

METSTA

Numeeriset menetelmät toisen sukupolven eurokoodeissa

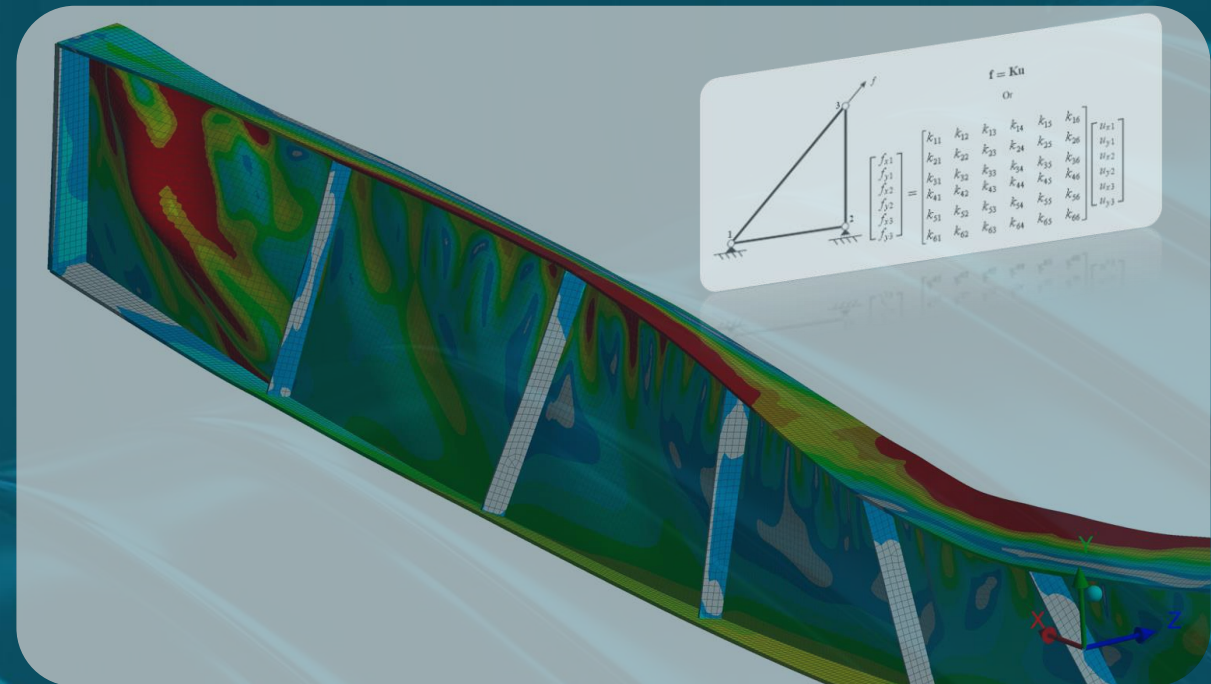
25.8.2023

Ville Laine

SR 103 puheenjohtaja (METSTA)

A-Insinöörit Suunnittelu Oy, teknologiajohtaja

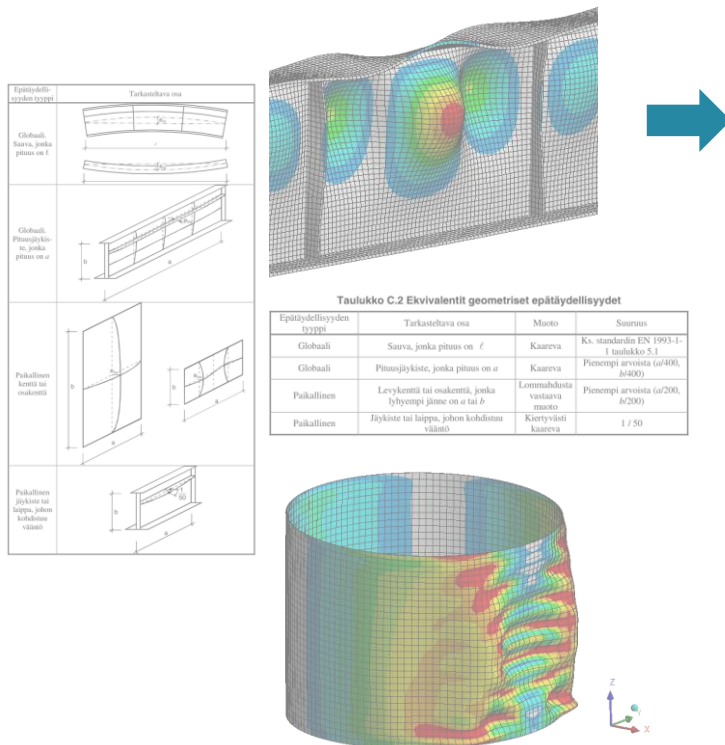
www.metsta.fi



Numeeriset menetelmät toisen sukupolven Eurokoodeissa

Nykyisin käytössä oleva Eurokoodi

- EN 1993-1-5 Annex C (informative) "Finite Element Methods of analysis (FEM)" (4 s.)
- EN 1993-1-6 "Design by global numerical analysis" (MNA, LBA, GMNIA) (12 s.)



Taulukko C.2 Ekvivalentit geometriset epätäydellisyydet

Epätäydellisyyden tyyppi	Tarkasteltava osa	Muoto	Suuruus
Globaali	Sarve, jonka pituus on l	Kaareva	Ks. standardin EN 1993-1-1 taulukko 5.1
Globaali	Pituusjykiste, jonka pituus on a	Kaareva	Pienempi arvoista $a/400$, $b/400$
Paikallinen	Levykentti tai osakentti, jonka lyhyempi jänne on a tai b	Lommahdusta vastaava muoto	Pienempi arvoista $a/200$, $b/200$
Paikallinen	Jykiste tai laippo, johon kohdittu väänne	Kiertyvästi kaareva	1 / 50

Toisen sukupolven Eurokoodi

- EN 1990 new Annex (informative): "Design assisted by numerical methods" (draft 19 pages)
- EN 1991-1-4 new Annex (informative): "Guidance on derivation of design parameters from wind tunnel tests and numerical simulations" (draft 22 pages)
- EN 1992-1-1 new Annex (informative): "Safety formats for non-linear analysis" (draft 5 pages)
- EN 1993-1-6 "Design by computational analysis (MNA, LBA, GMNIA) (14 s.)"
 - EN 1993-1-14: "Design assisted by finite element analysis" (draft 60 pages)
 - + CEN/TR 1993-1-141 "Background and Explanations on EN 1993-1-14" (draft 174 pages)
- EN 1999-1-1 new Annex (informative): "Finite Element Methods of analysis (FEM)" (draft 5 pages)

Numeeristen menetelmien ohjeistaminen EC3 (2.gen)

Tiivis **EC3-standardi** elementtimenetelmän soveltamisesta **EC3:n mukaisessa suunnittelussa** ja laajempi esimerkkejä sisältävä **CENin TR (Technical Report)** -dokumentti standardin käytön tueksi

EN 1993-1-14 FEM:n käyttö teräsrakenteiden suunnittelussa, "Design assisted by finite element analysis"

- FEM:n soveltamisen periaatteet ja vaatimukset **EC3-osien mukaisessa staattisessa mitoituksessa (SLS ja ULS)** ja väsymimitoituksessa EN 1993-1-9 mukaisesti
- FEM:n soveltamisen periaatteet **teräsrakenteiden simulointiin** tutkimushankkeissa
- Ei sisällä dynaamisten analyysien periaatteita eikä vaatimuksia
- Viimeisin WG –draft (2022-10). CEN-Enquiry alkaa 2023-09
 - Odotettavissa kommentteja → jatkokehitys → FV 2025-04

- hot-rolled profiles,
- cold-formed members and sheeting,
- welded plated profiles,
- stainless steel profiles,
- plate assemblies,
- shell structures,
- welded and bolted joints.

CEN-Enquiry kommentoitavat versiot saatavilla **SFS:n lausuntopalvelusta**

<https://lausunto.sfs.fi/> Jos löydät kommentoitavaa olethan ajoissa yhteyksissä ville.laine@ains.fi

CEN/TR 1993-1-141 "Background and Explanations on EN 1993-1-14"

- Standardin kanssa sisältörakenteeltaan vertailukelpoinen tukimateriaali
- Selittävää ja tarkentavaa käsikirjamaista tekstiä standardin kappaleisiin
- Validointi ja suunnitteluesimerkkejä x kpl (viimeisimmässä draftissa 8 validointiesimerkkiä ja 4 suunnitteluesimerkkiä)
- Viimeisin WG –draft (2023-06). TR-dokumentti ei tarvitse CEN-Enquiryä eikä Formal-votea, joten valmistuu omaa tahtia ja standardia helpompi jatkokehittää

EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien luokittelu

Verifiointi ja validointi

FE-mallinnus

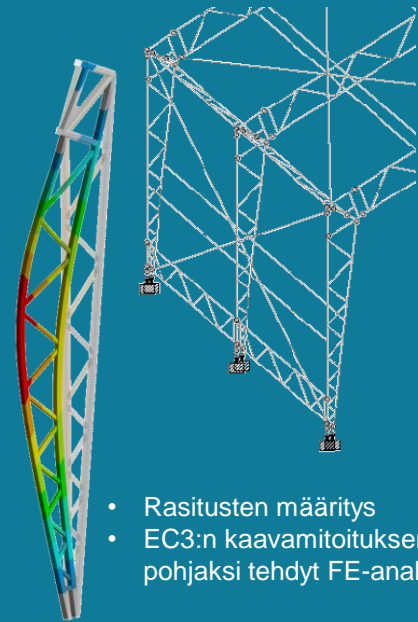
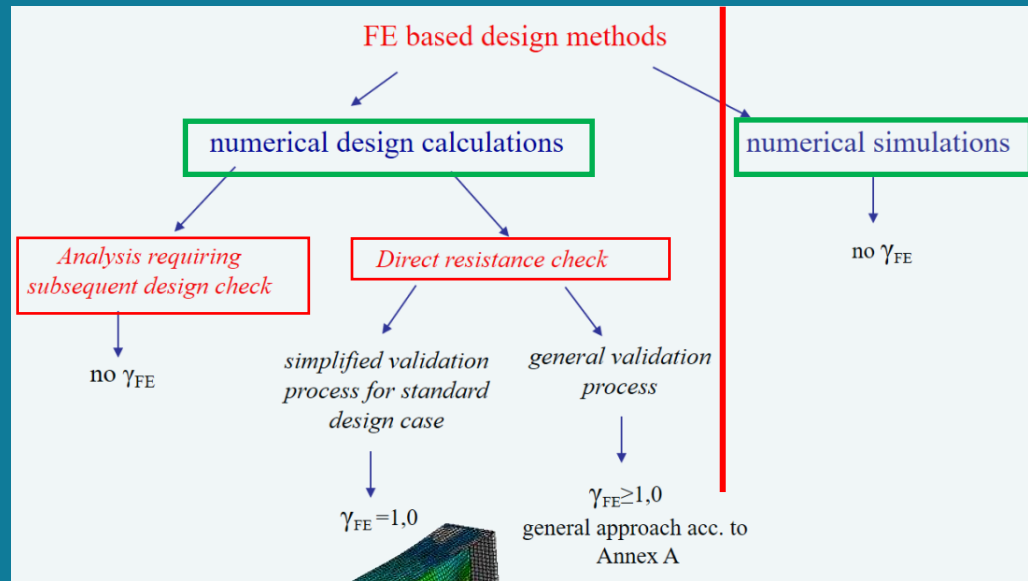
Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

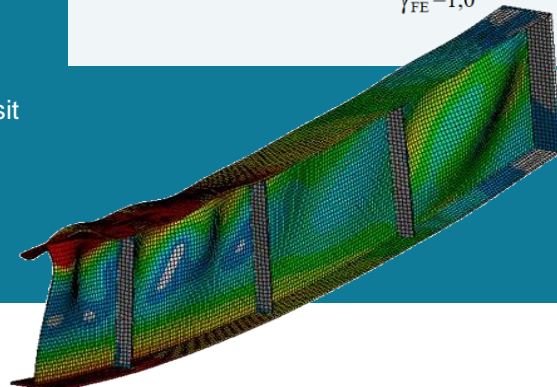
Suunnitteluarvo

Väsyminen

- Selkeä jako analyysityypin mukaan: Numerical design calculations ja Numerical simulations

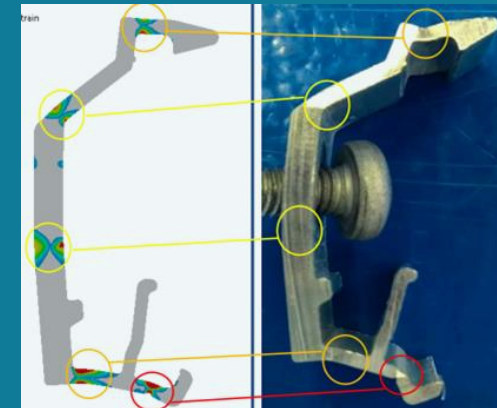


- Rasitusten määrittäminen
- EC3:n kaavamitoituksen pohjaksi tehdyt FE-analyysit



- EC3 mukaisen suunnitteluarvon määrittäminen suoraan FE-analyysillä

- Tutkimusluonteiset FE-simulaatiot esim. kuormituskokeiden vähentämiseksi
- Suunnitteluarvoon pääseminen vaatii tilastollisen tarkastelun, kuten kokeellinen mitoitus (EN 1990)



EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien
luokittelu

Verifiointi ja
validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

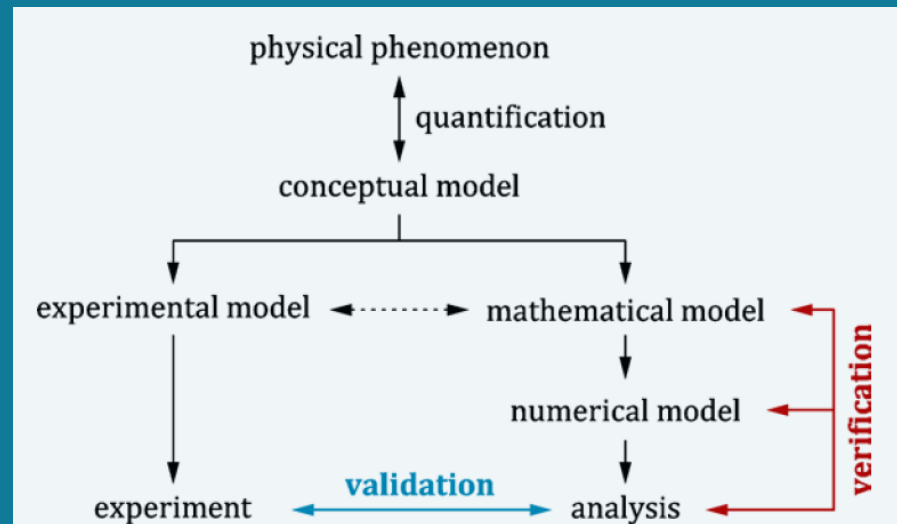
Suunnitteluarvo

Väsyminen

- Mallien tai mallinnustekniikoiden validointi- ja verifiointivaatimukset
 - Pystyttävä osoittamaan, että analyysimalli tuottaa mitoituksellisesti konservatiivisen kuvauksen tutkittavasta vauriomuodosta
- TR – dokumentissa esimerkkejä, joita voi halutessaan hyödyntää validointiin

Validointi

- Vertailu kokeellisiin tai tunnettuihin arvoihin
- Osoitetaan, että malli kuvaa vauriomuotoon liittyvät fysikaaliset ilmiöt oikein tai konservatiivisesti



Verifiointi

- Osoitetaan numeerisen ratkaisun riittävä tarkkuus verrattuna tarkkaan matemaattiseen ratkaisuun
- Osoitetaan esim. mallin herkkyys diskretisoinnille

EC3:n vauriomuotojen tapauksessa validointi ja verifiointi voidaan tehdä vastaavien mallien aiempiin kokemuksiin viitaten (= vauriomuodon analysointiin käytettävän mallinnustekniikan osoitus)

EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien
luokittelu

Verifiointi ja
validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

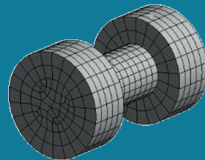
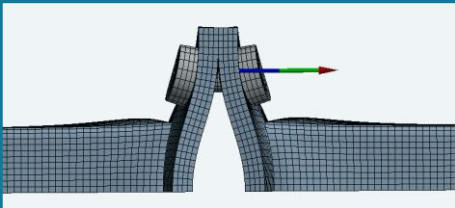
Suunnitteluarvo

Väsyminen

- FE-mallinnus: *geometria, reunaehdot, verkotus*
- Ohjeistus standardissa on yleisluonteista
 - Sisältää yleisen kuvauksen palkki, kuori ja solidielementtien käytöstä
 - Sisältää yleisen kuvauksen mitoitustyyppisten analyysien reunaehtojen ja kuormien mallintamisesta

→ Käyttäjältä vaaditaan jatkossakin ammattitaitoa valita tehtävään sopia elementtityyppi ja verkon koko

→ Käyttäjältä vaaditaan jatkossakin ammattitaitoa mallintaa reunaehdot ja kuormitukset tehtävään soveltuvalla tavalla ja mitoituksellisesti konservatiivisesti



The chosen finite element (linear or higher order element) shall be related to the chosen mesh density, geometry complexity (curvature) and the solution method to ensure that the results meet both the validation and verification requirements.

Element shape properties should be of suitable quality to ensure accuracy (element aspect ratio, jacobian ratio, warping factor, etc.).

The support conditions in the numerical model should be chosen to reflect in a realistic or conservative manner the behaviour of the physical supports in the real structure.

- FE-analyysin dokumentaation vaatimukset on selkeästi listattu standardiin (toistettavuus)

The calculations should be reproducible by third parties.

EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien luokittelu

Verifiointi ja validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

Suunnitteluarvo

Väsyminen

- Teräsrakenteiden EC3-mitoituksessa tarvittavat materiaalimallit esitely ja ohjeistettu kattavasti.
 - Mitoitustyyppisissä FE-analyseissa käytetään materiaaliominaisuuksien nimellisiä arvoja
 - S700 asti ns. normaalit ideaaliplastiset ja myötölujittuvat materiaalimallit. S700+ pyöristetyt jännitys-venymäkäyrät, kuten kaksivaiheinen Ramberg-Osgood
 - Yli 100°C lämpötilassa materiaaliominaisuudet palomitoitustapauksissa osasta EN 1993-1-2. Jatkuvasti lämpimien teräsrakenteiden materiaaliominaisuuksien valintaan EN 1993-1-14 ei ota kantaa
- Toistaiseksi suurin osa materiaalimalleihin liittyvistä ohjeista ja säännöistä on ns. "may" - sääntöjä.
 - Tarkoittaa EC-terminologialla, että näin "voi toimia"; eivät ole velvoittavia sääntöjä. (antaa vapautta soveltaa, mutta vähentää standardin ohjaavuutta)

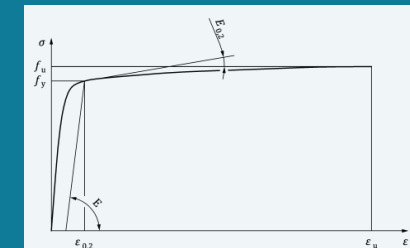
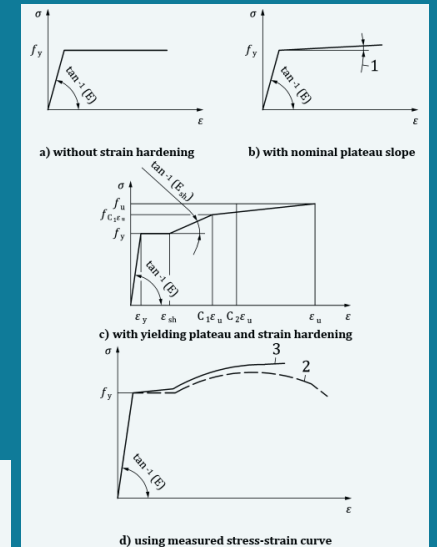


Figure 5.2 — Two-stage Ramberg-Osgood model

GMNIA (elastic instability dominant): a reduced value of 200 000 N/mm² for carbon steel and 191 000 N/mm² for stainless steel may be used.

Table 5.1 — Values of n

Steel	Coefficient n
Cold-formed steels	8
Austenitic stainless steels	7
Ferritic stainless steels	14
Duplex stainless steels	8
Steel grades of S500 – S700	14

EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien luokittelu

Verifiointi ja validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

Suunnitteluarvo

Väsyminen

- Alkuhäiriöihin tulee sisällyttää geometriset alkuhäiriöt, jäännösjännitykset ja mahdolliset reunaehtopoikkeamat
- Teräsrakenteiden EC3-mitoituksessa tarvittavat alkuhäiriöiden mallinnustekniikat ja ohjeet esitetty
 - Geometriset alkuhäiriöt + jäännösjännitykset

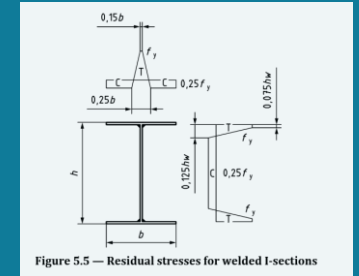
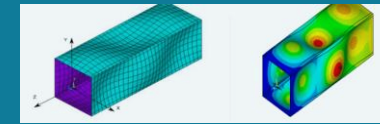


Figure 5.5 — Residual stresses for welded I-sections

2. Ekvivalentit alkuhäiriöt (EC3)

(5) Equivalent geometric imperfections for use in geometrically and materially non-linear analysis (GMNIA) of structural members for flexural buckling may be determined from Formula (5.15). The equivalent imperfection shape may be either a bow (half-sine wave) or buckling mode.

$$e_0 = \frac{\alpha L}{150} \quad \text{but} \quad e_0 \geq \frac{L}{1000} \quad (5.15)$$

where:

L the member length,

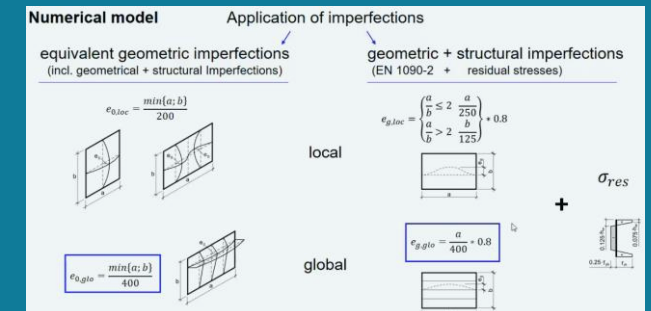
α the imperfection factor, taken from EN 1993-1-1 or EN 1993-1-4.

Table 5.7 — Equivalent geometric imperfections for plates and plated structures

Type of imperfection	Component
longitudinal stiffener with length a	
panel or sub-panel	

EC3 -mitoitus perustuu ekvivalentteihin alkuhäiriöihin, joita sovelletaan ominaismuotoihin (2).
 EC3 -mitoitus perustuu oletukseen, että valmistus tapahtuu EN 1090-2 mukaisesti.

MUTTA EN 1090-2 toleransseja ole koskaan tarkoitettukaan käytettäväksi alkuhäiriöinä numeerisessa laskennassa → (1) ja (2) eivät johda samaan tulokseen.



EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien
luokittelu

Verifiointi ja
validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

Suunnitteluarvo

Väsyminen

- Suunnitteluarvon määrittäminen; Numerical design calculations → Direct resistance check (ULS)

- Karakteristinen arvo suoraan FE-mallin kapasiteetista jakamalla γ_{FE} :llä
- Suunnitteluarvo (esim. $R_{pl,d}$) jakamalla karakteristinen arvo kyseiseen vauriomuotoon liittyvillä osavarmuuksilla (EN 1993 kaikki osat + FI NA)
- Kuorirakenteiden suunnitteluarvon määrittämisen erityissäännöt jatkossakin EN 1993-1-6

$$R_{pl,k} = \frac{R_{MNA}}{\gamma_{FE}} \quad \text{or} \quad R_{pl,k} = \frac{R_{GMNA}}{\gamma_{FE}}$$

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNA}}{\gamma_{FE}}$$

- Kun numeerinen malli on verifioitu ja validoitu EC3:n vauriomuotojen yksinkertaistetuilla malleilla, on mahdollisuus käyttää $\gamma_{FE} = 1.0$
- Yleisen validointiprosessin kautta; $\gamma_{FE} \geq 1.0$

$$\gamma_{FE} = \frac{1}{m_x \cdot (1 - k_N \cdot V_x)} \geq 1,0$$

$R_{k,known}$ is the calculated or known characteristic structural resistance,

$R_{test,known}$ is the known test result,

R_{check} is the computed resistance for the check structural resistance case.



EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien
luokittelu

Verifiointi ja
validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

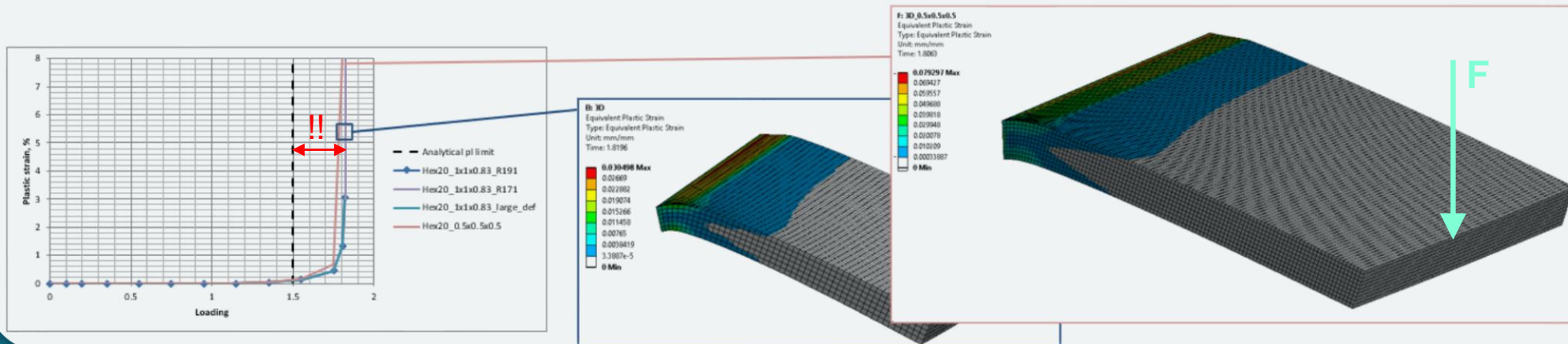
Suunnittelu-arvo

Väsyminen

- Esimerkiksi **solidelementit** ja levyjen **plastinen taivutuskapasiteetti (MNA)** muodostavat yleisesti käytetyn virheherkän yhdistelmän.
 - "Volumetric locking" :
 - *Elementtien ylijäykistämistä, kun materiaali on lähellä kokoonpuristumatonta (Poissonin luku lähellä 0,5). Tyypillisesti bi-lineaarisissa materiaalimalleissa FEM-ohjelmat muuttavat elementin Poissonin luvun 0.3 → 0.5, kun plastisoituminen alkaa*
 - Suhtaudu kriittisesti ja validoi yksinkertaisten mallien tuloksia analyttisiin laskelmiin, jos mahdollista

$$R_{pl,k} = \frac{R_{GMNA}}{\gamma_{FE}}$$

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNIA}}{\gamma_{FE}}$$



EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien
luokittelu

Verifiointi ja
validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

Alkuhäiriöt

Suunnitteluarvo

Väsyminen

• Suunnitteluarvon määrittäminen; Numerical design calculations → Direct resistance check (ULS)

- Karakteristinen arvo suoraan FE-mallin kapasiteetista jakamalla γ_{FE} :llä
- Suunnitteluarvo (esim. $R_{pl,d}$) jakamalla karakteristinen arvo kyseiseen vauriomuotoon liittyvillä osavarmuuksilla (EN 1993 kaikki osat + FI NA)
- Kuorirakenteiden suunnitteluarvon määrittämisen erityissäännöt jatkossakin EN 1993-1-6
- Kun numeerinen malli on verifioitu ja validoitu EC3:n vauriomuotojen yksinkertaistetuilla malleilla, ei tilastollista tarkastelua erikseen tarvita; $\gamma_{FE} = 1.0$
- Yleisen validointiprosessin kautta; $\gamma_{FE} \geq 1.0$

$$R_{pl,k} = \frac{R_{MNA}}{\gamma_{FE}} \quad \text{or} \quad R_{pl,k} = \frac{R_{GMNA}}{\gamma_{FE}}$$

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNA}}{\gamma_{FE}}$$

$$\gamma_{FE} = \frac{1}{m_X \cdot (1 - k_N \cdot V_X)} \geq 1,0$$

$R_{k,known}$ is the calculated or known characteristic structural resistance,

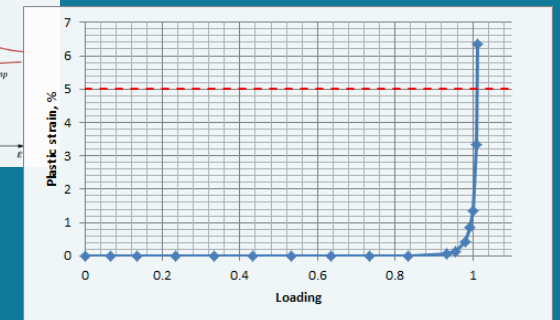
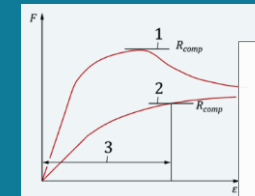
$R_{test,known}$ is the known test result,

R_{check} is the computed resistance for the check structural resistance case.



• Kriteerit epälineaarissa FE-analyysissä

- C1: Saavutetun kuormitustason maksimi
- C1: Plastinen venymän kriteeri ylitetään
 - 5% raja on suositusarvo, jos vauriomuodolle ei ole erikseen määritetty rajaa
 - Palkkielementtien plastiselle venymälle oma ohje standardissa; Annex C
 - Ruuveille, jotka mallinnettu jousina, annettu oma taulukko, ϵ_{max} (2 – 5 %)
 - Kuorirakenteiden venymäkriteerit EN 1993-1-6



EN 1993-1-14 + CEN/TR 1993-1-141

FE-analyysien
luokittelu

Verifiointi ja
validointi

FE-mallinnus

Materiaalimallit

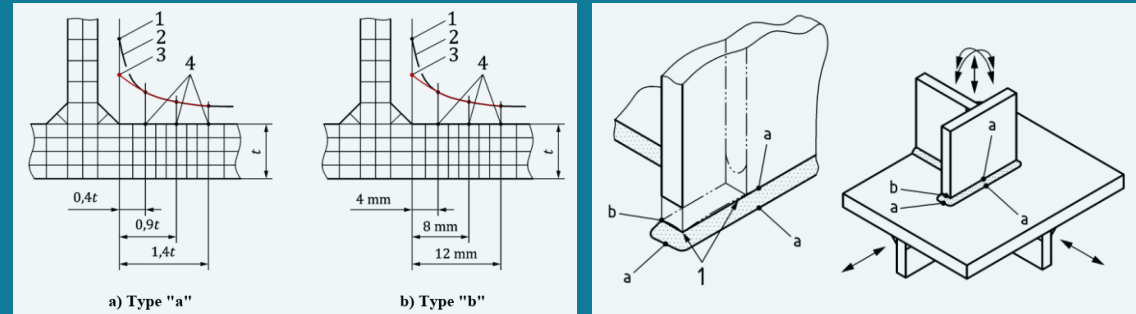
Alkuhäiriöt

Suunnitteluarvo

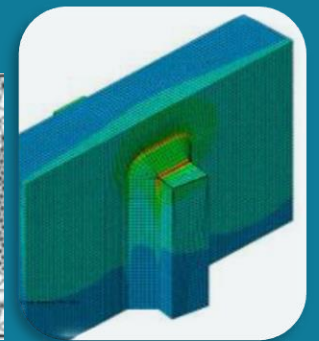
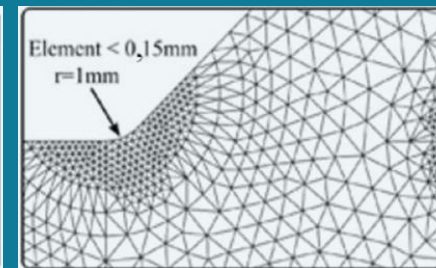
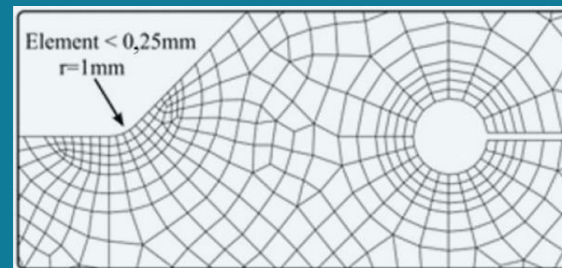
Väsyminen

- Täydentävät ohjeet jännitysten määrittämiseen FE-analyysin avulla EN 1993-1-9 mukaisissa väsymistarkasteluissa

- Hot Spot



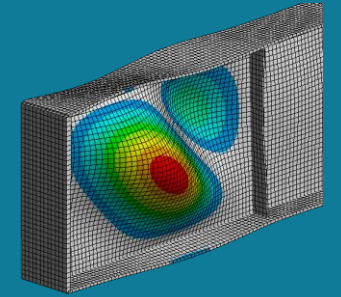
- Tehollisen lovijännityksen menetelmä



Numeeriset menetelmät ja EC3; mikä muuttuu?

Muuttuu

- Nykyistä parempi standarditasoinen tuki EC3 mitoitusta tekeväille FEM-laskijalle
 - sovellettavuus
- Selkeämmät ohjeet; analyysityypit, menetelmät, soveltaminen, tulosten tulkinta
 - sovellettavuus, vertailtavuus, mitoituksen tarkastus



Variaation vähentäminen mitoitus suorituksissa

Ei muutu

- Suunnittelun varmuustaso ("safety by pass"; tulisi välttää tai osoittaa / perustella)
- Standardin EN 1993-1-14 lukeminen ei tee FEM-mitoittajaa
 - FEM:n käyttäjältä vaaditaan ammattitaitoa jatkossakin
 - Käyttäjältä vaaditaan suunnitteluosaaminen kyseiseen mitoitustehtävään ja siihen liittyviin standardeihin (EC3)

safety by pass: numerical model brings significant resistance increase compared to well-established traditional design methods and the accuracy of the model is to be proved

Oppilaitoksille pohdittavaksi kurssitarjontaa mietittäessä

- EC3 mitoitus: "Teräsrakenteiden suunnittelu" ja suunnittelun jatkokurssit
- FEM + EC3 kaavamitoitus: "Elementtimenetelmän perusteet"
- FEM, EC3 "Direct resistance check": "Elementtimenetelmän jatkokurssi"

Kiitos

Ville Laine

ville.laine@ains.fi

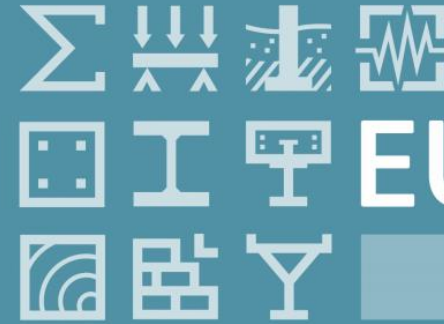
+358 50 322 2281

www.ains.fi

www.metsta.fi

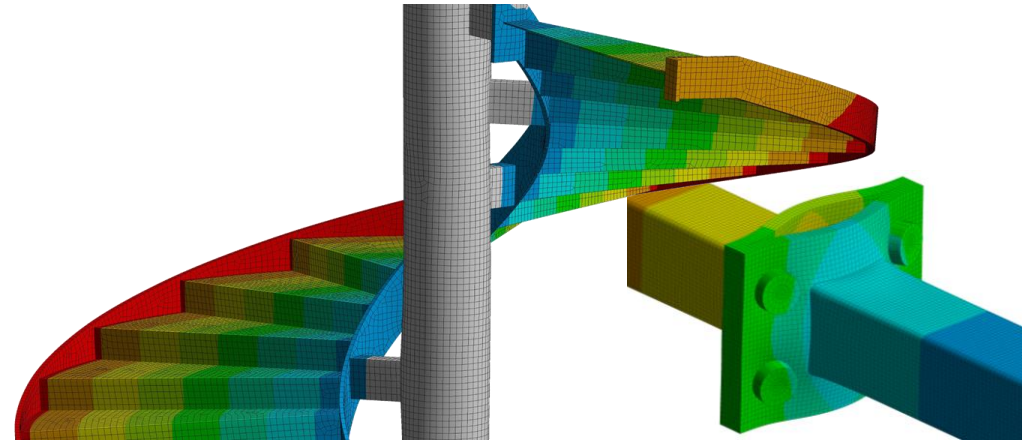
METSTA

Metsta/SR 103: EC3 ja EC9



EUROCODES

AINS: Teknisen laskennan palvelut



AINS: Tutkimus ja tuotekehitys (digitaalinen laboratorio)

