



# **Teräsrakenteen palonsuojamaalauksen suunnittelu - kustannusten näkökulma**

Teemu Tiainen

Tampereen teknillinen yliopisto,  
Metallirakentamisen tutkimuskeskus

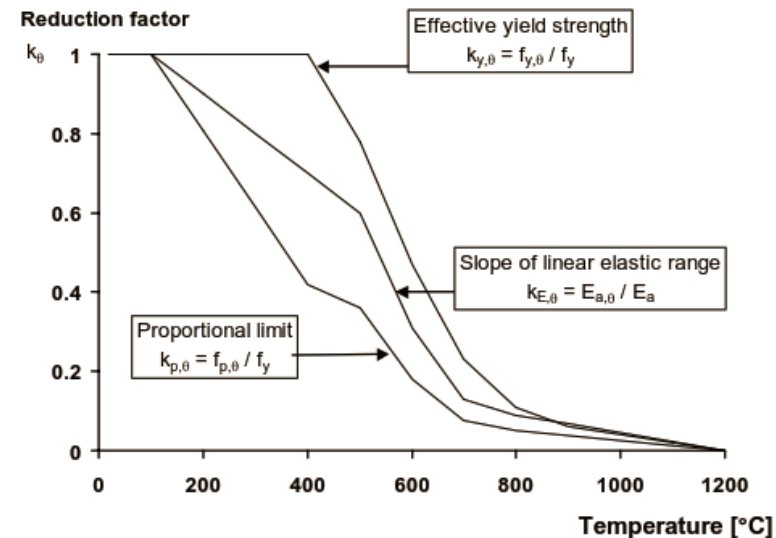
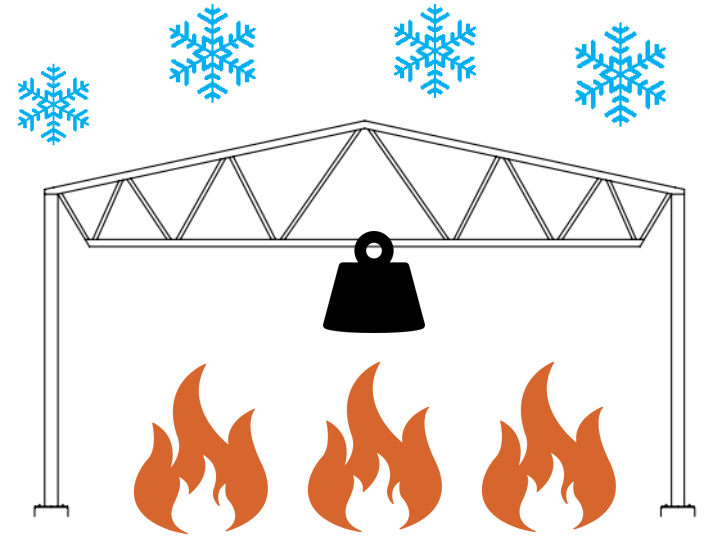
Mukana tutkimuksissa myös Kristo Mela,  
Timo Jokinen ja Markku Heinisuo

# Taustaa



# Taustaa

- **Lämpötilan noustessa** teräksen kimmokerroin ja myötölujuus alenevat => **kantavuus alenee**
- Riittävän kestoajan varmistamiseksi käytetään erilaisia suojaustapoja
- Toisinaan laskennallisin tarkasteluin voidaan osoittaa riittävä turvallisuustaso ilman suojauksia (*toiminnallinen mitoitus*)



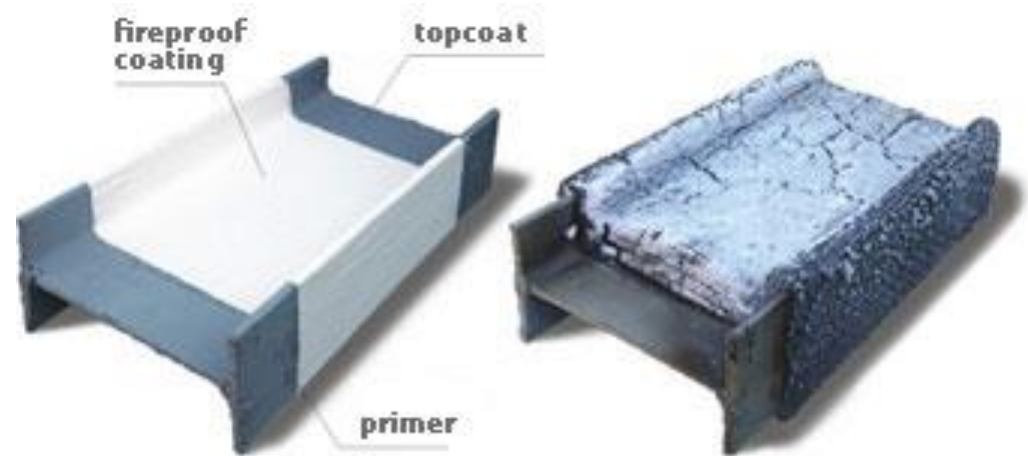
# Suojaustapoja

- Aktiivinen palosuojaus
  - Automaattinen sammutuslaitteisto, vesisumutus
- Passiivinen palosuojaus
  - Ylimitoitus
  - Kotelointi
  - **Paisuva palosuojamaali**
- Suojausmenetelmien yhdistelmä



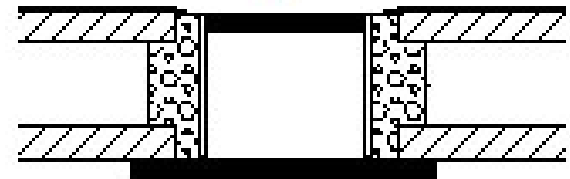
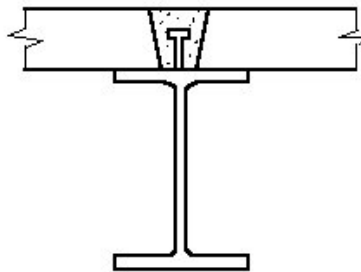
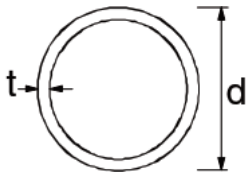
# Palosuojamaali

- Turpoaa lämpötilan vaikutuksesta (jopa 50-kertaiseksi) ja eristää rakennetta palolta.
- Maalikerrokset paksuja jo ennen paisumista 0,2 - 5,0 mm → suhteellisen kallista.
- Tuotteita tarjolla paljon, myös erilaisiin sää-, lämpö- ja kosteusrasitusolosuhteisiin
- Pohja- ja pintamaalit tulee olla yhteensopivat



# Palonsuojamaalauksen suunnittelu

- Ohjeissa annetaan maalipaksuudet yleensä **kriittisen lämpötilan** ja **poikkileikkaustekijän** ( $A/V$ ) funktiona vaadituille **palonkestoajoille**
- Yleensä eri taulukot / ohjeet avoprofiileille ja putkille ja erilaisille altistustapauksille
- Mitoitustaulukot tuotekohtaisia



# Palomaalauksen suunnittelu

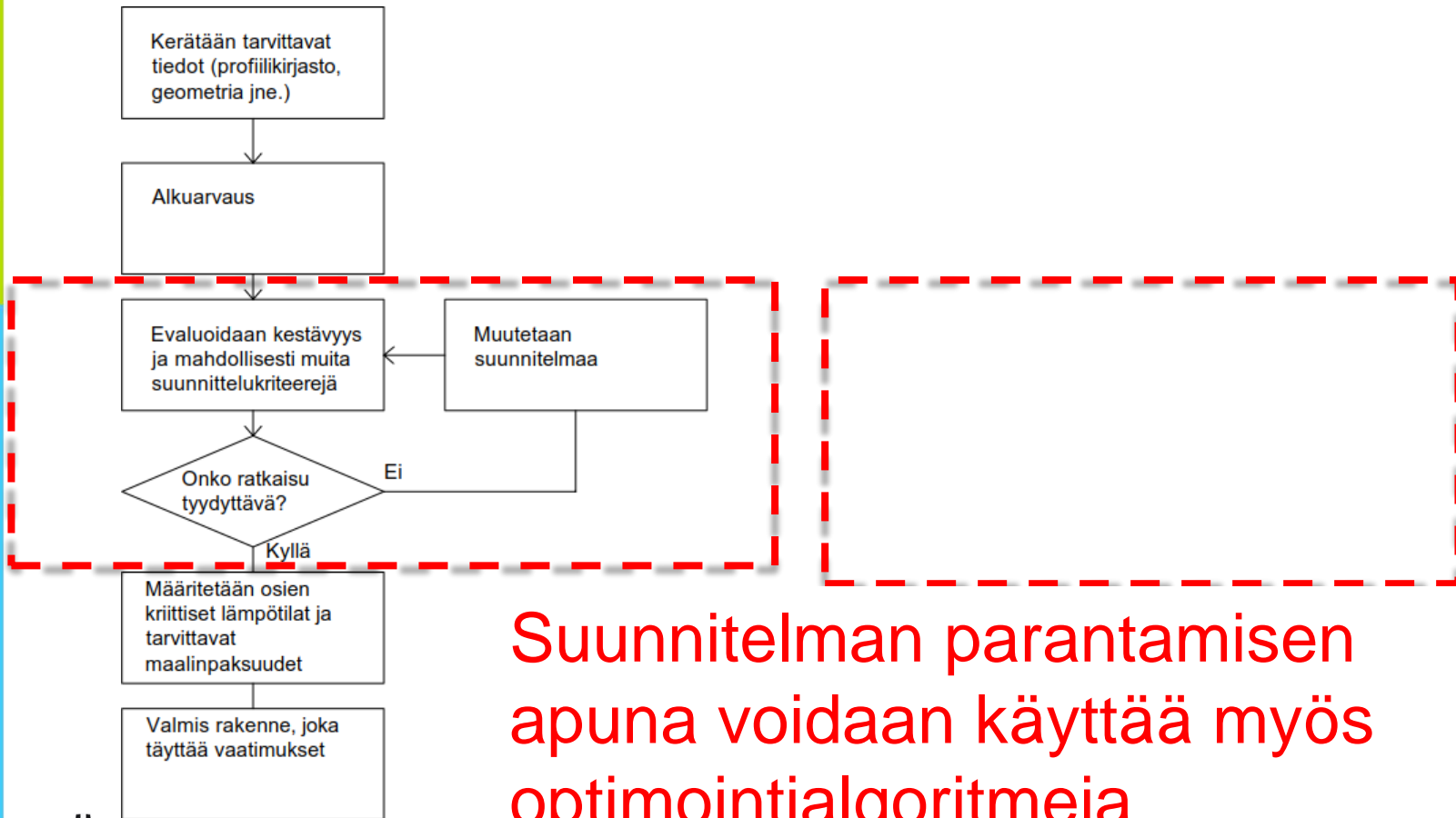
Poikkileikkaustekijän kasvaessa kalvo kasvaa,  
kriittisen lämpötilan kasvaessa kalvo ohenee

$A/V \backslash T$	350	400	450	500	550
70	1.465	1.187	0.993	0.847	0.730
75	1.569	1.272	1.064	0.908	0.790
80	1.674	1.357	1.135	0.968	0.840
85	1.778	1.442	1.200	1.029	0.890
90	1.883	1.526	1.277	1.089	0.940
95	1.988	1.611	1.348	1.150	0.990
100	2.092	1.696	1.419	1.210	1.040
105	2.197	1.781	1.490	1.271	1.090
110	2.302	1.866	1.561	1.331	1.140



# Palonsuojamaalauksen suunnittelu

## Perinteinen tapa



Suunnitelman parantamisen apuna voidaan käyttää myös optimointialgoritmeja





# Kustannuslaskenta

- Kirjallisuudessa paljon eri lähestymistapoja tarjolla esim. määräpohjaisesti
- Eräs tuoreimmista **piirre pohjainen** lähestymistapa [Haapio, 2012], jolla saadaan hyvinkin tarkka arvio kustannuksista

$$C_k = \frac{(T_{Nk} + T_{Pk}) (C_{Lk} + C_{Eqk} + C_{Mk} + C_{Rek} + C_{Sek})}{u_k} + T_{Pk} (C_{Ck} + C_{Enk}) + C_{Ck}$$

- Tarkkaan arviointiin tarvitaan kuitenkin hyvin yksityiskohtaista tietoa työvaiheiden kestosta, laitteistosta, tilavaatimuksista jne.



# Numeeriset esimerkit

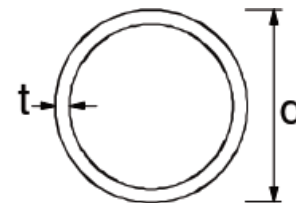
Tarkastellaan kahta esimerkkiä:

- Yksittäinen sauva, karkea kustannuslaskenta
- Kokonainen ristikko, yksityiskohtaisempi kustannuslaskenta



# Esimerkki 1: puristettu sauva

- Tarkastellaan pyöreästä putkesta valmistettavaa sauvaa, pituus 4 m, kuorma 500 kN puristus, palotilanteen kuorma 200 kN, kestävyys lasketaan **EN 1993-1-1** mukaisesti, tapaukset R30 ja R60
- Sovelletaan mainittua kahta lähestymistapaa suunnitteluun sekä optimointia
- Kustannusoptimointiin tarvitaan kustannustietoa, arvioidaan rohkeasti:
  - teräs 2 €/kg (sis. kaikki työstöt)
  - palonsuojamaali 30 €/mm/m<sup>2</sup>



# Esimerkki 1: puristettu sauva

- Teräsmäärän minimoiva poikkileikkaus  
 $d = 182 \text{ mm}$ ,  $t = 3,9 \text{ mm}$   
Pyöreälle putkelle poikkileikkaustekijä  
 $A/V = 1/t = 255$   
 $\Rightarrow$  **Kriittinen lämpötila**  $T = 582^\circ\text{C}$
- Luetaan kalvon paksuus taulukosta vaatimuksille R30 ja R60  $\Rightarrow$   
**R30:** 0,73 mm      **R60:** 1,93 mm
- Pilareille näin kustannukset:  
**R30:** 201 €      **R60:** 305 €



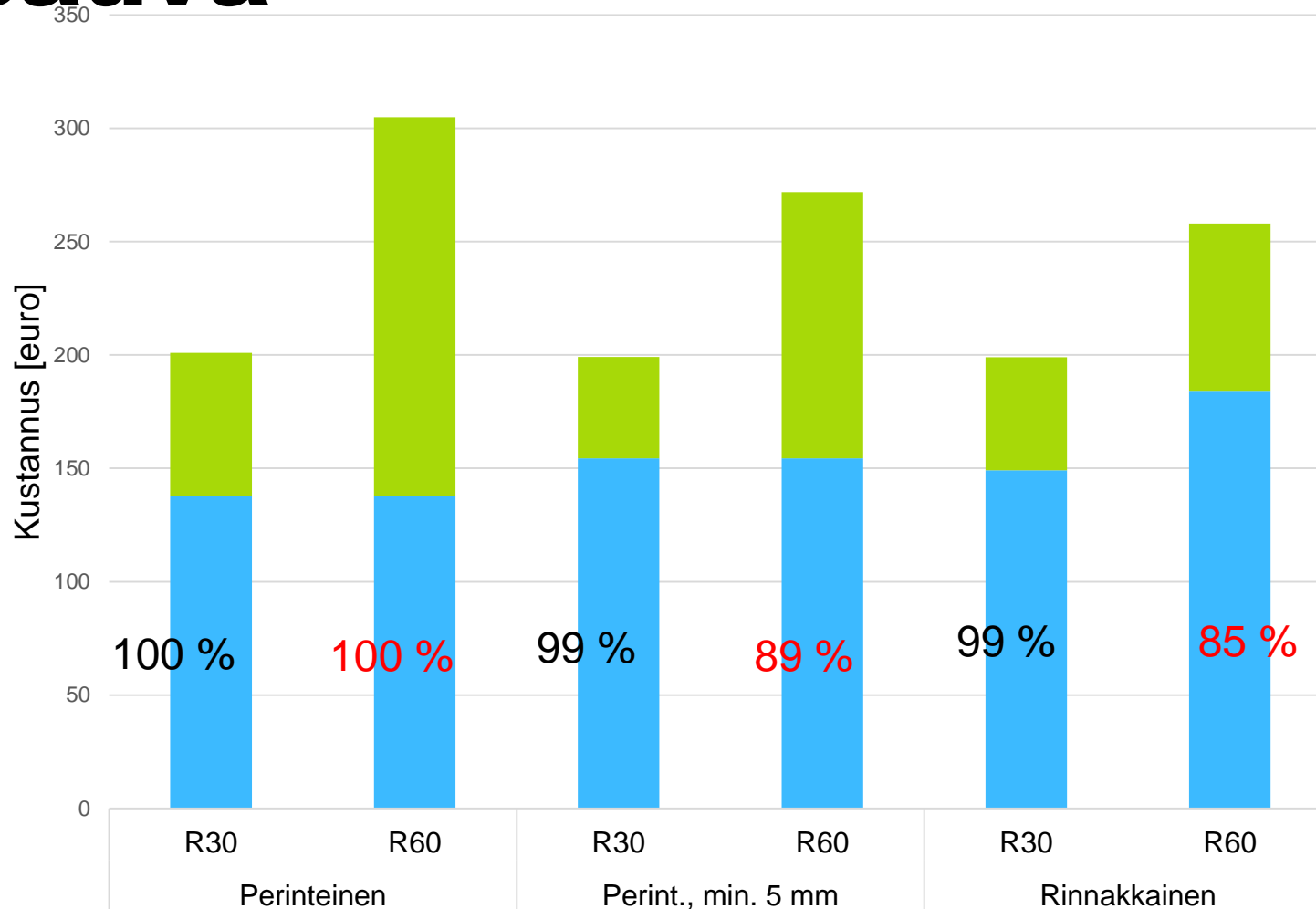
# Esimerkki 1: puristettu sauva

- Lasketaan edelleen vaatien seinämälle **vähintään 5 mm paksuus** (TRY:n ohje 2017 suositus) sekä
- Rinnakkaisella lähestymistavalla optimoidaan suoraan kokonaiskustannusta

	Perinteinen		Perint., min. 5 mm		Rinnakkainen	
Vaatimus	R30	R60	R30	R60	R30	R60
t [mm]	3,9	3,9	5,0	5,0	4,6	7,0
d [mm]	182	182	162	162	168	141
A [mm <sup>2</sup> ]	2194	2194	2460	2460	2370	2932

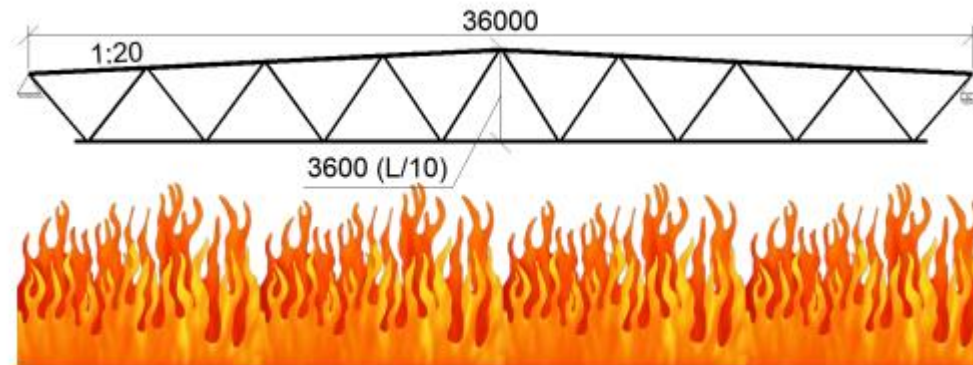


# Esimerkki 1: puristettu sauva



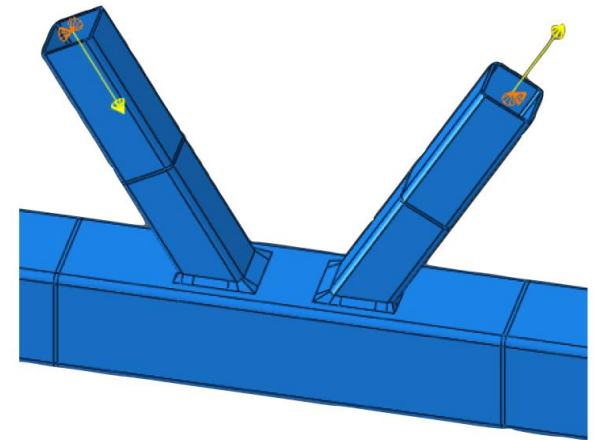
# Esimerkki 2: kattoristikko

- Tarkastellaan kuvan hitsattua putkiristikkoa
- Yläpaarteella tasainen kuorma  
murtorajatilassa  $q = 23,5 \text{ kN/m}$   
palossa  $q_{\text{palo}} = 0,4q = 9.4 \text{ kN/m}$



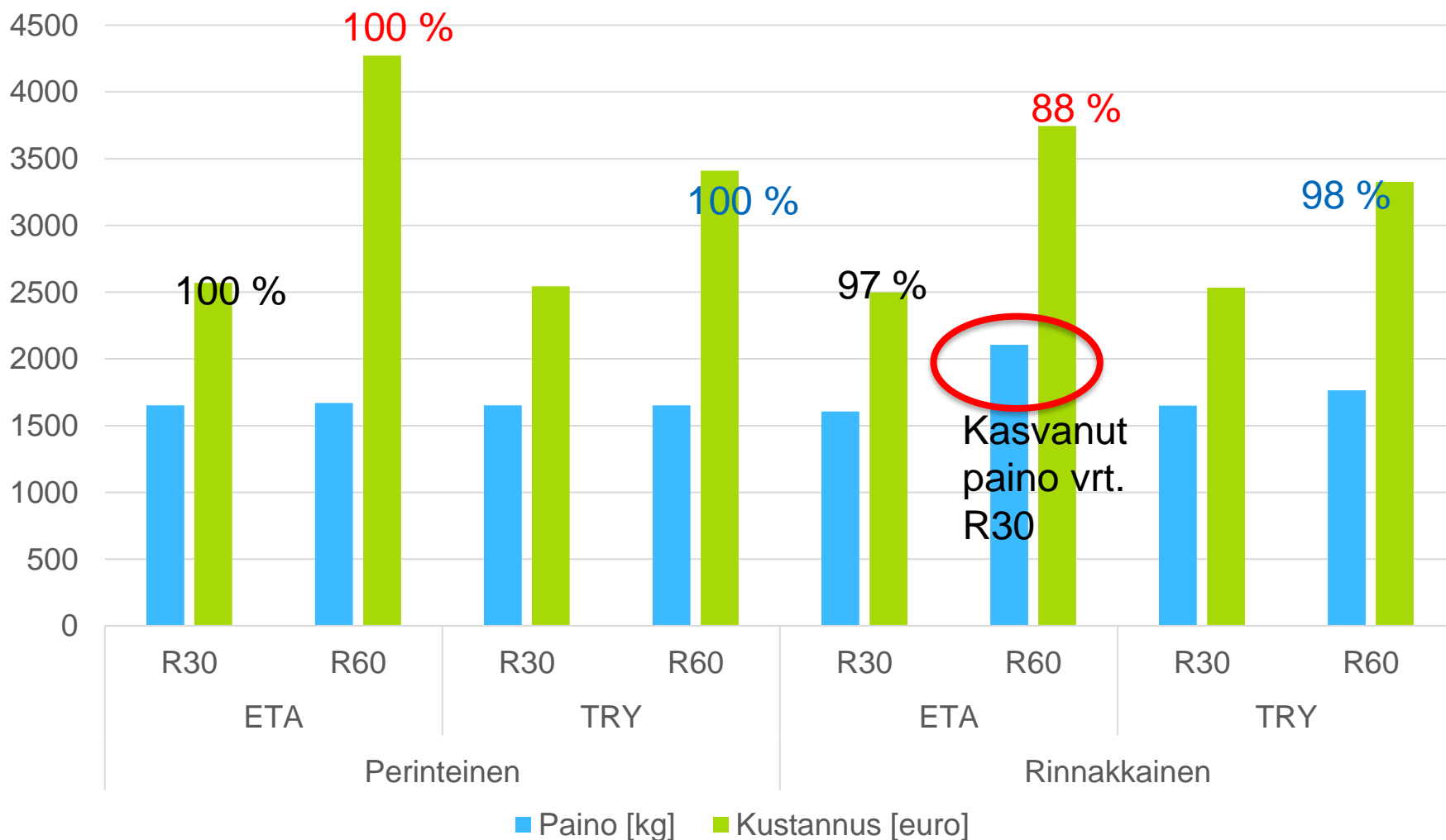
# Esimerkki 2: kattoristikko

- Valmistuskustannus edellistä esimerkkiä tarkemmin (profiilien katkaisu, raepuhallus, hitsaus, pohja- ja pintamaalaus sekä palomaalaus) piirrepohjaisella menetelmällä
- Sauvojen ja liitosten vaaditaan täyttävän **EN 1993-1-1** ja **EN 1993-1-8** vaatimukset
- Edelleen sovelletaan kahta mainittua suunnittelulähestymistapaa ja optimointia



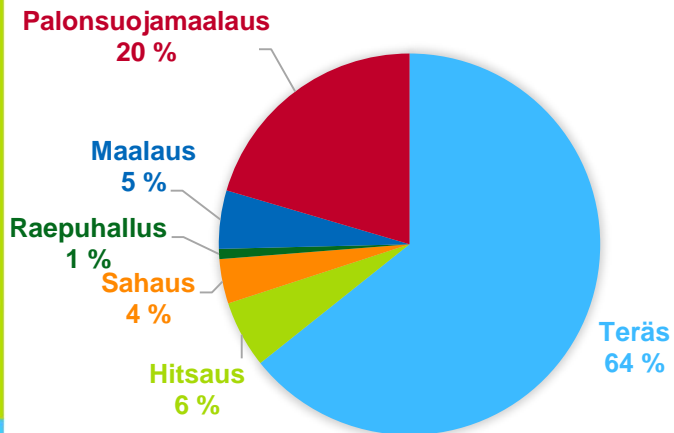


# Esimerkki 2: kattoristikko

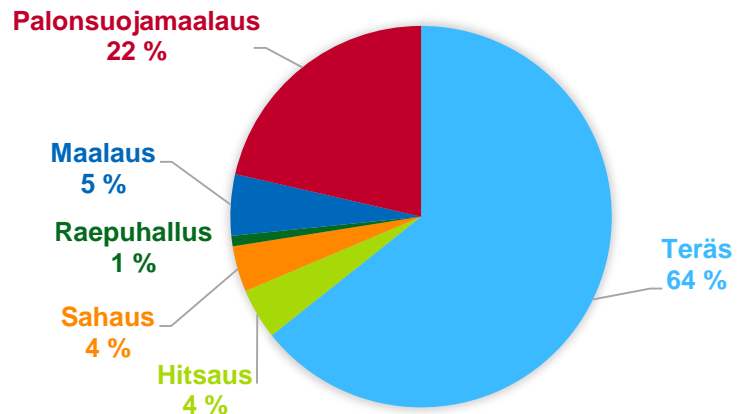


# Esimerkki 2: kattoristikko

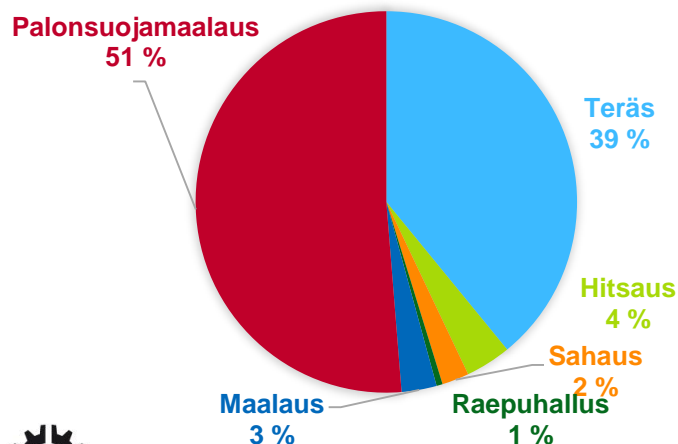
## PERINTEINEN R30



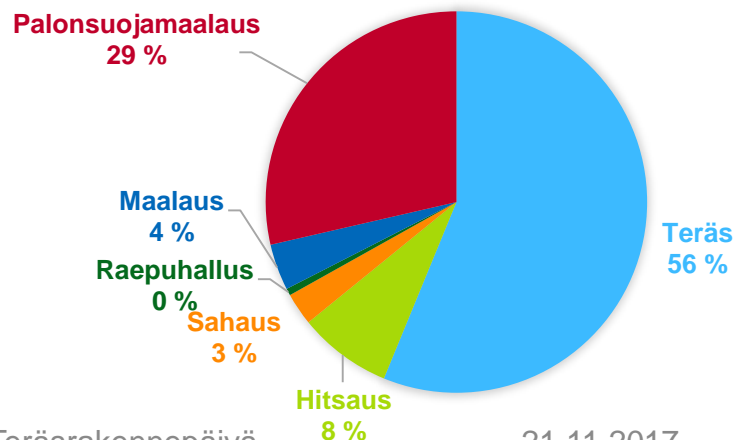
## RINNAKKAINEN R30



## PERINTEINEN R60



## RINNAKKAINEN R60



# Esimerkki 2: kattoristikko

Kirjallisuutta:

\*Jokinen, Mela, Tiainen, Heinisuo (2016), ”*Optimization of Tubular Trusses Using Intumescent Coating in Fire*”, *Rakenteiden mekaniikka* 49(4), s. 160-170.

\*Haapio (2012), ”*Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach*”, väitöskirja, TTY.



# Loppuhuomioita

- Palonsuojamaalaus saattaa teräsrakenteessa edustaa jopa useita kymmeniä prosentteja valmistuskustannuksesta
- Yleensä **paino-optimi  $\neq$  kustannusoptimi**, etenkin, kun rakenne suojataan palomaalilla
- Taloudellisen kokonaisratkaisun suunnittelu edellyttää palotilanteen huomioon ottamista samanaikaisesti muiden tarkastelujen kanssa (vaatimus  $> R60$ )
- Kustannusoptimointi edellyttää jonkin verran tietoa kustannuksista, tarvitaan vuoropuhelua suunnittelun ja tuotannon välillä

