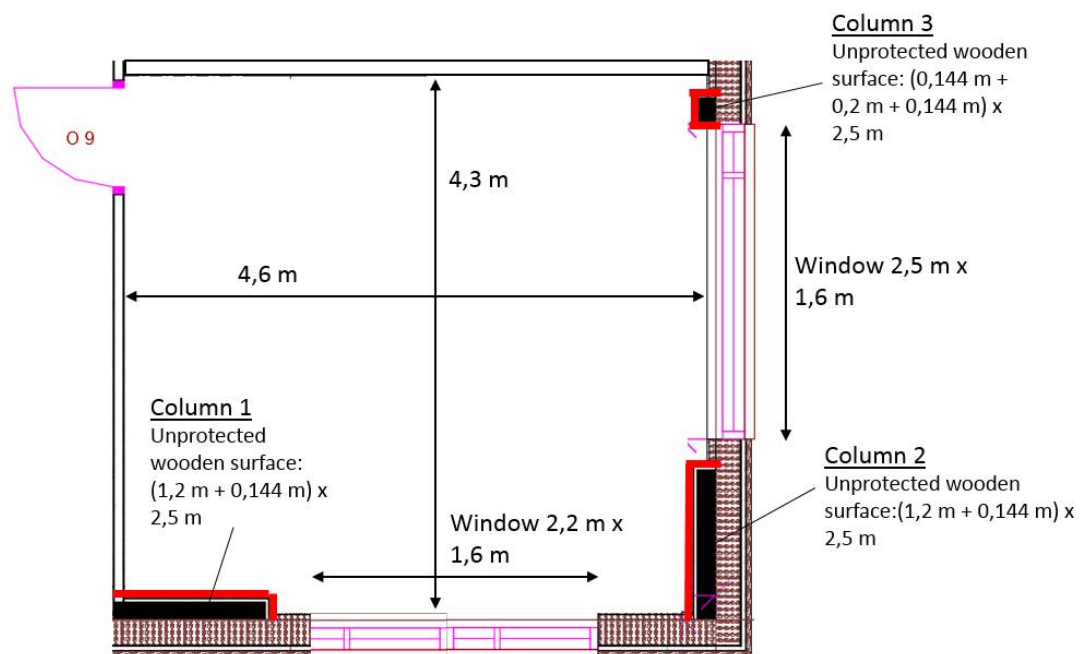


PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIOLA OY



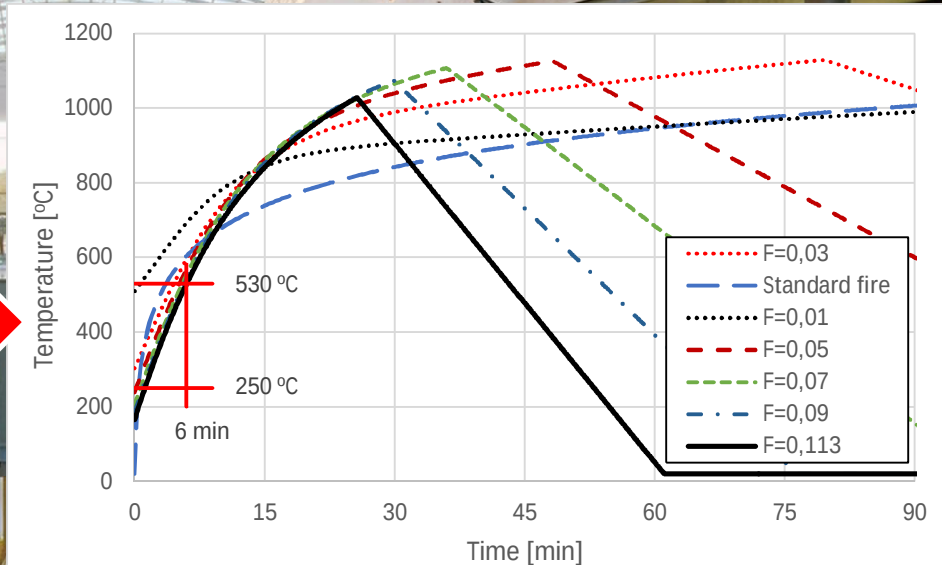
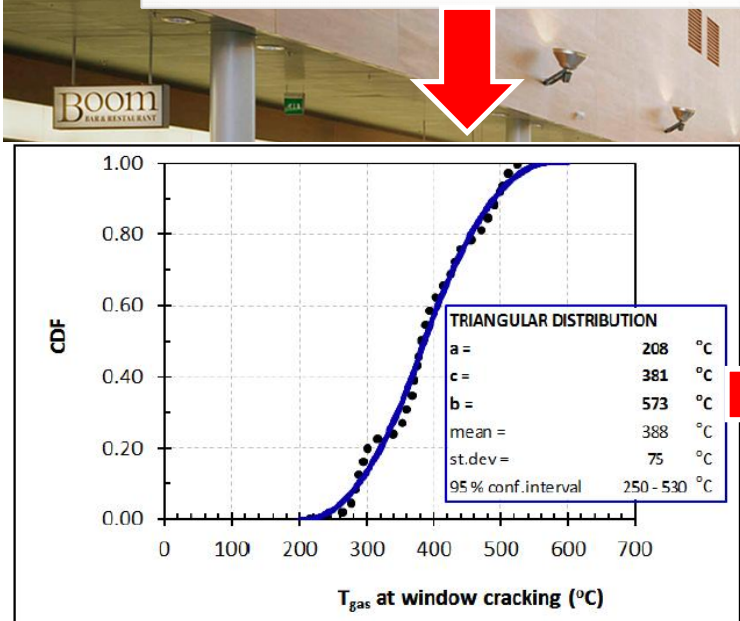
PUURAKENNE-ESIMERKKI: TARKASTELTAVA HUONE

- 9 % kaikista pinnoista suojaamatonta puuta (= palokuormaa)
- Palokuorman tiheys 600 MJ/m^2 (lattialla) = 141 MJ/m^2 (kaikkia pintoja kohden)
- Huom! Lähtöarvot eivät ole mistään todellisesta kohteesta



PUURAKENNE-ESIMERKKI: AUKKOTEKIJÄ

- Oletukset aukkotekijästä vaikuttavat parametriseen palokäyrään
- 95 %:ssa tapauksista ikkuna rikkoutuu kun kaasun lämpötila on välillä 250 – 530 °C



Aukkotekijä $F = 0,113$
(molemmat ikkunat rikkoutuvat
palossa)

PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIOLA OY

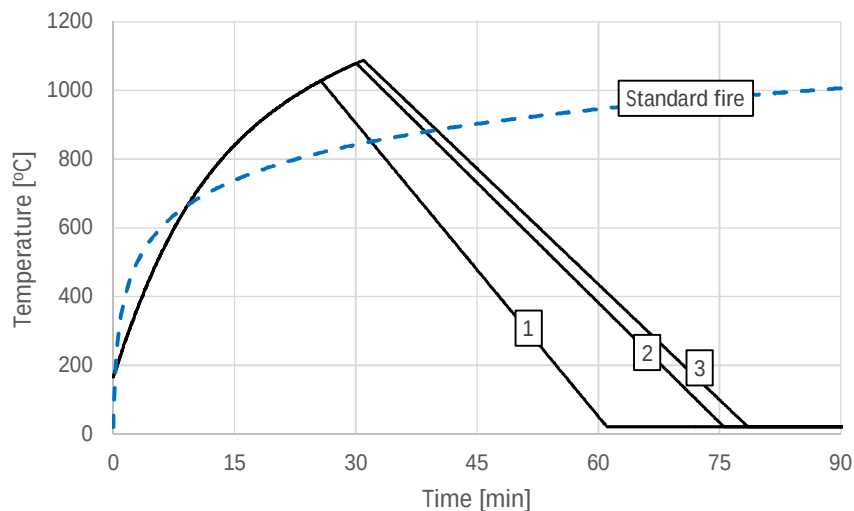


PUURAKENNE-ESIMERKKI: ITERATIIVINEN LASKENTA

- Tässä tapauksessa iteraation suppenemiseen tarvittiin 3 laskentakierrosta

Iteration round (<i>i</i>)	$q_{t,d,i}$ [MJ/m ²]	$d_{char,i}$ [mm]	$q_{add,i}$ [MJ/m ²]	$q_{add,i} / q_{t,d,i}$
1	141,18	44	31,43	22 %
2	172,61	53	6,43	4 %
3	179,04	55	1,43	1 %

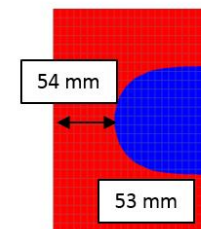
Parametriset palokäyrät (Harmathy & Lie)



Pilarit 1 ja 2

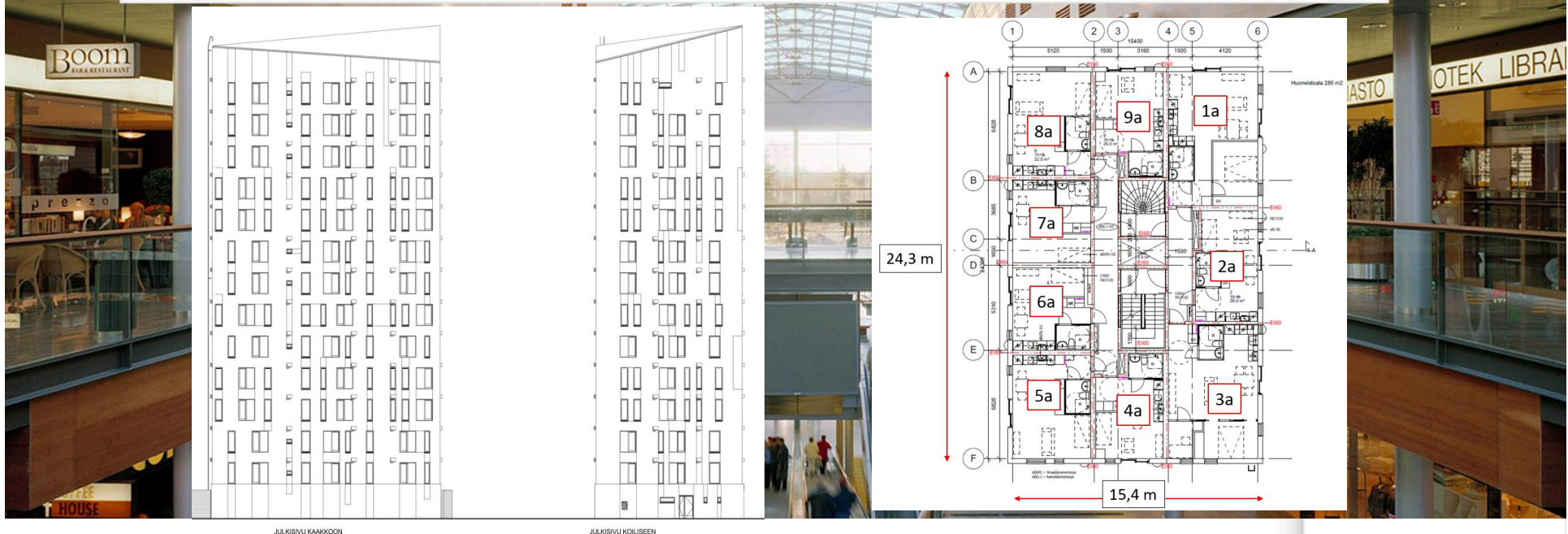


Pilari 3



CASE: 14-KERROKSIINEN PUINEN ASUINKERROSTALO

- Ei mahdollista taulukkomitoituksen mukaan
- Tarkasteltiin kantavia rakenteita ja suojaverhouksia oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa



PUINEN KERROSTALO - RISKIANALYYSI

- Vertailu hyväksyttävän ratkaisun turvallisuustasoon
- Lopputuloksena saadaan mitoituspalokuorma, jolle kantavat rakenteet mitoitetaan

A-luokan kantavat rakenteet, R120



Ei sprinklausta

Palokuorma

Sprinklaus

Palokuorma

D-luokan kantavat rakenteet suurimmaksi osaksi suojaverhottu, pieni osa ilman suojaverhous

Tapahtuma 1:

Kantavat rakenteet sortuvat tulipalossa.
Todennäköisyys: p_1



Tapahtuma 2:

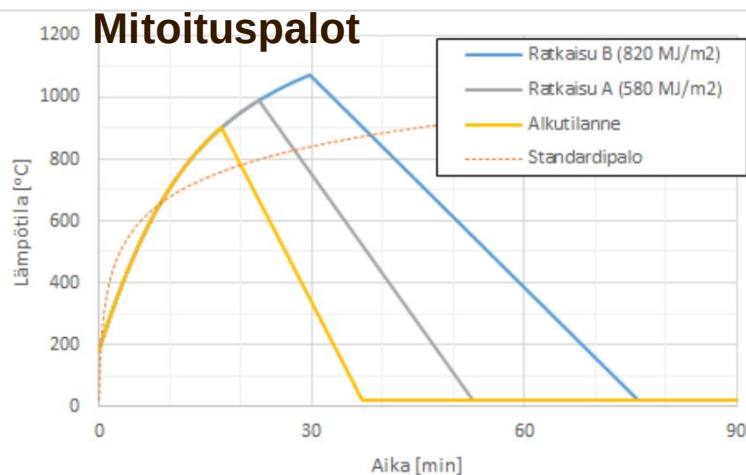
Kantavia rakenteita suojaava levytys pettää.
Todennäköisyys: p_2

Hyväksymiskriteeri:

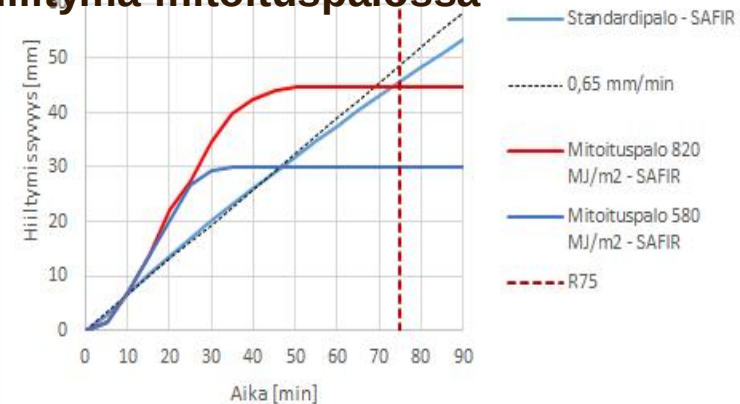
$$p_2 < p_1$$

PUINEN KERROSTALO – HIILTUMIEN LASKENTA

- Hiiltemissyvyydet laskettiin SAFIR –ohjelmalla (kehitetty materiaalimalli)
- Otettiin huomioon kantavien rakenteiden hiiltymästä tuleva lisäys palokuormaan

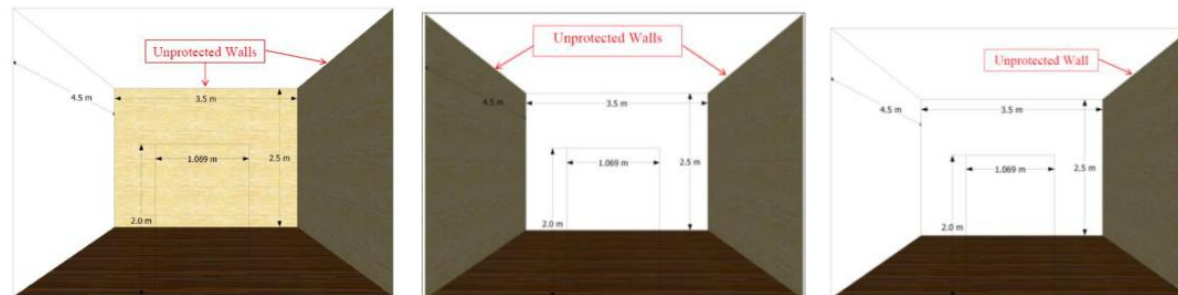


Suojaamattoman puurakenteen hiiltymä mitoituspalossa



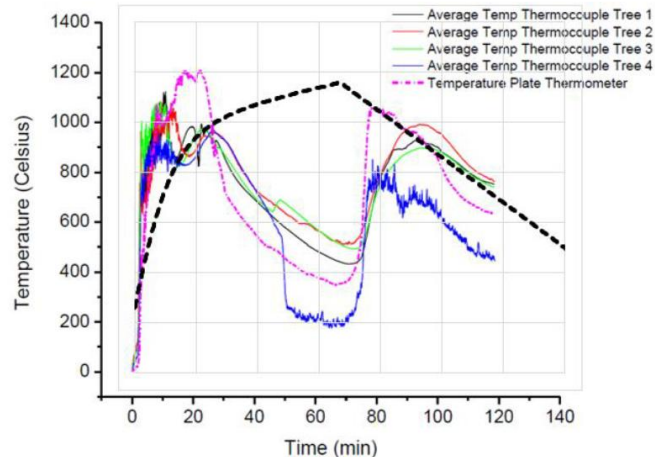
PUINEN KERROSTALO – LASKENTAMENETELMIEN VALIDOINTI

- Käytetyn laskentamenetelmän vertailu kanadalaisten polttokokeiden tuloksiin (Hevia, 2014)
 - CLT-rakenteiset huoneet, joiden palokuorma koostui huonekaluista ja vaatteista. Osa vaipasta suojaamatonta puupintaa

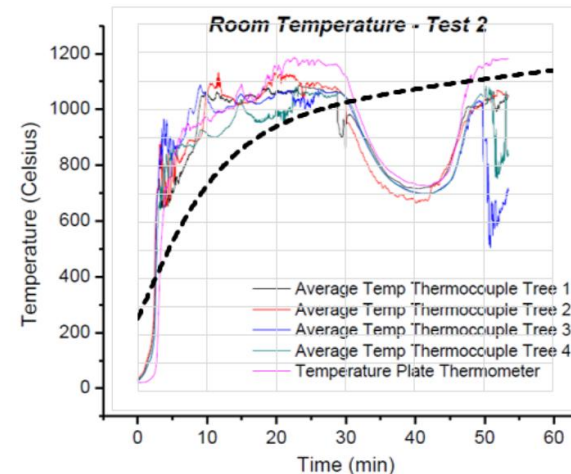


Kuva 19. Kanadalaisessa polttokokeessa testatut CLT-huoneet (TEST 1 vasemmalla, TEST 2 keskellä ja TEST 3 oikealla).

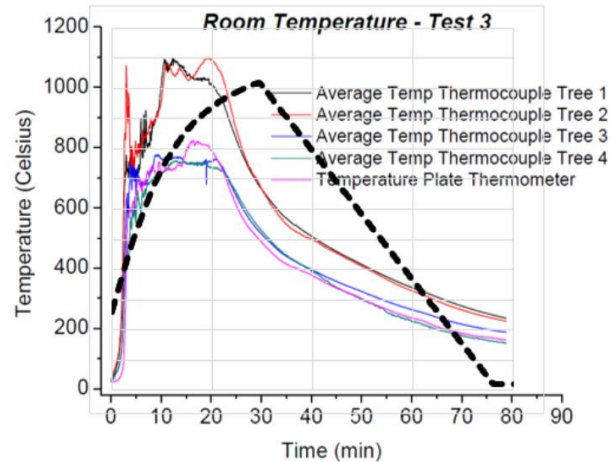
PUINEN KERROSTALO – LASKENTAMENETELMIEN VALIDOINTI



Kuva 20. Polttokokeen TEST 1 lämpötilojen vertailu laskennallisiin arvoihin (musta paksu katkoviiva).



Kuva 21. Polttokokeen TEST 2 lämpötilojen vertailu laskennallisiin arvoihin (musta paksu katkoviiva).



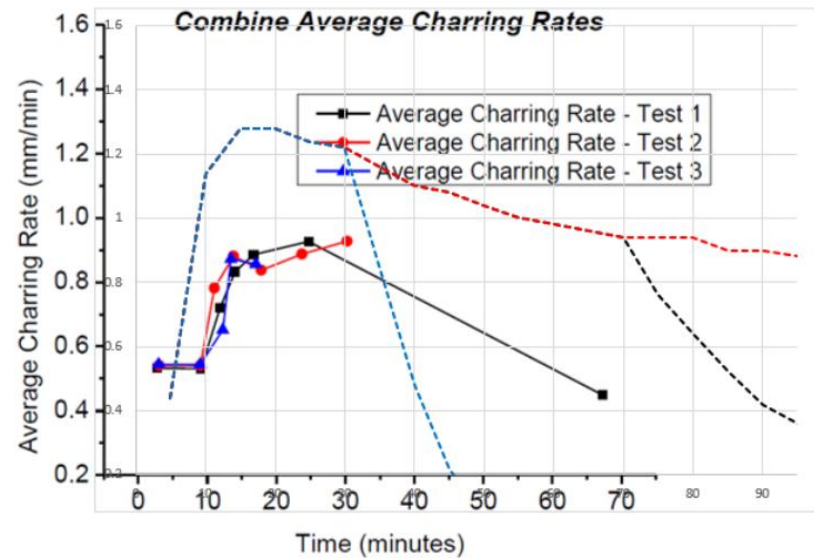
Kuva 22. Polttokokeen TEST 3 lämpötilojen vertailu laskennallisiin arvoihin (musta paksu katkoviiva).



PALOTEKNINEN INSINÖÖRITOIMISTO
MARKKU KAURIOLA OY



PUINEN KERROSTALO – LASKENTAMENETELMIEN VALIDOINTI



Kuva 23. Hiiltymisnopeuksien vertailu.

Polttokoe	Yksittäisen paneelin maksimi- arvojen vaihteluväli	Vertailuarvo ⁽²⁾	Laskennallinen tulos
TEST 1 – 120 min	71 – 80 mm	79 mm	92 mm
TEST 2 – 57 min	53 – 60 mm	59 mm	62 mm
TEST 3 – 80 min	21 – 44 mm	40 mm	41 mm

⁽¹⁾ Polttokokeessa TEST 3 annettiin koko hiiltymien vaihteluväli

⁽²⁾ Käytetään laskentaan vertailtavan arvona 95 %:n fraktiiliarvoa olettaen noudattavan kolmiojakaumaa

Kuva 23. Hiiltymisnopeuksien vertailu. Katkoviiva vastaa laskennallista tulosta ja käyrien värit on valittu siten, että ne vastaavat polttokokeiden raportoinnissa käytettyjä värejä.

PUINEN KERROSTALO – LOPPUTULOS

- Kohde voidaan toteuttaa
- Rakenteet mitoitetaan luokkaan R90
- Asuntojen seinistä / katoista noin 25 % voisi olla näkyvää puupintaa



YHTEENVETO

- Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus mahdollistaa yli 8-kerrosta korkeat puukerrostalot
- Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus ottaa huomioon asuntojen todelliset ominaisuudet (palokuorma, dimensiot, aukotus, sprinklaus)
- Oletettuun palonkehitykseen perustuvalla mitoituksella voidaan perustella myös suojaamattomat puupinnat laskennallisesti siten, että niistä ei muodostu liikaa palokuormaa