



**Palotekninen Insinööritoimisto Markku
Kauriala Oy**

Rakenteiden toiminnallinen palosuunnittelu standardien näkökulmasta

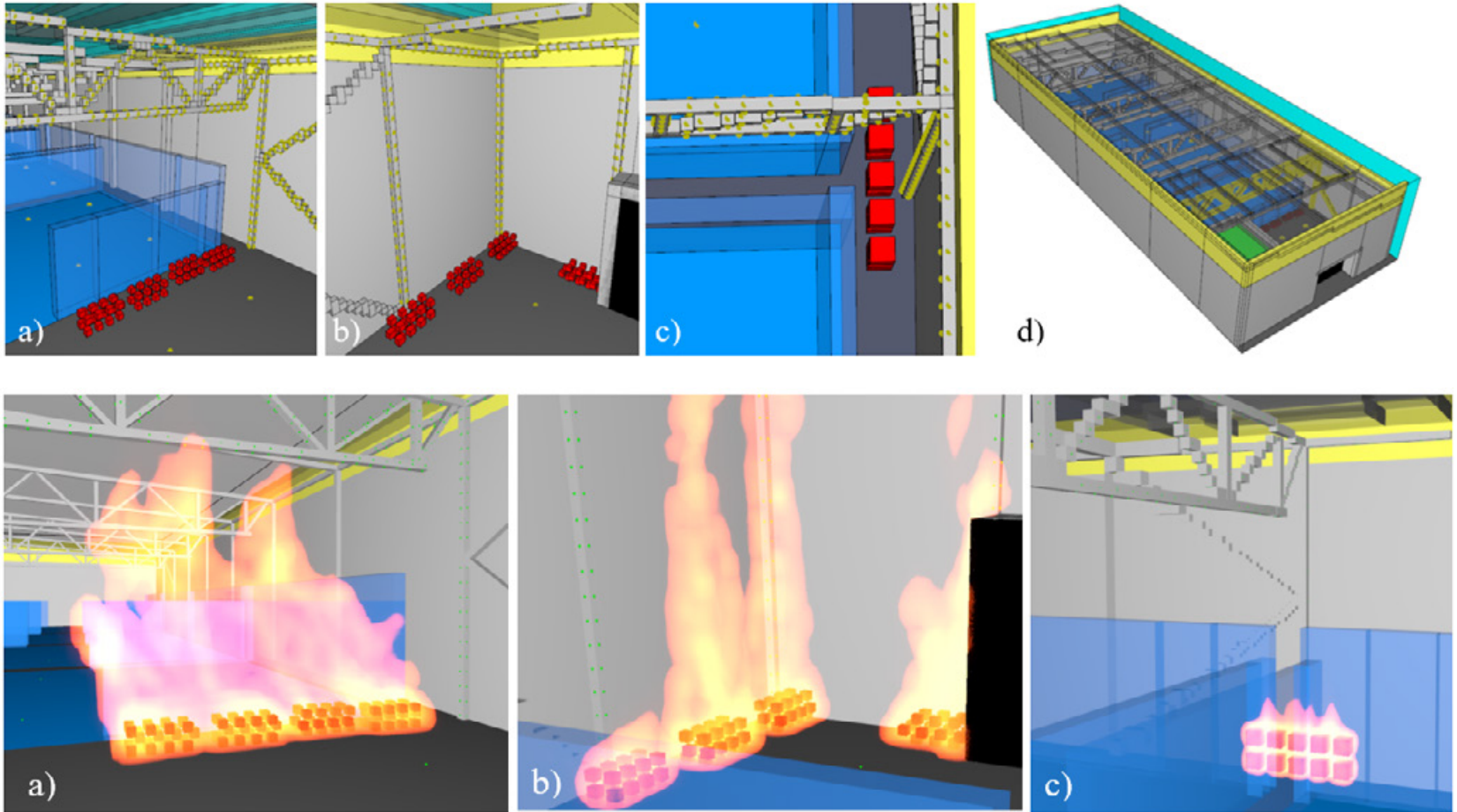
**Paloseminaari 2023 – Paloturvallisuus ja standardisointi
7.2.2023, Kalastajatorppa, Helsinki**

Sisältö

- Johdanto
- YM asetusten ja Eurokoodien yleiset vaatimukset
- Teräsrakenteet
- Puurakenteet
- Sprinklauksen hyödyntäminen
- Case-esimerkkejä
- Yhteenvedo

Johdanto

Rakenteiden toiminnallinen palosuunnittelu



Määräykset, ohjeet, kirjallisuus yms.

- Maankäyttö- ja rakennuslaki, pelastuslaki
- YM asetukset (848/2017 & 927/2020) sekä perustelumuiiot
 - Viittaus Eurokoodeihin
- Eurokoodit (mm. SFS-EN 1990, SFS-EN 1991-1-2, SFS-EN 1992-1-2, SFS-EN 1993-1-2, SFS-EN 1995-1-2) ja niiden kansalliset liitteet
- Ohjeet, esim. ECCS, TRY...
- Alan muu kirjallisuus, artikkelit
- Suunnittelutoimistojen omat käytännöt / ohjelmat

YM asetusten ja Eurokoodien yleiset vaatimukset

YMa 848/2017 & 927/2020

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	$Q_{fi,k}$ ^{1) 2)}
1-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{fi,k}$ ^{1) 2)}
1-kerroksinen, – majoitustila – hoitolaitos – kokoontumis- ja liiketila	Yli 50 paikkaa Yli 25 paikkaa Yli 250 henkilöä	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{fi,k}$ ^{1) 2)}
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus enintään 9 m	30 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{fi,k}$, vähintään 600 MJ/m ² ²⁾
2-kerroksinen, yleensä	Korkeus yli 9 m	60 minuuttia ilman jäähtymisvaihetta	$Q_{fi,k}$, 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	$Q_{fi,k}$, vähintään 600 MJ/m ² ²⁾
Yli 2-kerroksinen	Korkeus enintään 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$Q_{fi,k}$, vähintään 600 MJ/m ² ²⁾
Yli 2-kerroksinen	Korkeus yli 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	$2,0 * Q_{fi,k}$, vähintään 900 MJ/m ²

$Q_{fi,k}$ on tilastollisesti tai laskennallisesti määritetty kokonaispalokuorman tiheyden ominaisarvo (80 % fraktiili).

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, $2,0 * Q_{fi,k}$, vähintään 900 MJ/m².

Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa kantavien rakenteiden mitoituksessa voi ottaa huomioon lämpötilan hitaamman nousun ja kantavien rakennusosien jäähdytyksen, kun rakennus on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.

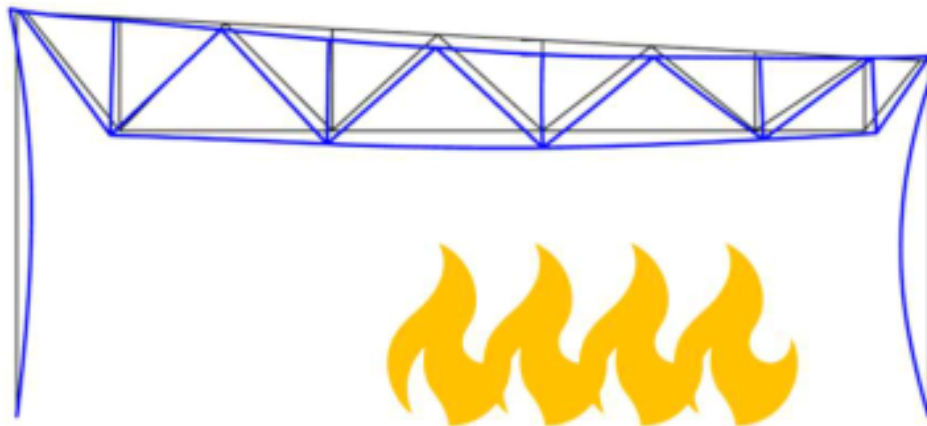
Eurokoodit yleisesti – olennaisia kohtia

- EN 1990 (suunnitteluperusteet)
- EN 1991-1-2 (kuormat)
 - Jako yksityiskohtaisiin sääntöihin (nimellispalon aiheuttamat lämpörasitukset) ja toimivuuteen perustuviin sääntöihin (fysiikkaan perustuvat lämpörasitukset) – Prescriptive rules vs. Performance-based code
 - Luku 4 (Rakenneanalyysissä käytettävät mekaaniset kuormat) – 4.1 Yleistä, (1)P: *Paloaltistuksesta johtuvien lämpötilanmuutosten aiheuttamien pituuden ja muodon muuttumisen ja muutosten estymisen seurauksena syntyy kuormavaikutuksia, esim. voimasuureita, jotka tulee ottaa huomioon, paitsi niissä tapauksissa, joissa:*
 - Niiden voidaan *edeltä käsin todeta olevan merkityksettömiä tai edullisia*
 - Ne otetaan huomioon valitsemalla *varmalla puolella olevat tuentamallit ja reunaehdot* tai ne otetaan huomioon sisällyttämällä niiden mahdollisuus *konservatiivisesti asetettuihin paloturvallisuusvaatimuksiin.*
 - EN 1992-1-2, EN 1993-1-2, EN 1995-1-2 yleisimmin käytössä olevat materiaaliikohtaiset osat (betoni, teräs, puu)

Teräsrakenteet

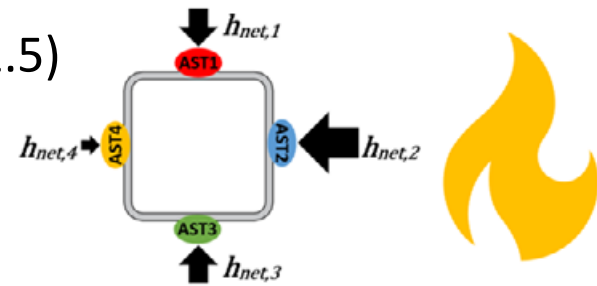
Teräsrakenteiden toiminnallinen mitoitus

- Epäsuorat vaikutukset
- Eurokoodit kattavat paljon (ei välttämättä kuitenkaan kaikkea)
- Sprinklauksen huomioon ottaminen
- Suunnitteluproseduuri (3. osapuolen tarkastus, suunnitelma usein mahdoton tehdä lupavaiheeseen, yms... TRY:ltä tulossa ohjeistusta)



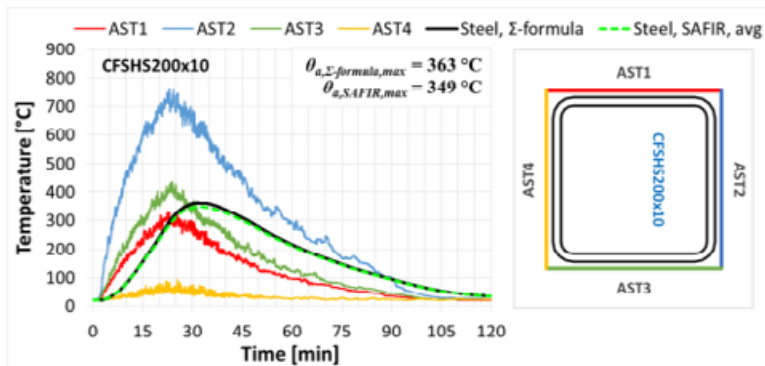
EN 1993-1-2: Oleellisia kohtia

- Kuva 0.1:
 - Taulukkomitoitus -> rakenneosan, rakenteen osan tai koko rakenteen tarkastelu
 - Toiminnallinen mitoitus -> rakenteen osan tai koko rakenteen tarkastelu
- 2.4.3 Rakenteen osan tarkastelu (4): ”Käytettäessä rakenteen osien tarkastelua rakenteiden mitoittamiseksi palotilanteessa seuraavat asiat otetaan huomioon: vauriomuoto palotilanteessa, lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet ja sauvojen jäykkyys, lämmön aiheuttama pituuden ja muodon muuttuminen (epäsuorat vaikutukset palotilanteessa).”
- Tasainen / epätasainen lämpötilajakauma (mm. 4.2.5)



Kehitettyjä menetelmiä standardien ja asetusten ulkopuolelta

- Poikkileikkauksen lämpötila, kun lämpörasitus on selvästi epätasainen
- Teräksen lujuuden palautuminen jäähtymisvaiheessa
- Palosuojauksen määrittäminen muussa kuin standardipalossa
- Sprinklauksen huomioon ottaminen

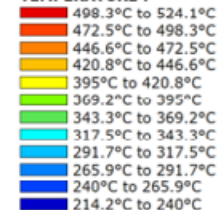


NODES : 1520
SOLIDS : 1216

MESH PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1980 sec

TEMPERATURE :



$$\theta_a(t + \Delta t) = \theta_a(t) + \frac{\Delta t}{c_a \rho_a} \sum_{k=1} \left[k_{sh,k} \left(\frac{A_{m,k}}{V} \right) \dot{h}_{net,k} \right]$$

Puurakenteet

Puurakenteiden toiminnallinen mitoitus

- Lisäys palokuormaan
- Palodynamiikka, mitoitus koko palolle
- Hiiltyminen
- Liitokset
- Standardeissa ei vielä kattavasti mitoitusmenetelmiä



Kuvat: Brandon et al. 2021. Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings – compartment fire testing, Final Project Report. RISE, Fire Research, Ruotsi.

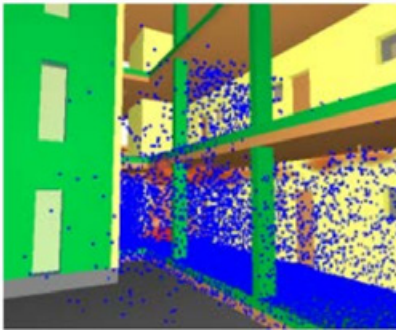
YMa 848/2017, EN 1991-1-2 ja EN 1995-1-2

- Palokuorma: Kaikki palotilassa oleva palava materiaali ja siitä vapautuva lämpöenergian määrä materiaalin palaessa täydellisesti. Siihen luetaan kantavat, runkoa jäykistävät, osastoivat ja muut rakennusosat sekä irtaimisto. [YMa 2017/848 2 §, kohta 10], sama sisältö myös EN 1991-1-2 kohdassa 1.5.3.8, mutta lisäyksenä ”Palavan ainemäärän palavia osia, jotka eivät hiilly palon aikana, ei tarvitse ottaa huomioon.”
- Eurokoodeissa ei ole kuvattu menetelmää, kuinka rakenteista tuleva palokuorma otetaan huomioon
- EN 1995-1-2 sisältää:
 - Hiiltymisnopeudet standardipalolle ja parametriselle palolle (EN 1991-1-2)
 - Materiaaliominaisuudet standardipalossa

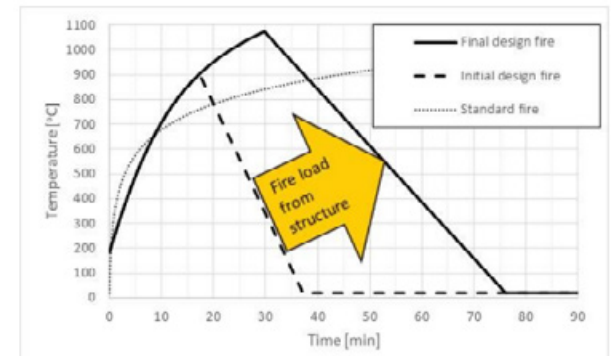
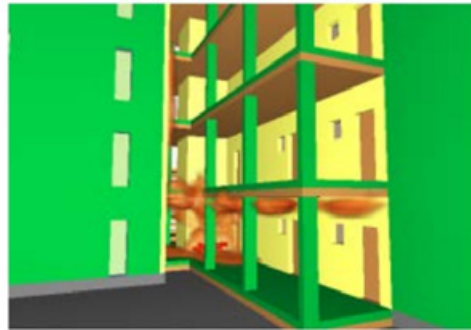
Kehitettyjä menetelmiä standardien ja asetusten ulkopuolelta

- Huoneistopalomalli, joka ottaa huomioon puurakenteista tulevan palokuorman lisäyksen
- Puun materiaaliominaisuudet muissa kuin standardi- ja parametrisessä palossa (hiiltymien määrittystä varten)
- Puun parametrit palosimuloinnissa
- Sprinklauksen huomioon ottaminen

Sprinkleri toimii



Sprinkleri ei toimi

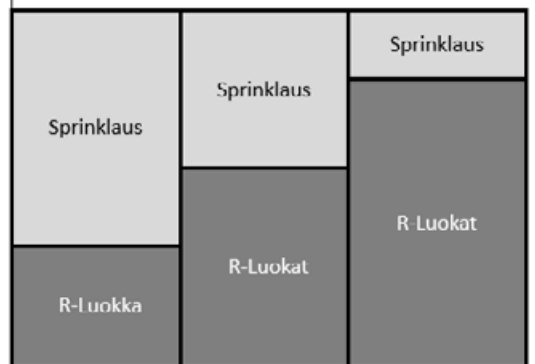


Sprinklauksen hyödyntäminen

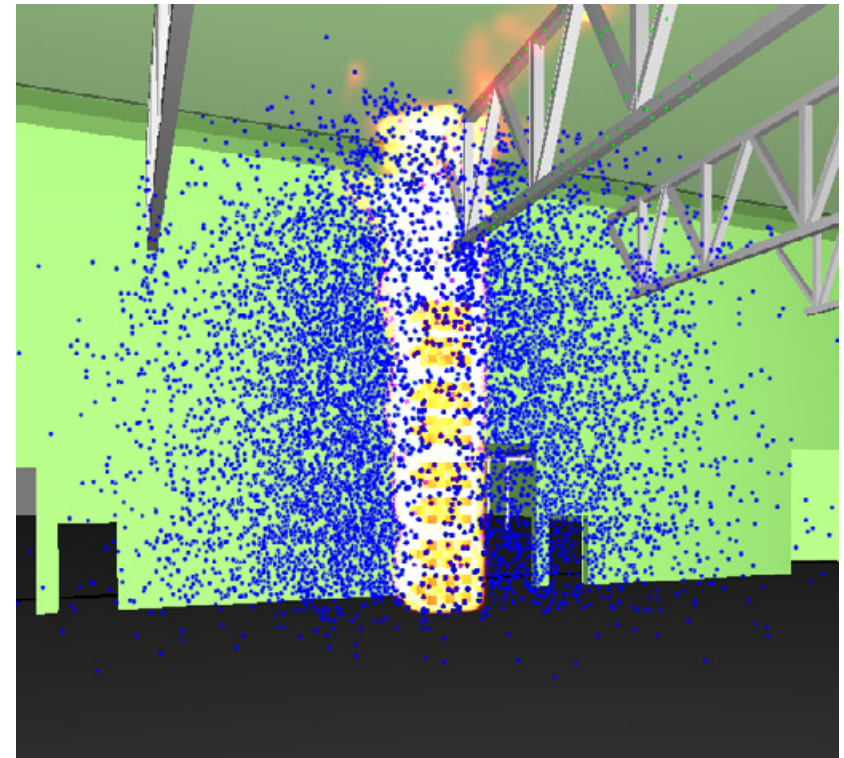
Tausta

- YMa 848/2017:n mukaan voidaan hyödyntää (miten?)
- Luotettavuus
- Mahdolliset seuraukset
- EN 1991-1-2 Liite E:ssä menetelmä, ei kuitenkaan käytetä Suomessa

Rakenteellisen paloturvallisuuden perusteet



Mahdolliset seuraukset rakenteen sortumasta palossa



Yleistä / Lähtökohta

- YMa 848/2017:n ohjeistus ei ole kovin selvä
- Tavoitteena oli kehittää menetelmä, joka on linjassa YMa:n kanssa ja ottaa huomioon
 1. Sprinklauksen vaikutuksen sekä
 2. Tapauksen, jossa sprinklerijärjestelmä ei toimi suunnitellusti

SiF 2022

12th International
Conference on
Structures in Fire

The Hong Kong
Polytechnic University

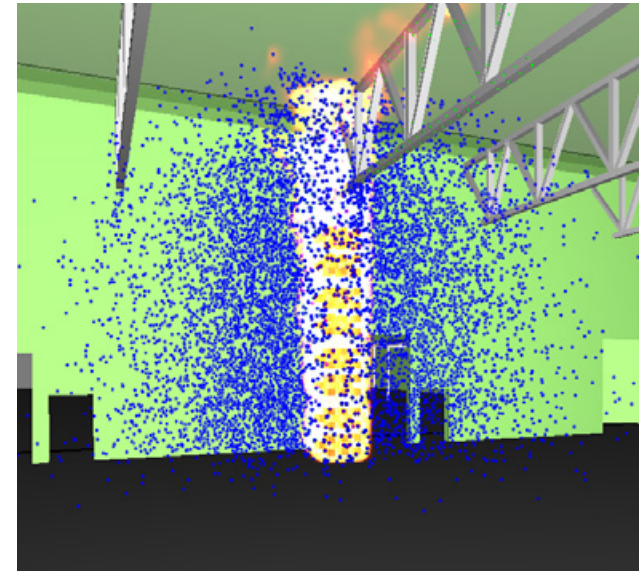
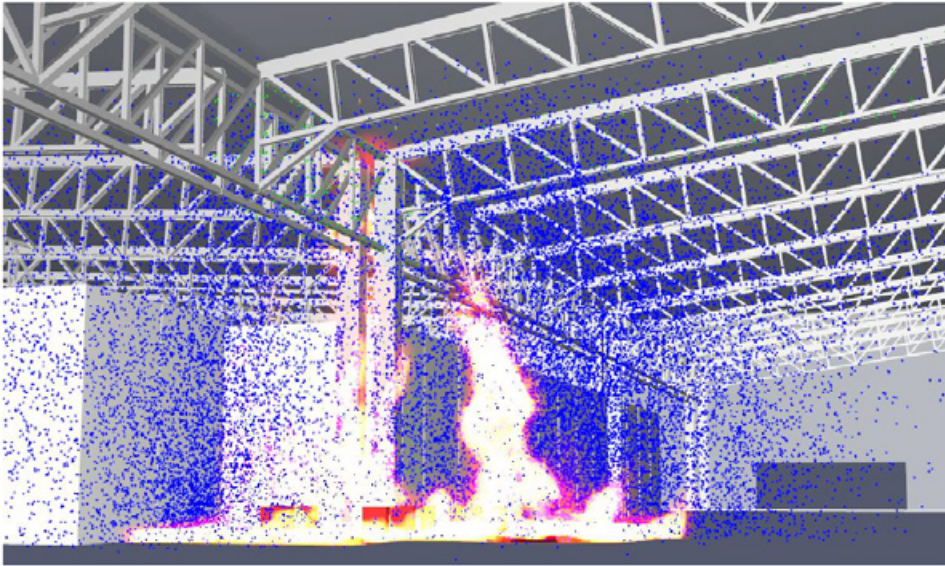
30 Nov 2022–2 Dec 2022

FRAMEWORK TO INCORPORATE SPRINKLER SYSTEM IN STRUCTURAL FIRE ENGINEERING

Mikko Salminen¹, Mikko Malaska², Timo Jokinen³, Risto Ranua⁴

Oletuksia sprinklerin toiminnasta

- Rajoittaa palon leviämistä?
- Jäähdyttää rakennetta?
- Yksi tai useampi suutin ei toimi?
- Pientää mitoituspalon palotehoa (HRR)?



Konservatiiviset oletukset analyysiin

Table 2. Recommended conservative assumptions for modelling sprinkler system in SFE.

Level of conservatism	Reduction in fire area	Cooling effect, but at least 1 critical spr-head not operating	Cooling effect as full	Reduction in HRR
Conservative (C)	Yes	-	Yes	No
Very Conservative (VC)	Yes	Yes	-	No
Extremely Conservative (EC)	Yes	No	No	No
Not taken into account (-)	No	No	No	No

Table 3. Alternative assumptions for modelling sprinkler systems in SFE.

Level of conservatism	Reduction in fire area	Cooling effect, but at least 1 critical spr-head not operating	Cooling effect as full	Reduction in HRR
Realistic (R)	Yes	-	Yes	Yes
Alternative Conservative (AC)	Yes	No	No	Yes

Rakennusten luokittelu (YMa:n pohjalta)

Table 4. Classification of buildings in different risk categories.

Risk Category	Exemplar building(s)	
Low	One storey, general, height no greater than 9 m	
Low+	Two-storey, general, height no greater than 9 m	
Moderate	<p>One-storey:</p> <ul style="list-style-type: none"> - accommodation premise with more than 50 places - institution with more than 25 places - assembly and business premise with more than 250 people 	One-storey, general, height exceeding 9 m
Moderate+	Two-storey, general, height exceeding 9 m	
High	<p>Two-storey:</p> <ul style="list-style-type: none"> - accommodation premise with more than 50 places - institution with more than 25 places - assembly and business premise with more than 250 people 	More than two storeys, height no greater than 28 m
High+	More than two storeys, height exceeding 28 m	

Suunnitteluperusteet 1 (1a tai 1b)

- Palokuorman fraktiili, oletukset liittyen sprinklerilaitteistoon, hyväksymiskriteeri (vaadittu kestävyys palossa)
- Suunnitteluun valitaan perusteet 1a **tai** 1b

Table 5. Basis of Design (BOD) 1a and 1b (fractile of the fire load, the level of conservatism applied for sprinkler system and the acceptance criteria by risk category of the building).

	Risk Category of the Building					
	Low	Low+	Moderate	Moderate+	High	High+
BOD 1a	80 % C	80 % * VC	80 % VC	80 % * VC	80 % * VC	95 % ** VC
BOD 1b	50 % EC	50 % -	50 % -	50 % -	50 % -	90 % -
Acceptance Criteria 1 – Required fire resistance time	30 min	30 min	60 min	60 min	Full Fire	Full Fire

* At least 600 MJ/m²

** At least 900 MJ/m²

BOD 1a
TAI
BOD 1b

Suunnitteluperusteet 2

- ”Tarkistuscase”, joka toteutunee usein automaattisesti
- RSET = Required Safe Egress Time

Table 6. Basis of design (BOD) 2 (fractile of the fire load, the level of conservatism applied for sprinkler system and the acceptance criteria by risk category).

Risk Category	Low	Low+	Moderate	Moderate+	High	High+
BOD 2	80 % -	80 % * -	80 % -	80 % * -	80 % * -	95 % ** -
Acceptance Criteria 2 – Required fire resistance time	RSET	RSET	RSET	RSET	RSET	RSET

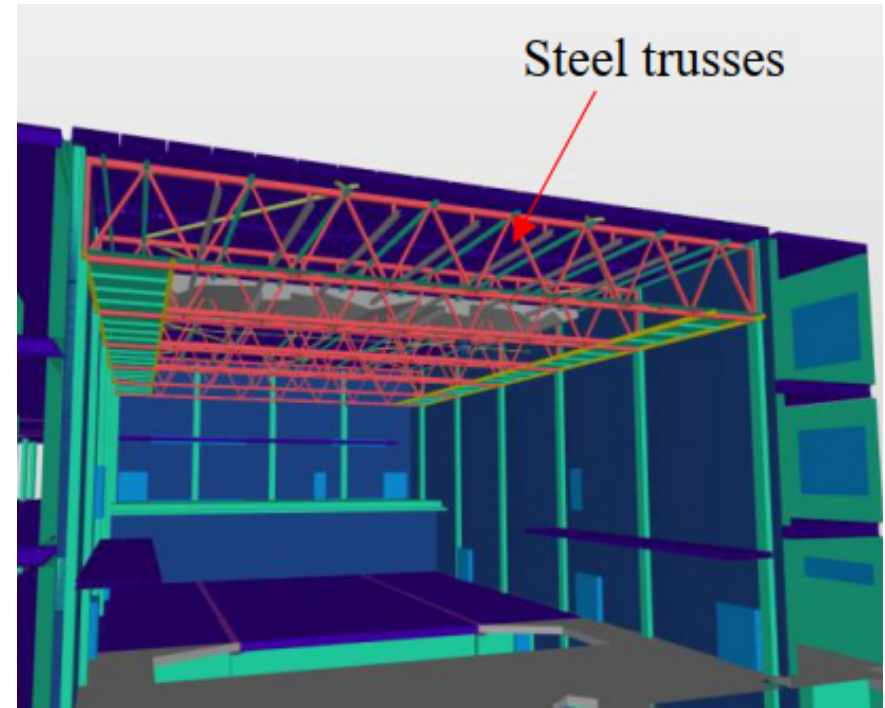
* At least 600 MJ/m²

** At least 900 MJ/m²

Case-esimerkkejä

Teräsrakenne, sprinklattu kohde

- Musiikkitalo
- 15 m korkea
- 3 kerrosta
- 1350 henkilöä



Sprinklauksen huomioon ottaminen (BOD 1)

Table 5. Basis of Design (BOD) 1a and 1b (fractile of the fire load, the level of conservatism applied for sprinkler system and the acceptance criteria by risk category of the building).

	Risk Category of the Building					
	Low	Low+	Moderate	Moderate+	High	High+
BOD 1a	80 % C	80 % * VC	80 % VC	80 % * VC	80 % * VC	95 % ** VC
BOD 1b	50 % EC	50 % -	50 % -	50 % -	50 % -	90 % -
Acceptance Criteria 1 – Required fire resistance time	30 min	30 min	60 min	60 min	Full Fire	Full Fire

* At least 600 MJ/m²

** At least 900 MJ/m²

Sprinklauksen huomioon ottaminen (BOD 2)

Table 6. Basis of design (BOD) 2 (fractile of the fire load, the level of conservatism applied for sprinkler system and the acceptance criteria by risk category).

Risk Category	Low	Low+	Moderate	Moderate+	High	High+
BOD 2	80 % -	80 % * -	80 % -	80 % * -	80 % * -	95 % ** -
Acceptance Criteria 2 – Required fire resistance time	RSET	RSET	RSET	RSET	RSET	RSET

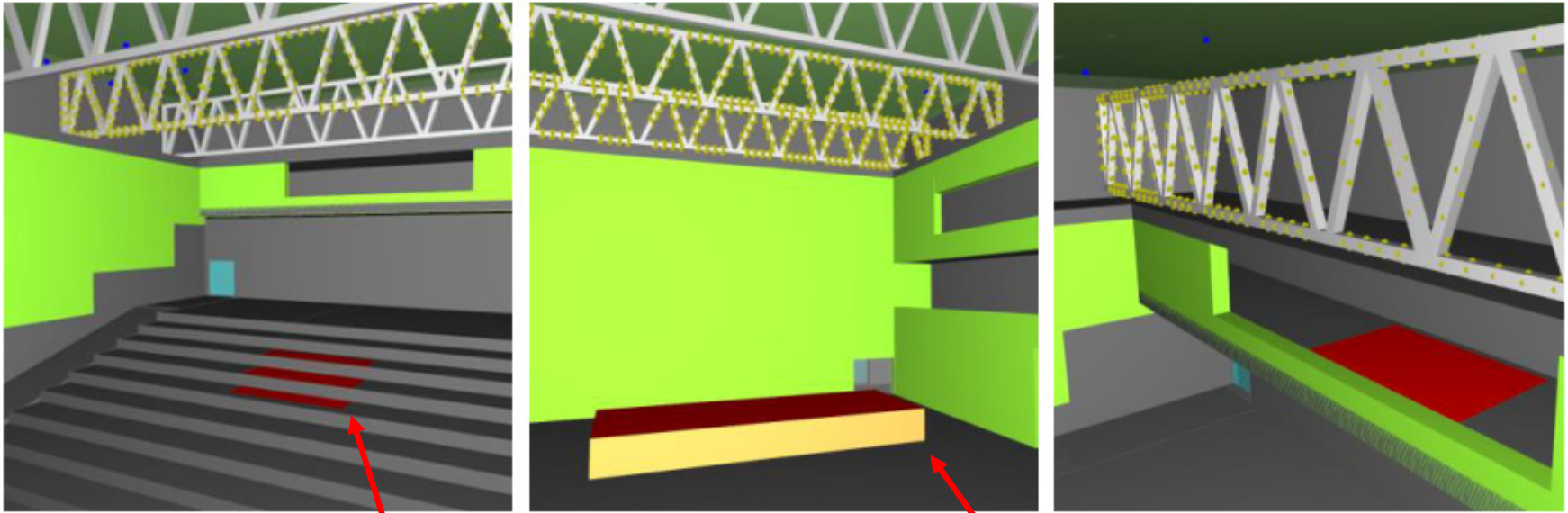
* At least 600 MJ/m²

** At least 900 MJ/m²

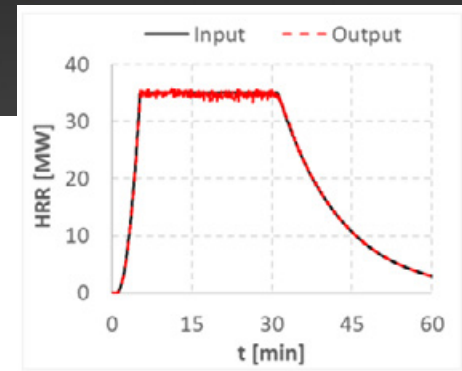
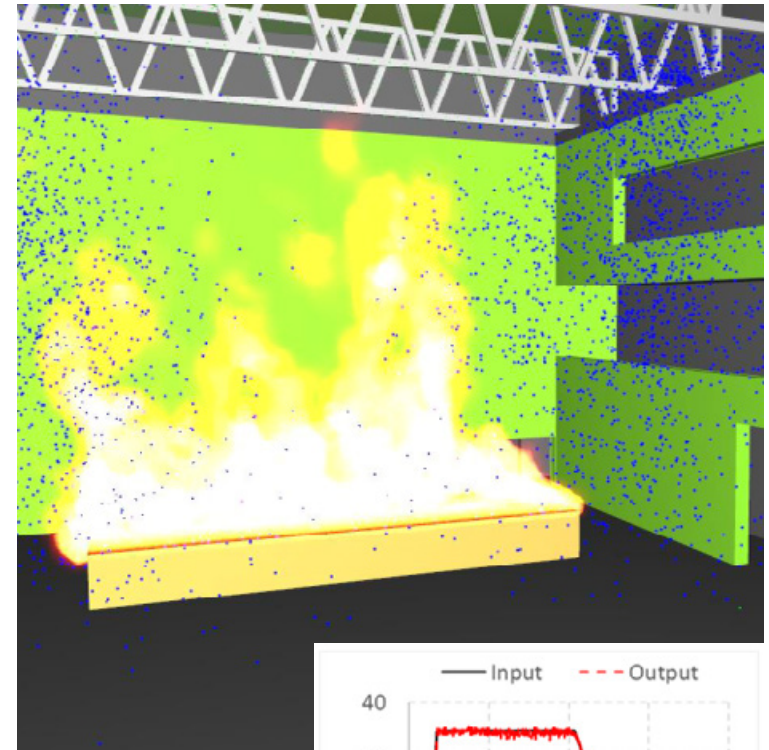
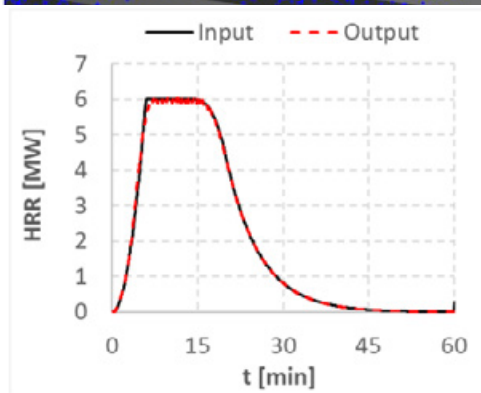
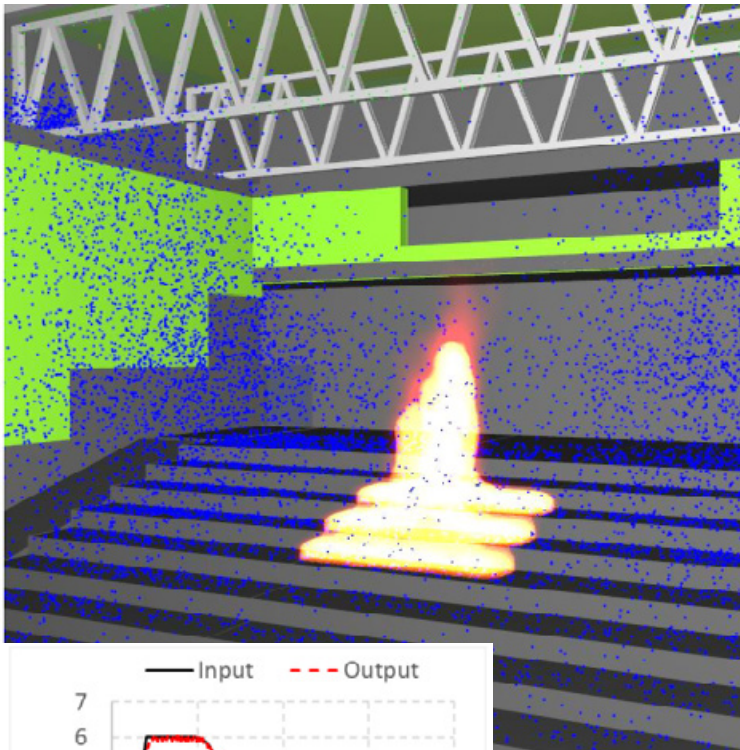


11 min 30 s

Analyysit

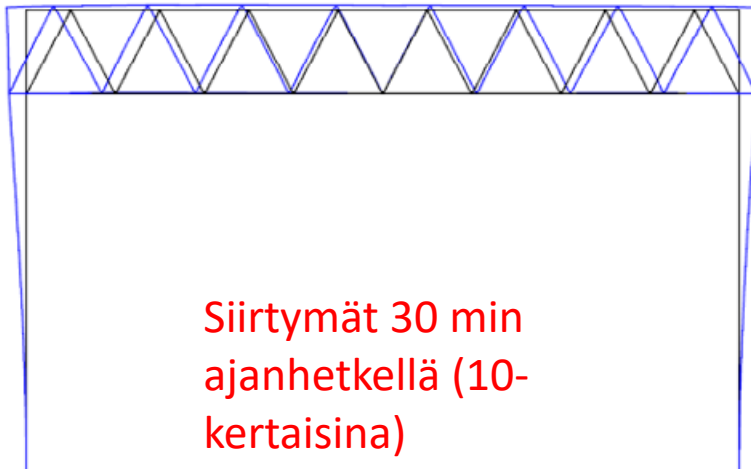
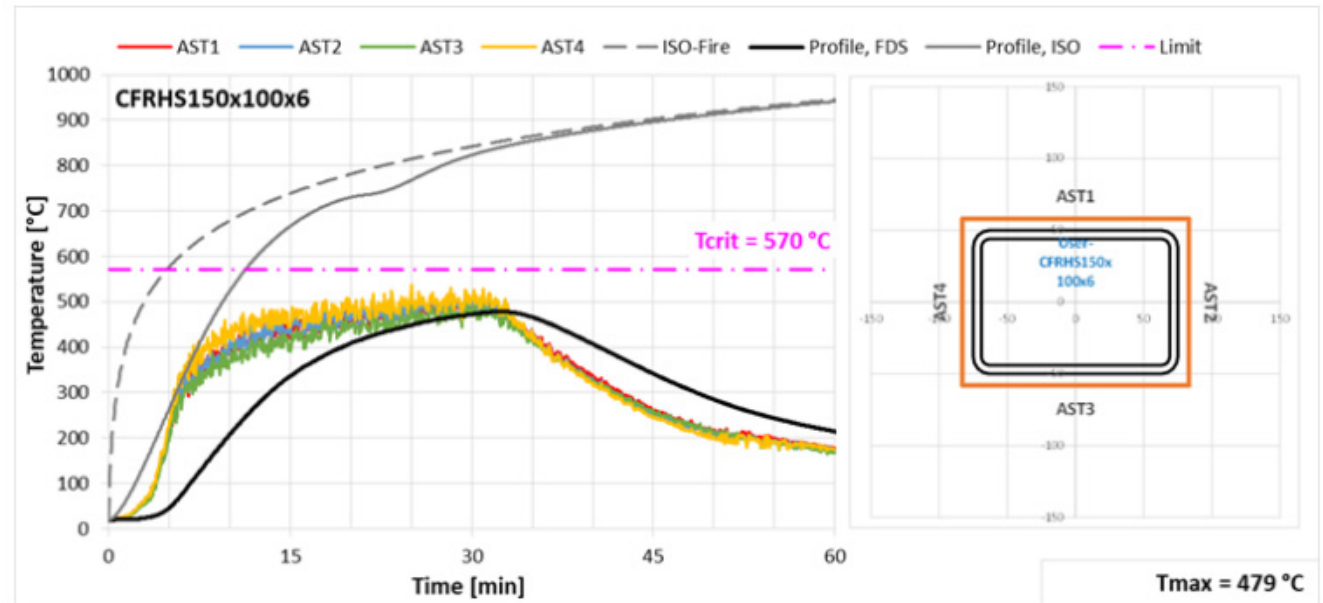


Tulokset



Tulokset

Kuumimman profiilin
lämpötilakehitys



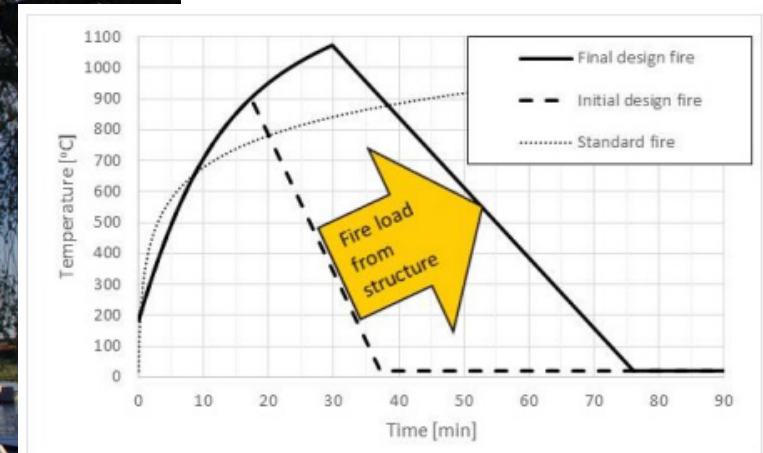
SAFIR-malli koko
rakenteen toiminnasta,
kuten Eurokoodit
käytännössä edellyttävät



R15-rakenne täyttää
Suunnitteluperusteiden 1 ja 2
hyväksymiskriteerit

Puukohteita

- 14- ja 6-kerroksiset puukerrostalot
- Toiminnallinen mitoitus piti sisällään mm. parametriset palotarkastelut ja hiiltymälaskelmat



Yhteenveto

Yhteenveto

- YM asetuksessa ja Eurokoodit mahdollistavat hyvin rakenteiden toiminnallisen palomitoituksen
- Em. sisältävät menetelmiä ja määräyksiä toiminnalliseen mitoitukseen
- Em. eivät sisällä kuitenkaan kaikkea tarpeellista yksikäsitteisesti (ainakaan vielä) liittyen mm. teräs- ja puurakenteisiin sekä sprinklauksen hyödyntämiseen
- Menetelmien kehittäminen on yhteistyötä (tutkimuslaitokset, viranomaiset, suunnittelijat...)

Kiitos! Kysymyksiä?

Mikko Salminen

Johtava asiantuntija

mikko.salminen@kauriala.fi