

Teräsrakenteiden suora mitoitusmenetelmä

Mitoitusparadigman muutos

Kristo Mela
Apulaisprofessori
Tampereen yliopisto
kristo.mela@tuni.fi

Nykyinen mitoitusmenettely (esim. EN 1993)

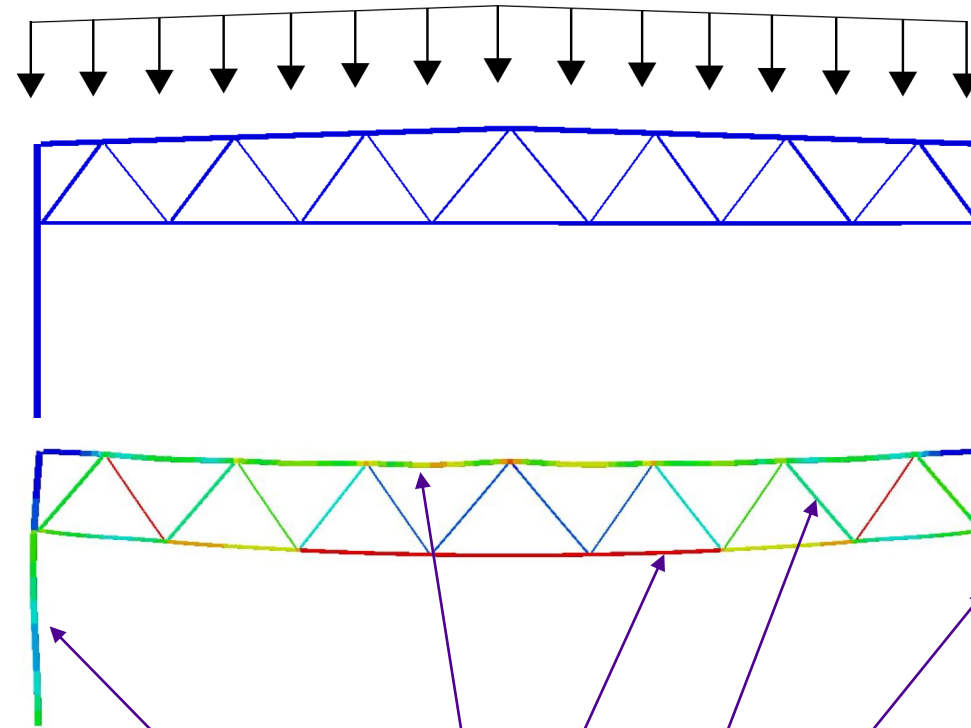
0. Laskentamalli



1. Rakenneanalyysi



2. Rakenneosien mitoitus



EN 1993-1-1:

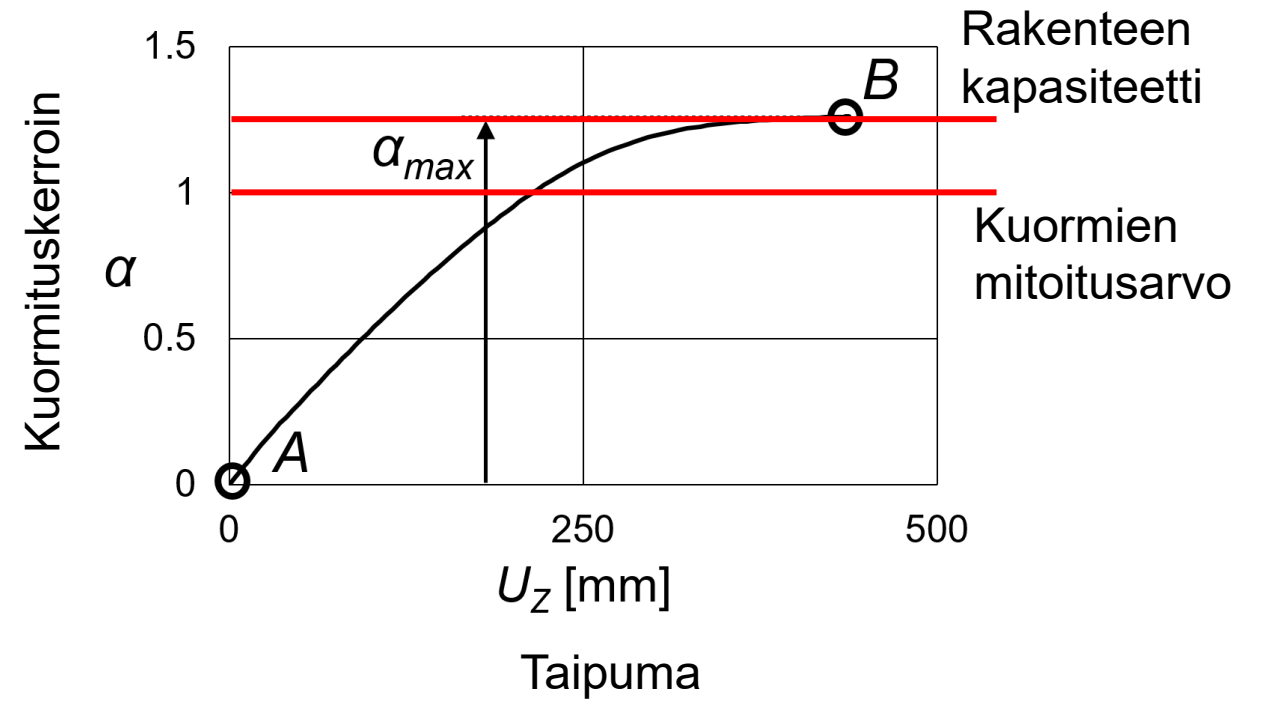
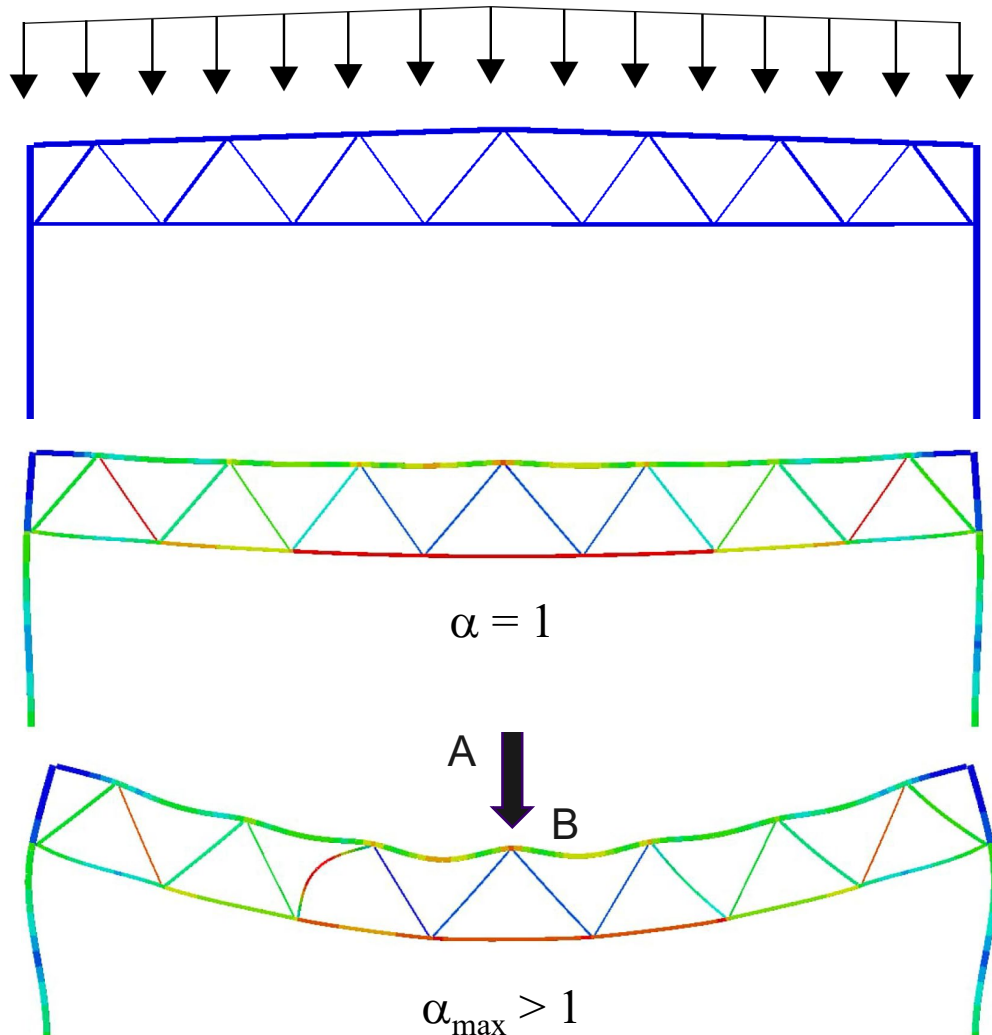
$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

Eurokoodin mitoitusperiaate:

Rakennejärjestelmän
kuormankantokyky saavutetaan,
kun ***yhden rakenneosan*** (sauva tai
liitos) saavutetaan.

Rakennejärjestelmän kuormankantokyky



***Miten rakennejärjestelmän
täyttää kapasiteettia voitaisiin
hyödyntää mitoituksessa?***

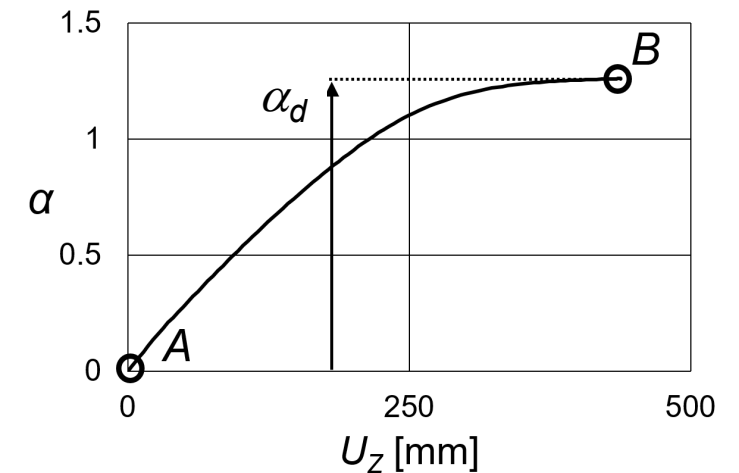
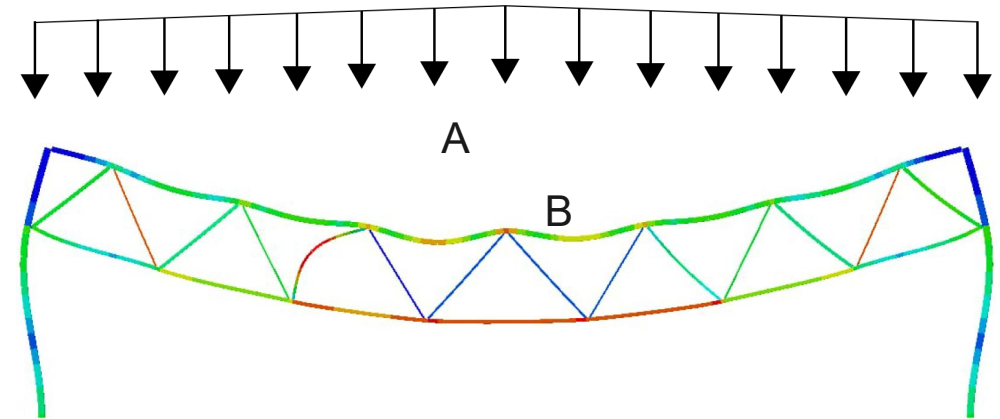
Suora mitoitusmenetelmä – Direct Design Method (DDM)*

Koko rakenteen (järjestelmän) mitoitusehto:

$$\frac{\alpha_d}{\gamma_S} \geq 1$$

α_d = kapasiteettia vastaava
kuormituskerroin GMNIA-analyysissä

γ_S = **systeemivarmuuskerto**
(system safety factor)



* Zhang H, Shayan S, Rasmussen K, Ellingwood B (2016) *System-based design of planar steel frames, I: Reliability framework*. Journal of Constructional Steel Research 123: 135-143.

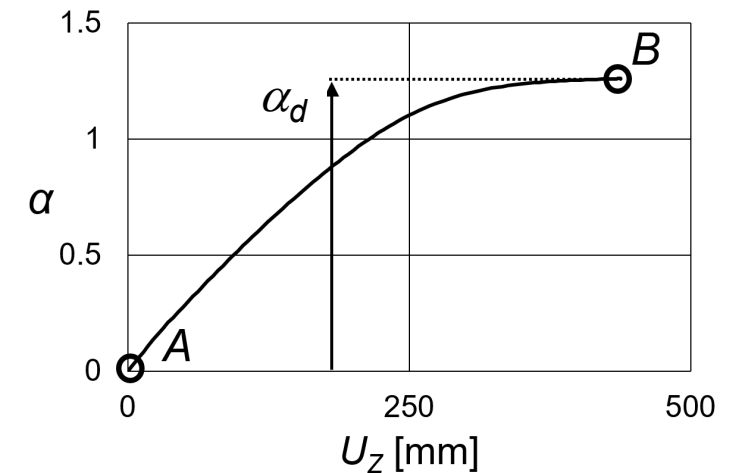
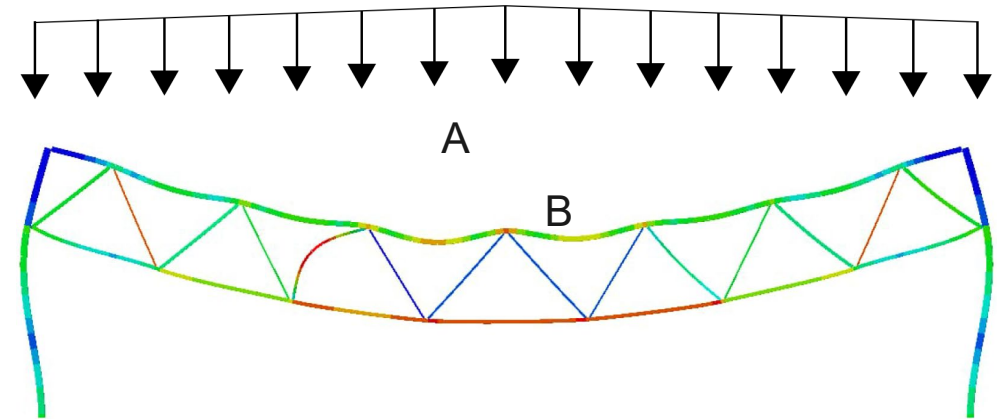
Suora mitoitusmenetelmä – Direct Design Method (DDM)*

Kuormituskertoimen määritelmä:

$$\alpha_d = \frac{R_n}{\sum_i \gamma_i Q_{ni}}$$

R_n = rakennejärjestelmän **nimelliskestävyys**

$\sum \gamma_i Q_{ni}$ = kuormien mitoitusarvo (yhdistely)



* Zhang H, Shayan S, Rasmussen K, Ellingwood B (2016) *System-based design of planar steel frames, I: Reliability framework*. Journal of Constructional Steel Research 123: 135-143.

Suora mitoitusmenetelmä – *Miksi?*

1. Ulosmitataan nykyisin saatavilla oleva laskentakapasiteetti
2. Annetaan insinöörien käyttää epälineaarisen laskennan osaamistaan mitoituksessa
3. Ei tarvita Eurokoodin erillisiä mitoituskaavoja

Suora mitoitusmenetelmä – *Miten?*

Eurokoodi (3. sukupolvi!)

1. Määrittelee, miten **kuormat** ja **kuormitusyhdistelyt** määritetään.
2. Kertoo, miten rakenteen **nimelliskestävyys** lasketaan (nimellismallin muodostaminen).
3. Antaa **systeemivarmuuskertoimen** arvot.

$$\alpha_d = \frac{R_n}{\sum_i \gamma_i Q_{ni}} \quad \frac{\alpha_d}{\gamma_s} \geq 1$$

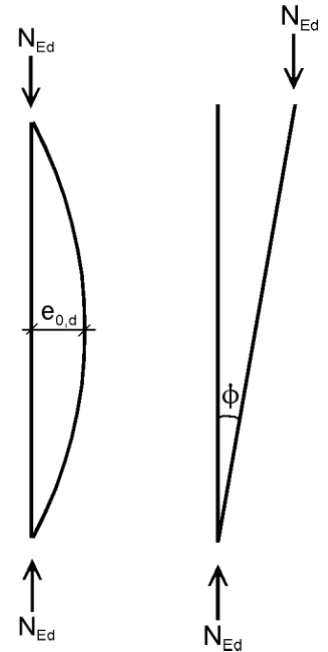
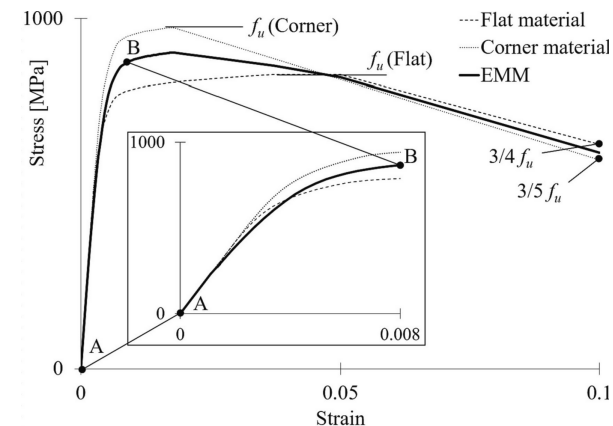
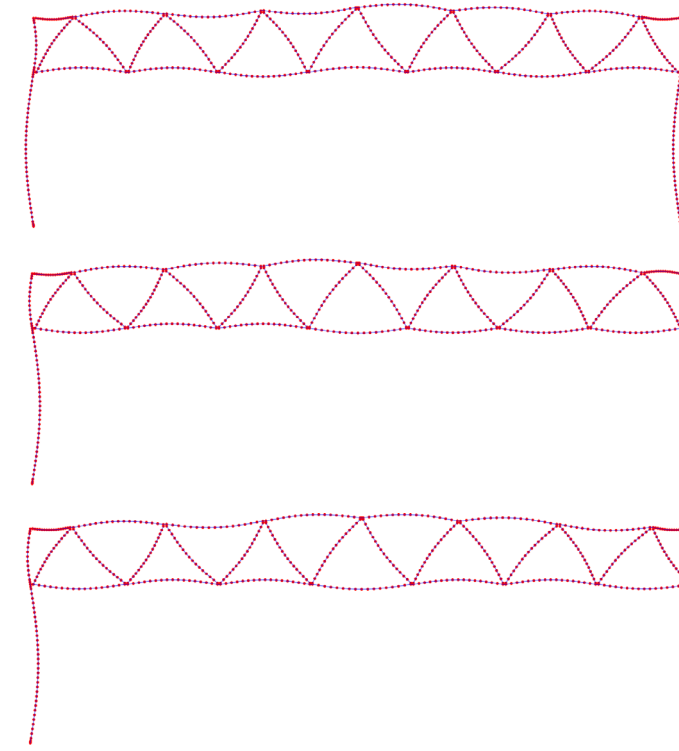
Suunnittelija (osaava)

1. Määrittää rakennejärjestelmän ja katsoo varmuuskertoimen normista.
2. Muodostaa nimellismallin ja tekee mitoituksen epälineaarisen rakenneanalyysin kautta suoraan.
3. Nauttii elämästä. 😎

1. Miten nimellismalli pitäisi muodostaa?
2. Miten systeemivarmuuskerroin määritetään?

Nimellismalli - Teräsrakenteet

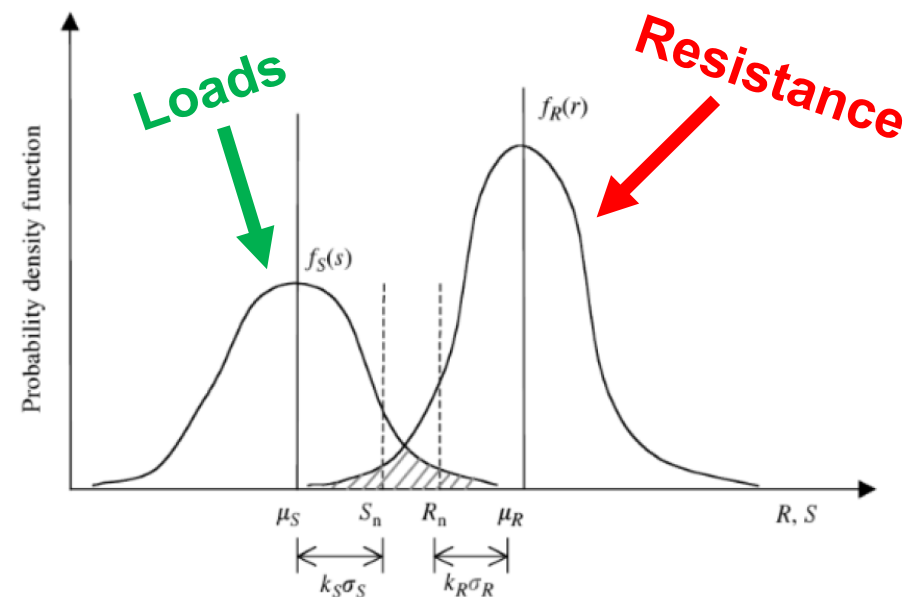
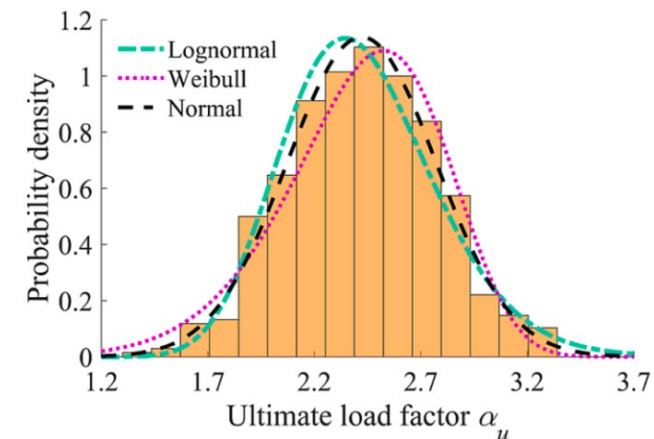
- Geometrisesti ja materiaalisesti epälineaarinen malli, jossa epätarkkuudet ovat mukana.
- Ennaltamäärätty **materiaalimalli**, joka sisältää jäännösjännitykset.
 - Jäännösjännityksiä ei sisällytetä geometrisiin epätarkkuuksiin!
- **Geometriset epätarkkuudet:** i) globaalit (“alkuvinous”) ja ii) lokaalit (“alkukaarevuus”).
 - Alkukaarevuuden muoto ja amplitude täytyy päättää.
 - Rakenteen kantokyky voi riippua alkukaarevuuksien suunnista: voidaan joutua analysoimaan rakenne erisuuntaisilla alkukaarevuuksilla.
- Kapasiteetti saavutetaan, kun
 - siirtymät kasvavat hallitsemattomasti tai
 - rakenteen jäykkyys putoaa murto-osaan alkujäykkyyydestä.
- **Liitosten** käyttäytyminen pitäisi myös mallintaa sopivalla tavalla.



$$e_0 = \frac{L}{1000}$$

Systemivarmuuskerroin γ_S

- Systeemitason **luotettavuusanalyysi**
 1. Systeemin kestävyys tilastollinen jakautuma määritetään Monte Carlo –simulointien avulla
 2. Kuormien jakautumat saadaan kirjallisuudesta (mm. EN 1991 tausta-aineisto)
 3. Luotettavuusindeksi β ja sitä vastaava γ_S saadaan ensimmäisen kertaluvun luotettavuusmenetelmän avulla (First-Order Reliability Method, FORM)
- Tarvitaan materiaalien ja geometrisen suureiden tilastolliset jakautumat.
 - Tarkastellaan eri kuormitusyhdistelmiä
 - Kaikkien oleellisten vauriomuotojen pitäisi esiintyä simuloinneissa
- Varmuuskerroin γ_S on **rakenneperhekohtainen**
 - Rakenneperheiden määrittely edellyttää tutkimusta.
 - Rakenneperheet pitäisi tunnistaa standardissa.



Manoj N (2016) First-order Reliability Method: Concepts and Application, Additional Graduation Thesis, Delft University of Technology.

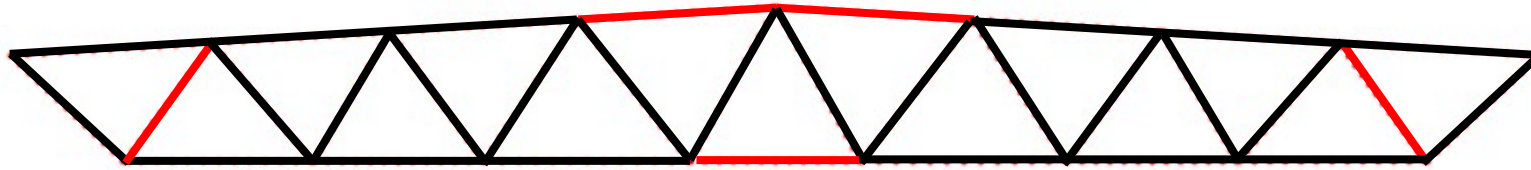
Suora mitoitusmenetelmä Eurokoodeihin?

Suora mitoitusmenetelmä (DDM) & Eurokoodit

- DDM on yhteensopiva rajatilamitoitusperiaatteen kanssa.
- Eurokoodin pitäisi sisältää ohjeistusta (ainakin) seuraaviin kohtiin:
 - 1) **Systeemitason luotettavuusvaatimukset**
(luotettavuusindeksin tavoitetaso)
 - 2) **Ohjeet γ_s :n määrittämiseksi** tietylle rakenneperheelle
 - Kuormien ja kestävyysparametrien tilastolliset jakautumat
 - FORM-proseduuri
 - 3) **Nimellismallin konstruointi** (vrt. prEN 1993-1-14)
 - Materiaalimalli
 - Geometriset epätarkkuudet

$$\frac{\alpha_d}{\gamma_s} \geq 1$$

Systemitason luotettavuus



Oletus: EN 1993:n mukaan suunnitellussa ristikossa on 4 sauvaa, joiden käyttöaste on yli 98%



EN 1990:n vaatimus (luotettavuusluokka 2): **yksittäisen sauvan luotettavuusindeksi on 3.8**, jolloin vaurioitumistodennäköisyys sauvalle, jonka käyttöaste on $\approx 100\%$ on $P_{f,sauva} = 7.2348e-5$

Ristikön vaurioitumistodennäköisyys (= yksi tai useampi neljästä sauvasta vaurioituu):

$$P_f = 1 - \underbrace{\left(1 - P_{f,sauva}\right)^4}_{\text{Kaikki sauvat kestävät}} = 2.89 \cdot 10^{-4}$$

Tätä vastaava luotettavuusindeksin arvo on **3.44**



Voidaanko **rakennejärjestelmille** käyttää samoja luotettavuusindeksin arvoja kuin **rakennosille**?

Suora mitoitusmenetelmä (DDM) & Eurokoodit

prEN 1990: Annex X – Design assisted by numerical methods (luonnos 2024)

X.5 General

(1) Design based on numerical methods may be executed by one or a combination of the following two methods:

1. **Indirect design method:** verification is done based on the effects of actions (e.g. inner forces and stresses) obtained from the numerical model and the resistance obtained by the relevant resistance model specified in the appropriate Eurocode, for which partial factors have been calibrated and are provided in the same Eurocode.

2. **Direct design method** verification is done based on the effects of actions (e.g. inner forces and stresses) and the resistance obtained directly from the numerical model.

NOTE 1 The National Annex can specify the range of application of each of the above methods.

NOTE 2 EN 1992 to EN 1999 (all parts) can provide specific rules.

Suora mitoitusmenetelmä (DDM) & Eurokoodit

prEN 1990: Annex X – Design assisted by numerical methods (luonnos 2024)

X.9.5 Global resistance factor format

(1) A global resistance factor format may be used when design verifications are based on non-linear numerical analyses, in particular in cases where the progressive damaging of the structure and redistribution of internal forces are considered within the verifications.

(6) When applying (5), the design value of the resistance, R_d , should be determined after division of R_{NUM} , by the global resistance factor, γ_R (X.9.6)

$$R_d = \frac{R_{NUM}\{\eta X_{rep}; a_{rep}; \sum \lambda F_{Ed}\}}{\gamma_R} \quad (X.9.6)$$

where

X_{rep} are the representative values of the material properties.

a_{rep} are the representative values of the geometrical properties.

NOTE EN 1992 to EN 1999 (all parts), including National Annexes, as applicable, can provide reference values of γ_R for different fields of application of numerical models.

Suora mitoitusmenetelmä (DDM) & Eurokoodit

prEN 1990: Annex X – Design assisted by numerical methods (luonnos 2024)

- (7) The value of γ_R may be determined from the design value method according to Annex D.8, either:
- a) Using the material and geometrical probabilistic parameters given in the relevant Eurocode material part or background documents.
 - b) Using Q_{rt} determined based on an assumed probabilistic model for the resistance, and on the variance of the resistance determined from the results of the following two analyses:



Eurokoodissa valmistaudutaan jo suoran mitoitusmenetelmän käyttöön!

Tilastotietoa Eurokoodeissa

EN 1993-1-1:2022, Annex E

Table E.1 — Assumed variability of material properties

Parameter	Steel grade	Mean value X_m	Coefficient of variation	Upper reference value $X_{5\%}$	Lower reference value $X_{0,12\%}$
Yield strength, f_y	S235, S275	$1,25 R_{eH,min}^a$	5,5 %	$1,14 R_{eH,min}^a$	$1,06 R_{eH,min}^a$
	S355, S420	$1,20 R_{eH,min}^a$	5,0 %	$1,11 R_{eH,min}^a$	$1,03 R_{eH,min}^a$
	S460	$1,15 R_{eH,min}^a$	4,5 %	$1,07 R_{eH,min}^a$	$1,00 R_{eH,min}^a$
	Above S460	$1,10 R_{eH,min}^a$	3,5 %	$1,04 R_{eH,min}^a$	$1,00 R_{eH,min}^a$
Ultimate tensile strength, f_u	S235, S275	$1,20 R_{m,min}^a$	5,0 %	$1,11 R_{m,min}^a$	$1,03 R_{m,min}^a$
	S355, S420	$1,15 R_{m,min}^a$	4,0 %	$1,08 R_{m,min}^a$	$1,02 R_{m,min}^a$
	S460 and above	$1,10 R_{m,min}^a$	3,5 %	$1,04 R_{m,min}^a$	$1,00 R_{m,min}^a$
Modulus of elasticity, E	All steel grades	210 000 N/mm ²	3,0 %	200 000 N/mm ²	192 000 N/mm ²
^a $R_{eH,min}$ and $R_{m,min}$ are the minimum yield strength R_{eH} and the lower bound of the ultimate tensile strength R_m , according to the applicable product standard, e.g. EN 10025 (all parts).					

Table E.2 — Assumed variability of dimensional properties

Dimension type	Parameter	Mean value X_m	Coefficient of variation	Upper reference value $X_{5\%}$	Lower reference value $X_{0,12\%}$
Outer dimensions of cross-section	Depth h	$1,0 h_{nom}^a$	0,9 %	$0,98 h_{nom}^a$	$0,97 h_{nom}^a$
	Width b	$1,0 b_{nom}^a$	0,9 %	$0,98 b_{nom}^a$	$0,97 b_{nom}^a$
	Outer diameter d of circular hollow section	$1,0 d_{nom}^a$	0,5 %	$0,99 d_{nom}^a$	$0,98 d_{nom}^a$
Thickness	Rolled and welded I- and H-sections: flange thickness t_f	$0,98 t_{f,nom}^a$	2,5 %	$0,95 t_{f,nom}^a$	$0,91 t_{f,nom}^a$
	Rolled and welded I- and H-sections: web thickness t_w	$1,0 t_{w,nom}^a$	2,5 %	$0,96 t_{w,nom}^a$	$0,93 t_{w,nom}^a$
	Hot rolled (seamless) or welded structural hollow sections (acc. to EN 10210 (all parts)): wall thickness t	$0,99 t_{nom}^a$	2,5 %	$0,95 t_{nom}^a$	$0,92 t_{nom}^a$
	Cold-formed sections made from coils or plates (acc. to EN 10219 (all parts)): wall thickness t	$0,99 t_{nom}^a$	2,5 %	$0,95 t_{nom}^a$	$0,92 t_{nom}^a$
	All other welded sections made from heavy plates: thickness t	$0,99 t_{nom}^a$	2,5 %	$0,95 t_{nom}^a$	$0,92 t_{nom}^a$
^a Nominal dimensions according to the applicable product standard or specification.					

Tutkittavaa & Kehitettävää

Tutkimus- ja kehitysaiheita

- Systemivarmuuskertoimen määrittäminen erilaisille rakennejärjestelmille
 - Rakenneperheiden määrittely
- Liitokset osana rakennejärjestelmää
- Muut rajatilat kuin murtorajatila
 - Palo, väsyminen, jne.
- Hybridi- ja liittorakenteet
- Rakenneosakohtaisen ja systeemitason mitoituksen yhdistäminen.

Suora mitoitusmenetelmä vs. Eurokoodi

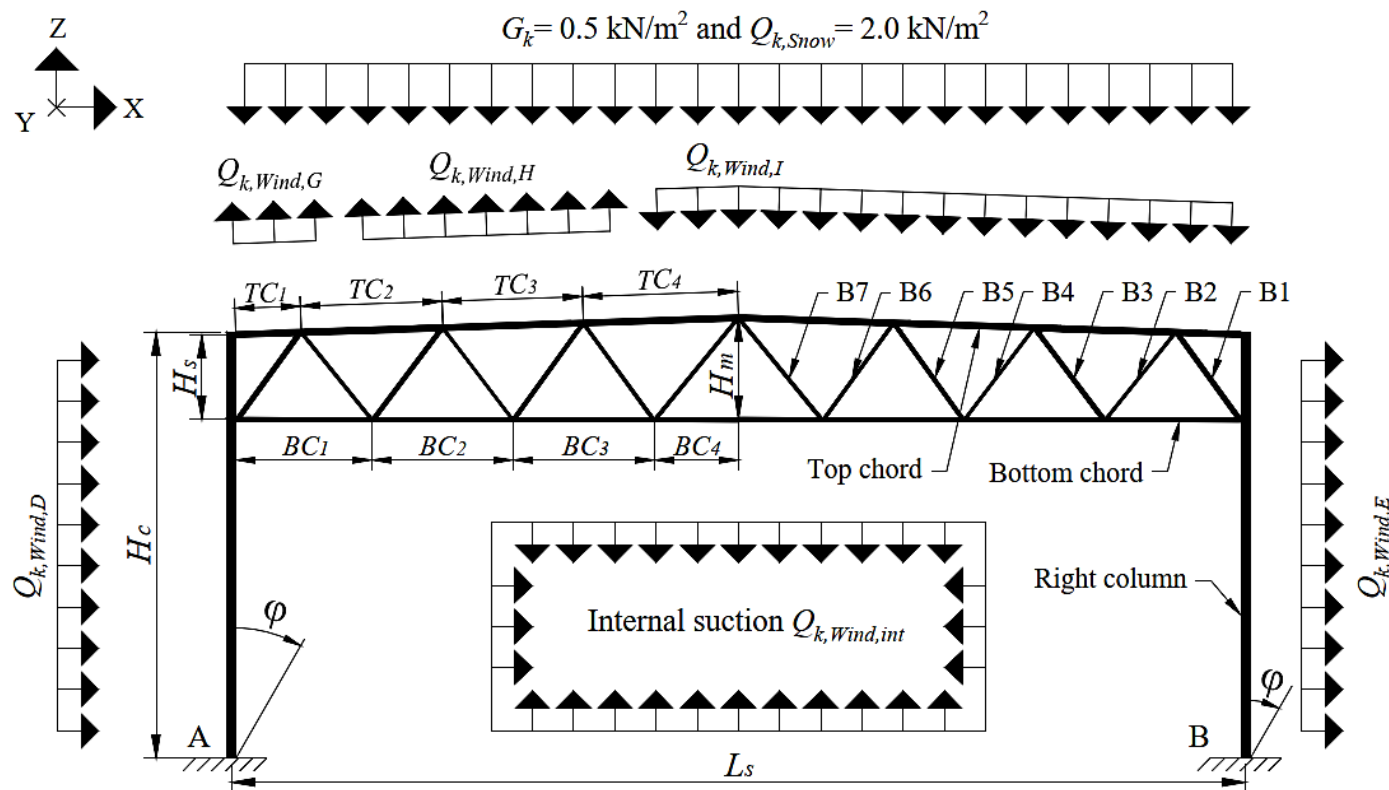
Esimerkkikehä

• Geometria

- Pilarin korkeus $H_c = 9$ m
- Jänneväli $L_s = 28$ m
- Kattokaltevuus 1:30
- Ristikon korkeus
 - Keskipänteellä $H_m = 2,8$ m
 - Tuella $H_s = 2,3$ m

• Reunaehdot

- Jäykät perustusliitokset
- Yläpaarten siirtymä tasosta pois on estetty
- Ristikon liitokset
 - Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa: nivelet
 - DDM: nivelet ja jäykät (2 eri tapausta)



Esimerkkikehä

- Neljä kuormitusyhdistelyä (EN 1990+A1+AC)

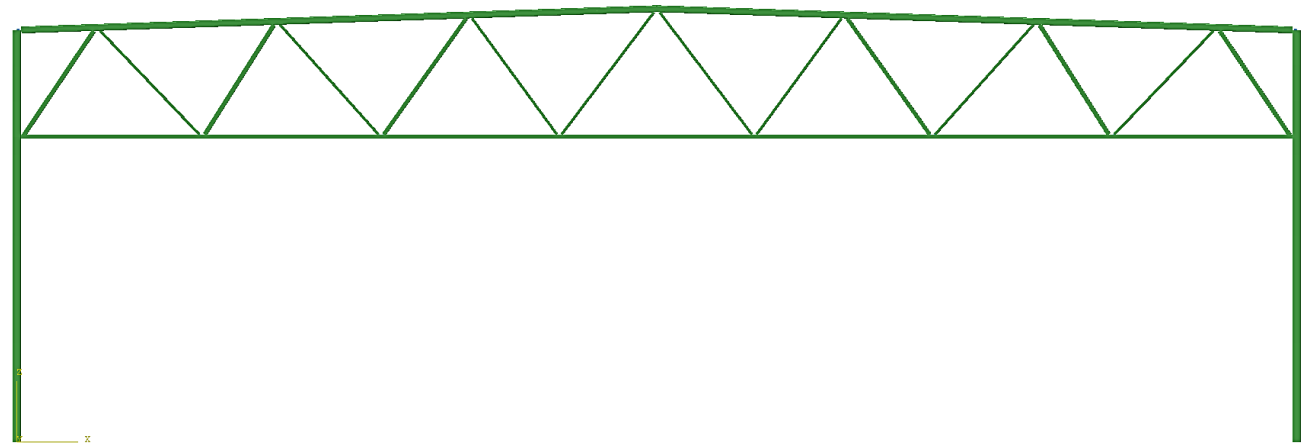
- $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,snow}$
- $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,snow} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{wind}$
- $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,wind}$
- $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,wind} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_{snow}$

- Sauvojen profiilit

- Suorakaideputkia, S700MH
- Poikkileikkausluokka 1 tai 2
- Dimensioton hoikkuus $\bar{\lambda} \leq 3.0$ [2]

- Sauvoille etsitään manuaalisesti kevyimmät käyvät profiilit

- EN 1993: sauvojen käyttöasteet ≤ 1.0
- DDM: kuormakertoimen mitoitusarvo $\alpha_d \geq$ systeemivarmuuskerroin $\gamma_{ADM} = 1.15$

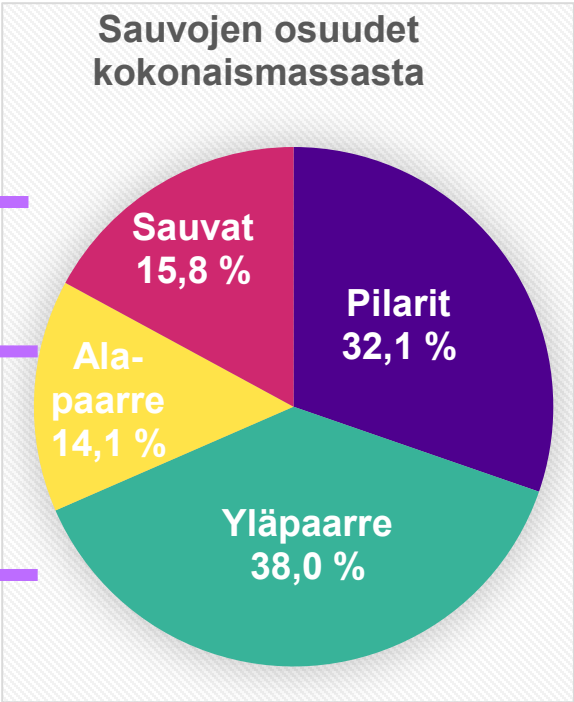


Mitoituksen tulokset

	Sauva	EN 1993-1-1	DDM nivelet	DDM jäykät	Massaero [%]	
					m_{d1}	m_{d2}
→	Pilari*	200x120x8.8	180x120x8	180x120x8	-14,4	-14,4
→	Yläpaarre*	150x100x8.8	150x100x8	150x100x7.1	-7,7	-17,0
	Alapaarre	100x80x4	100x80x4	90x50x5	0,0	-7,6
→	Sauva 1*	100x100x4	100x100x5	80x80x4	+23,1	-21,2
	Sauva 2*	60x60x3	60x60x3	60x60x3	0,0	0,0
→	Sauva 3*	100x100x4	100x100x4	80x80x4	0,0	-21,2
	Sauva 4	60x60x3	60x60x3	60x60x3	0,0	0,0
→	Sauva 5*	80x80x4	90x90x4	60x60x3	+13,9	-11,8
	Sauva 6	60x60x3	60x60x3	60x60x3	0,0	0,0
	Sauva 7*	60x60x3	60x60x3	60x60x3	0,0	0,0
	Yhteensä	2163 kg	2019 kg	1862 kg	-6,6	-13,9

$$m_{d1} = \frac{m_{DDM, hinged} - m_{EC3}}{m_{EC3}}$$

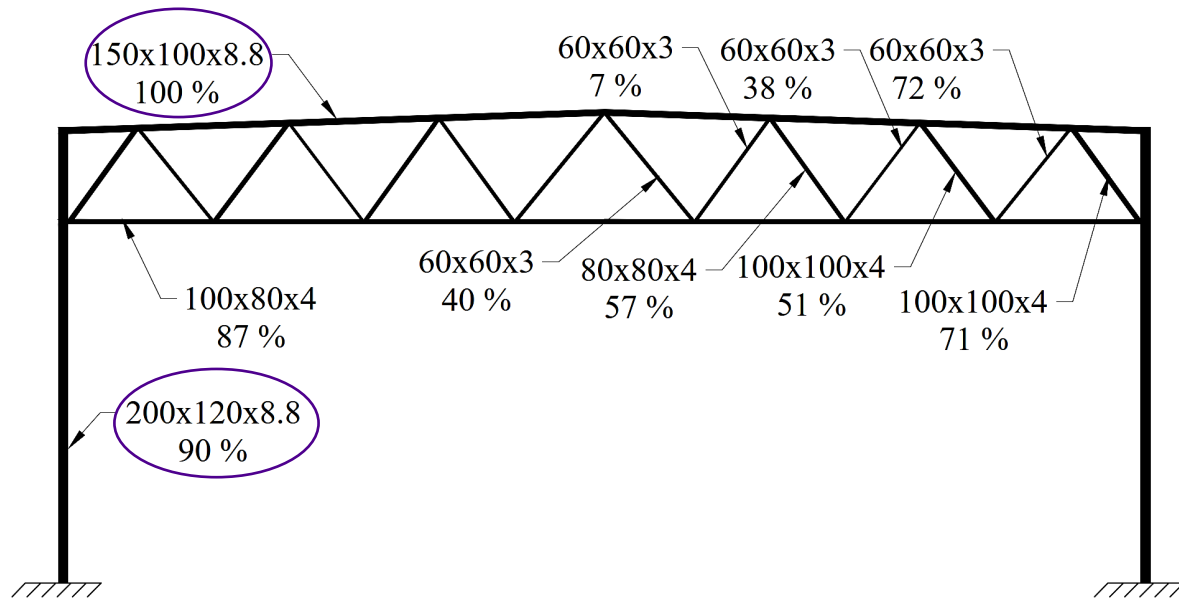
$$m_{d2} = \frac{m_{DDM, rigid} - m_{EC3}}{m_{EC3}}$$



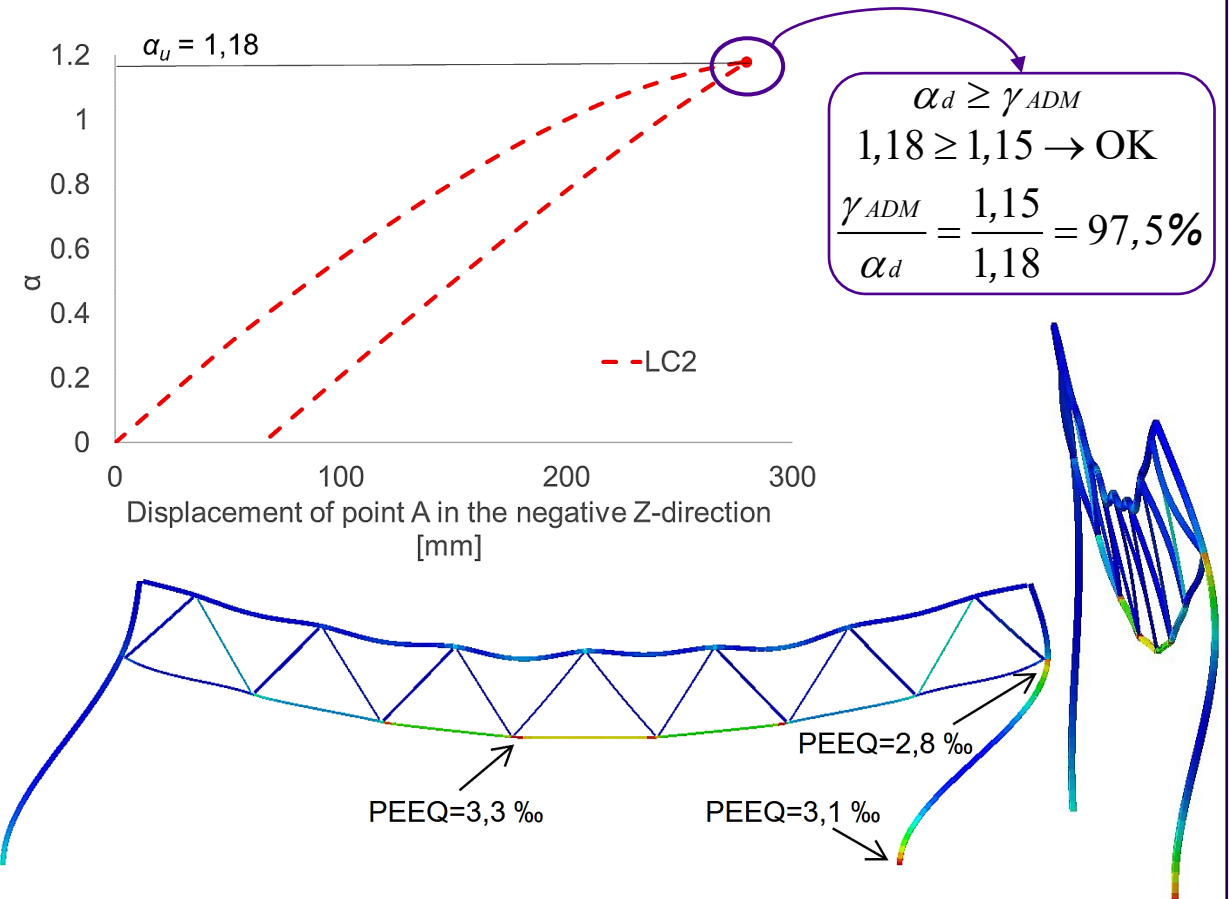
*Puristussauva

Erot mitoituksessa

EN 1993



Suora mitoitusmenetelmä



YHTEENVETO

YHTEENVETO

1. Suora mitoitusmenetelmä muuttaa mitoitusperiaatetta rakenneosakohtaisesta tarkastelusta systeemitasolle.
2. Menetelmä mahdollistaa materiaalin tehokkaamman käytön, kun rakenteen koko kapasiteetti saadaan hyödynnettyä.
3. Suoran mitoitusmenetelmän kehittäminen on tunnistettu Eurokoodin ”3. sukupolven” yhdeksi oleelliseksi tehtäväksi*.

*Knobloch, M., Uszball, S., Bours, A.-L., & Röscher, S. (2024, June 26). *Approaching the Finish Line - Development of the 2nd Gen Eurocode 3 and What's Next?* - KEYNOTE PAPER. Nordic Steel Construction Conference 2024 (NSCC 2024), Luleå, Sweden.

Tutkimukset Tampereen yliopistolla



Lauri Jaamala
väitöskirjatutkija

Väitöskirja:

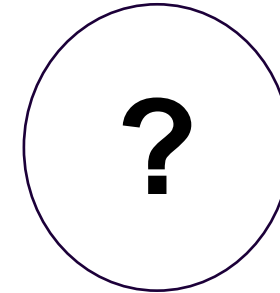
System-level Design Method
for High-strength Steel
Hollow Section Structures
Eurocode-compliant approach,
Esitarkastusvaiheessa.



Henna Hietikko-Kaukola
väitöskirjatutkija

Väitöskirja:

Teräsputkirakenteiden
hitsausliitokset suorassa
mitoitusmenetelmässä
2023-2026



väitöskirjatutkija

Väitöskirja:

Suoran mitoitusmenetelmän
laajennus eri teräslaaduille ja
hoikemmille poikkileikkauksille
2025-2028

Yhteistyössä

DSII Doctoral School
of Industry Innovations

SSAB