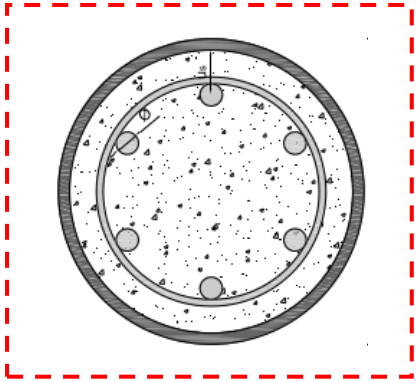
Liittopilarin palomitoitusmenetelmien vertailu

Juha Soini, Timo Ketola ja Erkki Hömmö

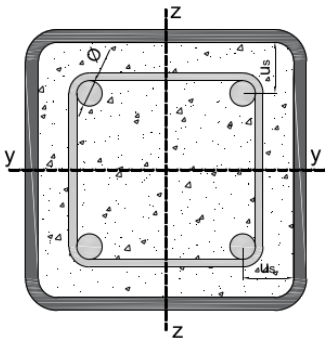
Sweco Finland Oy

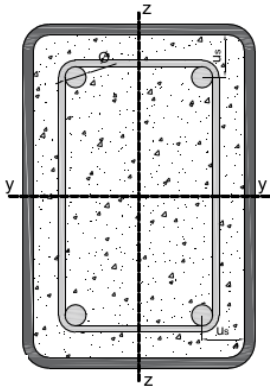
Eurokoodiseminaari 4.12.2025

Johdanto



- Liittopilareita käytetään paljon monikerrosrakentamisessa ja myös hallirakennuksissa.
- Yhdistää teräs- ja betonirakenteiden hyviä puolia.
- Suomessa liittopilarit ovat yleensä teräsputkipilareita, joiden sisällä on harjateräsraudoitteet ja betonitäyttö.
  - Käytetyt poikkileikkausmuodot: **pyöreä (CHS),** neliö (SHS), suorakaide (RHS)
- Tavallisesti riittävä palonkestävyys saavutetaan ilman erillistä palosuojausta
- Usein palotilanne on pilarille murtorajatilaa mitoittavampi
- → **Liittopilarin palomitoitus on keskeisessä roolissa**





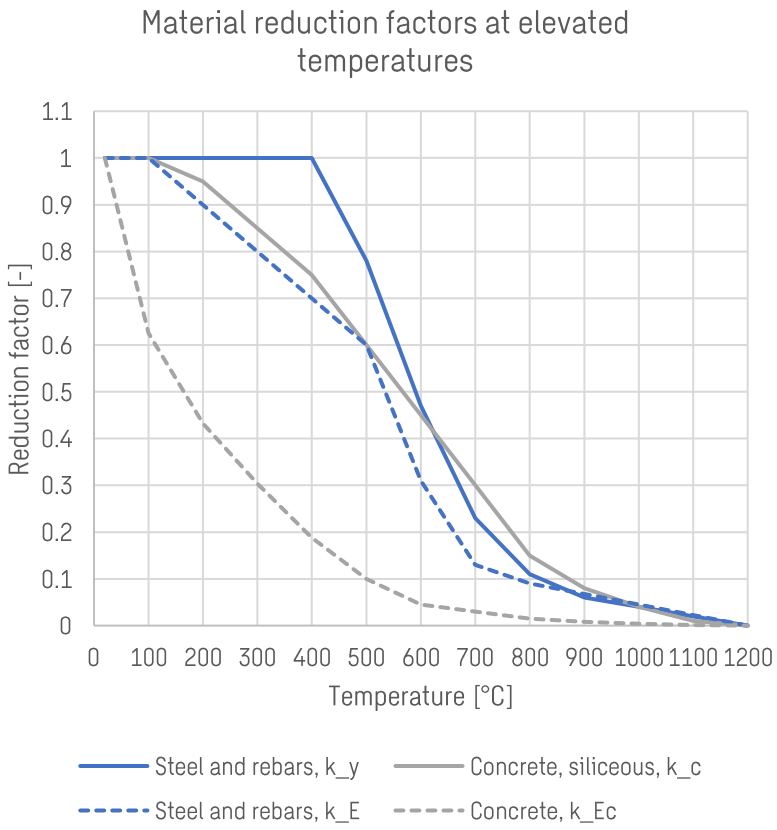
Johdanto

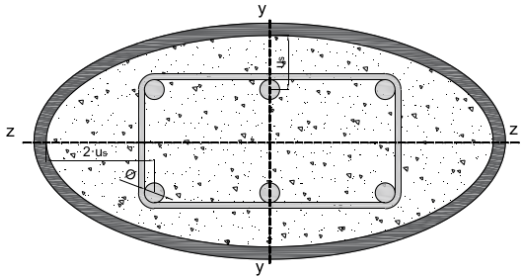
- Nykyisessä Eurokoodissa SFS-EN 1994-1-2 liittopilarin palomitoitusmenetelmän (liite H) on havaittu olevan epävarmalla puolella
  - Suomessa kyseistä liitettä ei käytetä, vaan palomitoitus ohjeistetaan tekemään NCCI1 –ohjeen mukaan

- Liittopilarin palomitoitusmenetelmien kehittämiseksi tehtiin laaja tutkimushanke FRISCC, josta loppuraportti 2016 (Espinós & co).
  - Polttokokeita ja suuri määrä numeerisia laskelmia (3D solidi-FEM ja yksinkertaisempi säiepalkkimalli)
  - Menetelmän mitoituskaavojen parametrit sovitettu näihin tuloksiin.

- Tässä esityksessä vertaillaan nykyistä NCCI1 -ohjeen menetelmää ja tulevaa 2. sukupolven Eurokoodin (käytetään lyhennettä FprEC4) menetelmää **CHS-liittopilareille**
  - Molemmat menetelmät pätevät vain sivusiirtymättömien kehien pilareille, joihin kohdistuu standardipalorasitus jokaiselta sivulta samalla tavalla.
  - NCCI1 –ohje kattaa pyöreät ja neliöpilarit (SHS).
  - 2. sukupolven Eurokoodi kattaa useampia poikkileikkausmuotoja: pyöreä, neliö, suorakaide, ellipsi

- Lisäksi lyhyt katsaus kehittyneiden menetelmien käyttöön





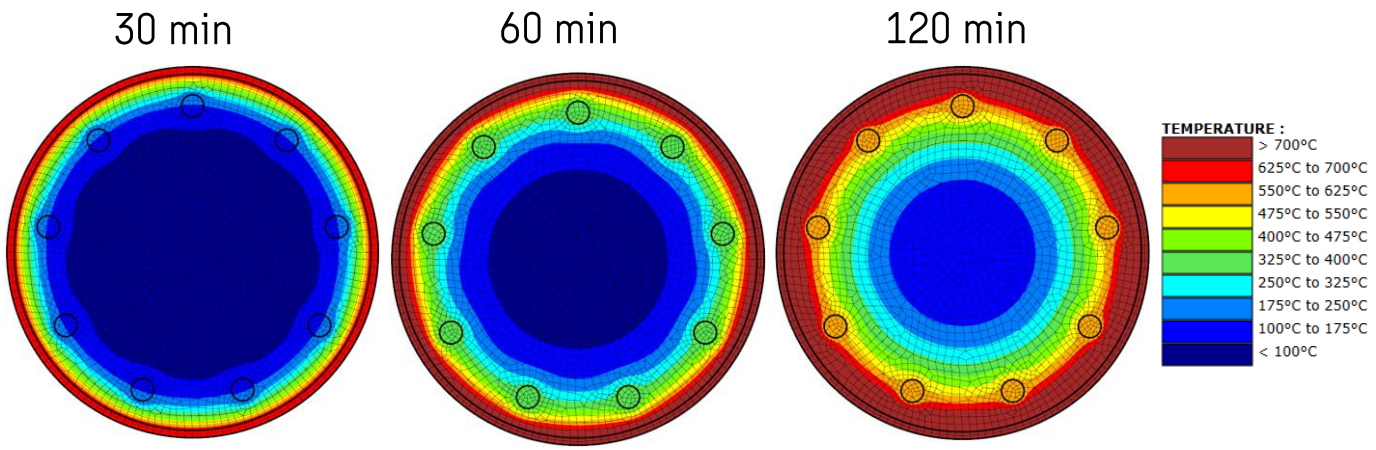
Lämpötilakenttä,

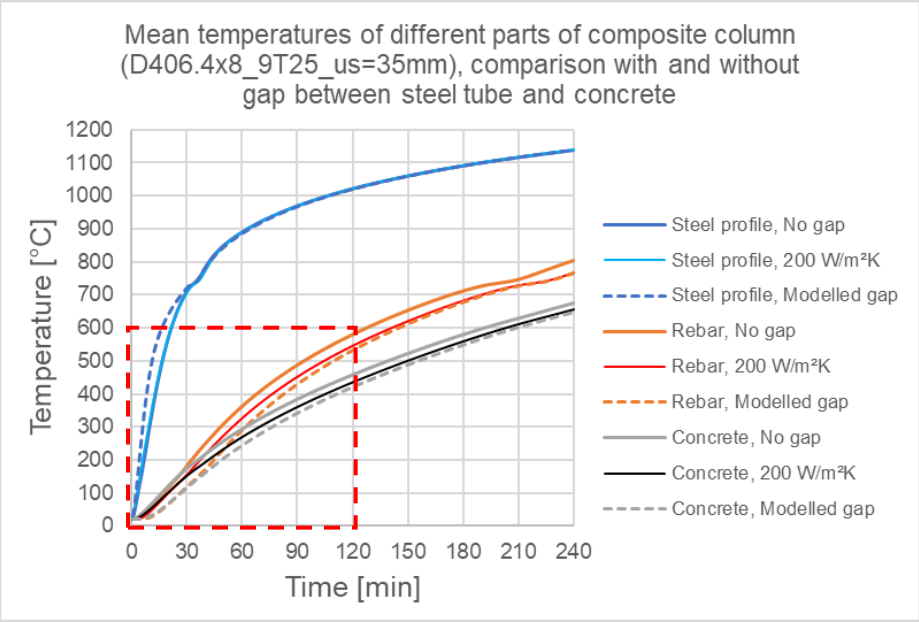
Laskentametenelmät ja niiden vertailu

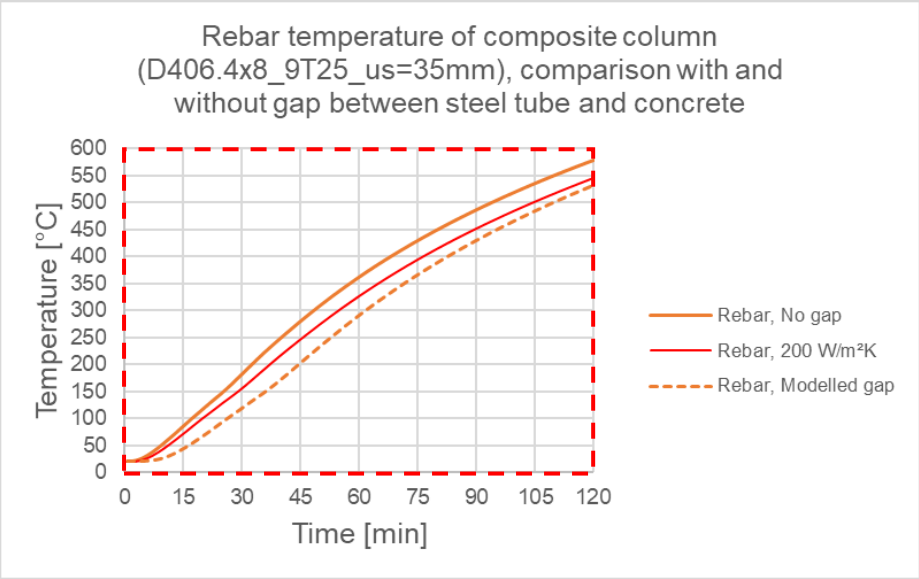
SWECO

Lämpötilan määritys kehittyneillä menetelmillä

- Eurokoodin mukaan liittorakenteen lämpötilakenttä voidaan määrittää käyttäen ns. kehittyneitä menetelmiä (vaikka palona olisikin standardipalo). Tällöin huomioitava mm.
  - Lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet
  - Betonin koskeuspitoisuus
  - Teräsputken ja betoniosan väliin lämpölaajenemisesta muodostuva rako, jonka vaikutusta vertailtu viereisissä kuvissa.
    - FRISCC –tutkimuksessa rako huomioitiin 200 W/m²K konduktanssilla
- Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus on oma lukunsa, eikä sitä käsitellä tässä esityksessä.







NCCI1 –ohjeen menetelmä, lämpötilat

Teräsprofiilin ja betonin lämpötiloille yksinkertaiset kaavat ja raudoitteille taulukoidut arvot eri palonkestoajoille (R30, R60, R90, R120) pykälittäin.
→ Ei helppoa mahdollisuutta laskea ajan funktiona (vaatii sovitteita)

Menetelmän suurin pyöreä pilarikoko: D = 500 mm

Teräsprofiilin lämpötila

Taulukko 1. *Pyöreiden putkiprofiilien keskimääräinen lämpötila θ_a °C ulko-halkaisijan D funktiona*

Stand.palo	R30	R60	R90	R120
$\theta_a(D)$	$620 + 95 \times \left(\frac{510-D}{370}\right)^{0,8}$	$820 + 4,18\sqrt{510-D}$	$955 + 20 \times \left(\frac{510-D}{290}\right)^{1,5}$	1015
Rajaehdot	$135 \le D \le 510$	$165 \le D \le 510$	$200 \le D \le 510$	$270 \le D \le 510$

Betonin ekvivalentti lämpötila

$$\begin{cases} \theta_{c.equ.30}(D)=11000/D^{0,64} \quad kun\ 135 \le D510 \\ \theta_{c.equ.60}(D)=16300/D^{0,66} \quad kun\ 165 \le D \le 510 \\ \theta_{c.equ.90}(D)=13100/D^{0,58} \quad kun\ 200 \le D \le 510 \\ \theta_{c.equ.120}(D)=1180-2,96D+0,0028D^2 \quad kun\ 220 \le D \le 510 \end{cases}$$

Raudoitteiden lämpötilat

Taulukko 3a. *Raudoituksen lämpötilat θ_s °C pyöreissä liittopilareissa R30 ja R60 standardipalojen tapauksissa*

	R30 standardipalo					R60 standardipalo				
	Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]					Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]				
u_s [mm]	140	200	250	350	500	140	200	250	350	500
20	370	335	320	310	310	645	570	540	520	520
30	307	260	245	232	232	592	487	455	427	427
40	245	185	170	155	155	540	405	370	335	335
50	217	142	132	120	120	515	357	312	277	270
60	190	100	95	85	85	490	310	255	220	205
80	-	80	65	55	55	-	265	185	140	130
110	-	-	35	35	35	-	-	120	85	75

Taulukko 3b. *Raudoituksen lämpötilat θ_s °C pyöreissä liittopilareissa, R90 ja R120 standardipalojen tapauksissa*

	R90 standardipalo					R120 standardipalo				
	Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]					Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]				
u_s [mm]	140	200	250	350	500	140	200	250	350	500
20	815	715	680	650	635	920	820	780	745	715
30	772	645	597	560	537	890	760	705	655	622
40	730	575	515	470	440	860	700	630	565	530
50	710	537	457	407	372	845	660	580	497	462
60	690	500	400	345	305	830	620	530	430	395
80	-	100	330	250	210	-	575	460	335	295
110	-	-	250	150	115	-	-	385	235	190

Lienee painovirhe,
oikeampi arvo n. 450°C

Kaavat ja taulukot lähteestä [2]

SWECO

FprEN 1994-1-2:2025, Annex F, lämpötilat

- Samankaltainen menetelmä kuin NCCI1 ohjeessa
- Teräsprofiilin, betonin ja raudoitteiden lämpötiloille koetuloksiin / numeerisiin laskelmiin sovitetut lausekkeet.
- Betonin ekvivalentti lämpötila määritetty painottaen taivutusjäykkyydellä
  - Poikkileikkauksen ulompien osien lämpötiloilla suurempi vaikutus kuin ydinosan lämpötiloilla.

Menetelmän pätevyysalue:

$$5 \le A_m / V \le 30$$

$$10 \le D / t_w \le 60$$

$$5 \le l_{fi} / D \le 30$$

For the concrete core ($\theta_{c,eq}$):

$$\theta_{c,eq} = 81.8 - 5.05 \cdot t_{fi} + 0.003 \cdot t_{fi}^2 - 15.07 A_m / V + 0.3 (A_m / V)^2 - 0.88 \cdot t_{fi} \cdot A_m / V + \\ + 7.43 \cdot t_{fi}^{0.842} \cdot (A_m / V)^{0.714}$$

For the steel tube ($\theta_{a,eq}$):

$$\theta_{a,eq} = -824.67 - 5.58 \cdot t_{fi} + 0.007 \cdot t_{fi}^2 - 0.01 t_{fi} \cdot A_m / V + 645.08 \cdot t_{fi}^{0.269} \cdot (A_m / V)^{0.017}$$

For the reinforcing bars ($\theta_{s,eq}$):

$$\theta_{s,eq} = \beta_3 \cdot (t_{fi} / u_s^2)^3 + \beta_2 \cdot (t_{fi} / u_s^2)^2 + \beta_1 \cdot (t_{fi} / u_s^2) + \beta_0$$

Coefficients for the equivalent temperature of the reinforcement $\theta_{s,eq}$ (°C)

	u_s (mm)	χ_3	χ_2	χ_1	χ_0
CHS	20	7236.5	-10458	5497.6	19.38
	30	58714	-41328	10910	11.179
	35	0	-12732	6518	91.208
	50	0	-55639	13768	-19.897
	55	0	-43201	10790	24.229
	70	0	0	8858	96.676

Kaavat lähteestä [6], taulukon kertoimet lähteestä [4].
FprEC4 sisältää samat kaavat ja kertoimet.

SWECO

Lämpötilojen vertailu

- Vertailu NCCI1 ja FprEC4 -menetelmillä määritellyille lämpötiloille
  - **Teräsprofiilille** FprEC4 antaa hieman (keskim. n. 16 °C) korkeamman lämpötilan
  - **Betonille** FprEC4 antaa
    - n. 75 % tapauksista (R60, R90, R120) keskimäärin 50 °C korkeamman lämpötilan
    - n. 25 % tapauksista (R30) keskimäärin 25 °C matalamman lämpötilan
  - **Raudoitteille** FprEC4 antaa
    - n. 50 % tapauksista keskimäärin 48 °C korkeamman lämpötilan
    - n. 50 % tapauksista keskimäärin 47 °C matalamman lämpötilan
- Pelkkien lämpötilojen vertailu ei vielä kerro tarkemmin lopputuloksesta, koska menetelmissä on eroa myös mulita osin.

					97 %	16		75 %	50		50 %	48
					3 %	0		25 %	-25		50 %	-47
				Teräsprofiili			**Betoni**			**Raudoitus**		
Profiili ja raudoitus		u_s [mm]		$\theta_{a,eq}$ [°C]	$\theta_{a,eq,NCCI}$ [°C]	$\theta_{a,eq}$ - $\theta_{a,eq,NCCI}$ [°C]	$\theta_{c,eq}$ [°C]	$\theta_{c,eq,NCCI}$ [°C]	$\theta_{c,eq}$ - $\theta_{c,eq,NCCI}$ [°C]	$\theta_{s,eq}$ [°C]	$\theta_{s,eq,NCCI}$ [°C]	$\theta_{s,eq}$ - $\theta_{s,eq,NCCI}$ [°C]
D193.7x4	6T12	30	R30	704	704	0	336	378	-42	331	265	66
D219.1x4	6T16	30	R30	701	698	2	312	349	-38	331	254	77
D244.5x6	6T16	35	R30	698	693	5	293	326	-33	243	209	34
D273x5	6T16	35	R30	696	687	9	275	304	-28	243	204	39
D323.9x6	8T20	35	R30	691	675	17	250	272	-22	243	197	46
D406.4x8	10T20	35	R30	686	654	31	220	235	-15	243	194	50
D457x8	10T25	35	R30	683	640	43	206	218	-12	243	194	50
D508x10	12T25	35	R30	680	621	58	193	204	-11	243	194	50
D193.7x4	6T12	30	R60	896	894	2	544	504	40	572	498	74
D219.1x4	6T16	30	R60	894	891	2	508	465	43	572	475	97
D244.5x6	6T16	35	R60	891	888	3	477	432	44	380	416	-36
D273x5	6T16	35	R60	888	884	4	447	402	45	380	405	-25
D323.9x6	8T20	35	R60	884	877	7	402	359	43	380	389	-9
D406.4x8	10T20	35	R60	877	863	15	345	309	36	380	381	-1
D457x8	10T25	35	R60	874	850	24	317	286	31	380	381	-1
D508x10	12T25	35	R60	871	826	45	293	267	26	380	381	-1
D193.7x4	6T12	35	R90	990	978	12	686	618	68	501	625	-123
D219.1x4	6T16	35	R90	987	975	12	643	575	68	501	589	-88
D244.5x6	6T16	35	R90	985	973	12	606	540	66	501	562	-61
D273x5	6T16	35	R90	982	970	12	568	506	62	501	547	-45
D323.9x6	8T20	40	R90	977	965	12	510	458	51	471	482	-11
D406.4x8	10T20	40	R90	971	959	12	434	402	32	471	459	12
D457x8	10T25	40	R90	967	957	11	395	375	20	471	449	23
D508x10	12T25	40	R90	964	955	9	361	353	8	471	440	31
D193.7x4	6T12	35	R120	1044	1015	29	790	712	78	608	745	-138
D219.1x4	6T16	35	R120	1041	1015	26	745	666	79	608	706	-99
D244.5x6	6T16	40	R120	1039	1015	24	703	624	80	572	638	-65
D273x5	6T16	40	R120	1037	1015	22	661	581	80	572	615	-43
D323.9x6	8T20	45	R120	1032	1015	17	593	515	78	545	550	-6
D406.4x8	10T20	45	R120	1026	1015	11	502	440	62	545	518	27
D457x8	10T25	45	R120	1022	1015	7	455	412	43	545	506	39
D508x10	12T25	45	R120	1019	1015	4	414	399	15	545	496	49

SWECO

Keskeisesti puristettu pilari,

Laskentamenetelmät ja niiden vertailu

SWECO

NCCI1 –ohjeen menetelmä, nurjahduskestävyys

- Nurjahduskestävyys määritetään nurjahduskäyrän c perusteella käyttäen palotilanteen taivutusjäykkyyttä.
- Toisen kertaluvun ilmiöt huomioidaan nurjahduskaavoissa, voimasuureet lineaarisesta laskennasta.

$$\boxed{(EI)_{fi.eff}=\varphi_{a.\theta}(EI)_{a.\theta}+\varphi_{s.\theta}(EI)_{s.\theta}+\varphi_{c.\theta}(EI)_{c.\theta}} \qquad (1.4a)$$

$$(EI)_{a.\theta}=k_{Ea.\theta}(\theta_a)E_aI_a \qquad (1.4b)$$

$$(EI)_{s.\theta}=k_{Ea.\theta}(\theta_s)E_aI_s \qquad (1.4c)$$

$$(EI)_{c.\theta}=E_{c.sec.\theta}(\theta_{c.equ})I_c=\frac{f_{c.\theta}(\theta_{c.equ})}{\varepsilon_{c1.\theta}(\theta_{c.equ})}I_c=k_{Ec.\theta}(\theta_{c.equ})\frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c1}}I_c \qquad (1.4d)$$

Taulukko 8a. *Sovituskertoimien $\varphi_{a.\theta}$ arvot putkiprofiilin koon mukaisesti*

Stand. palo	Pyöreät putkiprofiilit, ulkohalkaisija D							Neliöputkiprofiilit, ulkopuolinen sivumitta b	
	135	165	200	220	250	273	≥323	≤150	≥180
R30	0,45	0,5	0,60	0,70	0,70	0,70	0,70	0,45	0,60
R60	-	0,4	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70	0,45	0,60
R90	-	-	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	-	0,45
R120	-	-	0,30	0,30	0,30	0,35	0,40	-	0,35

Betonille $\varphi_{c,\theta}$ = 1,2

Taulukko 8b. *Sovituskertoimien $\varphi_{s.\theta}$ arvot tankojen sijainnin mukaisesti*

u_s [mm]	30	40	50	≥60
$\varphi_{s.\theta}$	0,8	0,9	1,0	1,0

Aksiaalikuormitetun pilarin puristuskestävyys

Pilarin puristuskestävyys $N_{fi.Rd}$ lasketaan nurjahduskestävyytenä lausekkeesta

$$N_{fi.Rd}=\chi(\bar{\lambda}_\theta)N_{fi.pl.Rd} \qquad (1.5)$$

missä $\chi(\bar{\lambda}_\theta)$ on pilarin palonaikaisesta muunnetusta hoikkuudesta $\bar{\lambda}_\theta$ riippuva pienennyskerroin, joka lasketaan aina eurooppalaisen nurjahduskäyrän c mukaisesti (SFS-EN 1993-1-1 kohta 6.3.1).

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_\theta$ on

Ekvivalentti alkukaarevuus L/150

$$\bar{\lambda}_\theta=\sqrt{\frac{N_{fi.pl.R}}{N_{fi.cr}}} \qquad (1.6)$$

missä $N_{fi.pl.R}$ on lausekkeiden (1.3a..d) mukainen poikkileikkauksen kestävyys, kun osavarmuusluvut $\gamma_{M.fi.a}$, $\gamma_{M.fi.s}$ ja $\gamma_{M.fi.c}$ ovat ykkösiä. $N_{fi.cr}$ lasketaan pilarin palonaikaisen tehollisen pituuden $L_{e.\theta}$ ja tehollisen taivutusjäykkyyden $(EI)_{fi.eff}$ funktiona

$$N_{fi.cr}=\frac{\pi^2(EI)_{fi.eff}}{L_{e.\theta}^2} \qquad (1.7)$$

Kaavat ja taulukot lähteestä [2]

SWECO

FprEN 1994-1-2:2025, Annex F, nurjahduskestävyys

- Nurjahduskäyrään perustuva menetelmä
  - Lähes identtinen NCCI1 –menetelmän kanssa
- Taivutusjäykkyyden korjauskertoimissa teräsprofiilin ja raudoitteiden osalta hieman eroa (NCCI1 antaa suuremmat arvot)
- Taivutusjäykkyys NCCI1 –menetelmällä laskettuna usein hieman suurempi (n. 20-30 %)

$$(EI)_{fi,eff} = \varphi_{a,\theta} \cdot E_a(\theta_{a,eq}) I_a + \varphi_{s,\theta} \cdot E_s(\theta_{s,eq}) I_s + \varphi_{c,\theta} \cdot E_c(\theta_{c,eq}) I_c$$

Betonille $\varphi_{c,\theta}$ = 1,2

$$\varphi_{a,\theta} = 0.75 - 0.023 \cdot (A_m / V)$$

$$\varphi_{s,\theta} = 0.8 - 0.002 \cdot t_{fi}$$

Raudoitettujen keskeisesti kuormitettujen liittopilarien nurjahdusmitoitus ohjeistetaan FprEC4:ssä tekemään käyttäen nurjahduskäyrää **b** (EN 1993-1-1:2022).

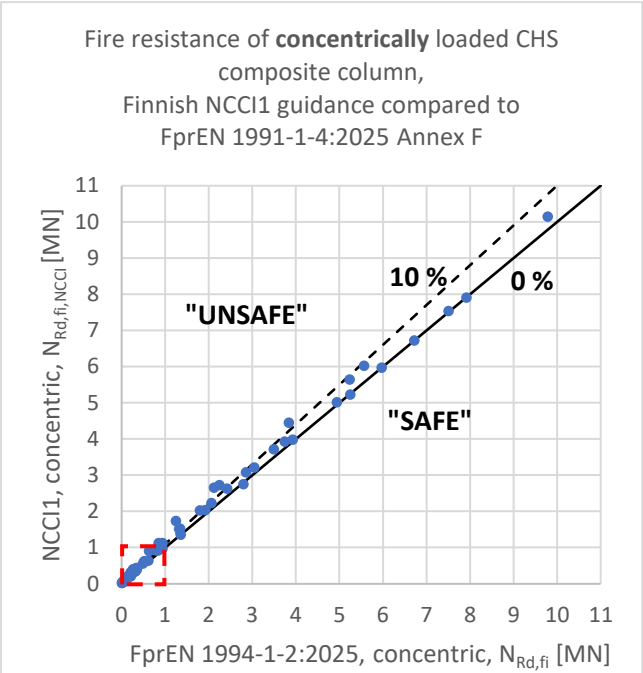
→ Ekvivalentti alkukaarevuus L/179

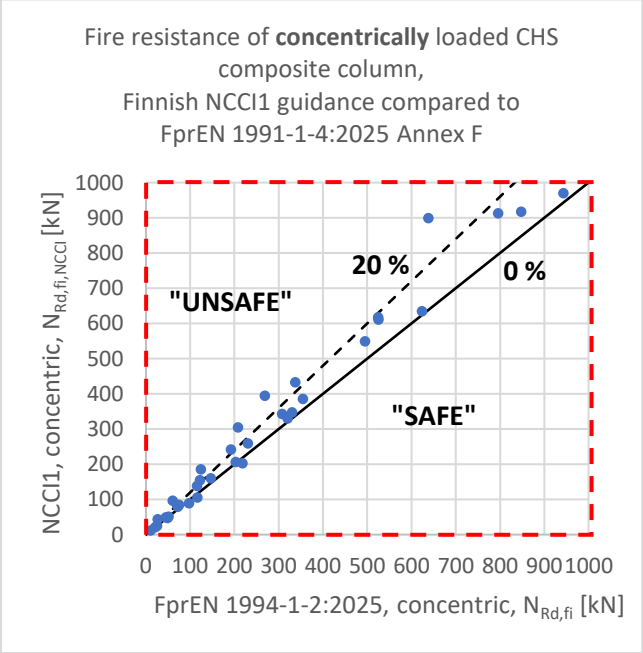
Kaavat lähteestä [6]. FprEC4 sisältää samat kaavat.

SWECO

Nurjahduskestävyyden vertailu NCCI1 vs FprEC4, keskeinen kuorma

- Viereisissä kuvissa on vertailtu erilaisten (N=64 kpl) keskeisesti kuormitettujen liittopilarien nurjahduskestävyyttä laskettuna NCCI1 ja FprEC4 –menetelmillä
- NCCI1 menetelmällä saadut kestävyydet ovat suurempia
  - 80% tapauksista suurempi, keskimäärin +16 %.
- Eron syynä on NCCI1 menetelmän antama suurempi taivutusjäykkyys
  - 90 % tapauksista suurempi, keskimäärin +28 %
- **Keskeisesti kuormitetulle pilarille NCCI1 ja FprEC4 tuloksissa vain pieni ero.**





Epäkeskeisesti puristettu pilari,

Laskentamenetelmät ja niiden vertailu

SWECO

NCCI1 –ohjeen menetelmä, puristus + taivutus (N + M)

- Taivutusmomentin vaikutus nurjahduskestävyyteen huomioidaan NCCI1 –ohjeen kaavoilla normaalivoiman epäkeskeisyytenä
- Kaavoille ei ole tiedossa julkaistua tausta-aineistoa.
- Menetelmä on helppo käyttää
- Epäkeskeisyyden laskennassa käytettävä taivutusmomentti ei pidä sisällään alkukaarevuudesta aiheutuvaa momenttia, koska se on sisällytetty nurjahduksen huomioivaan kertoimeen χ

$$e_{fi} = \frac{M_{fi.Ed}}{N_{fi.Ed}}$$

$$N_{fi.Rd.\delta} = XN_{fi.Rd}\,,\quad X = 0{,}5\left(B_{fi} - \sqrt{B_{fi}^{2} - 4/\chi(\bar{\lambda}_{\theta})}\right) \qquad (1.9)$$

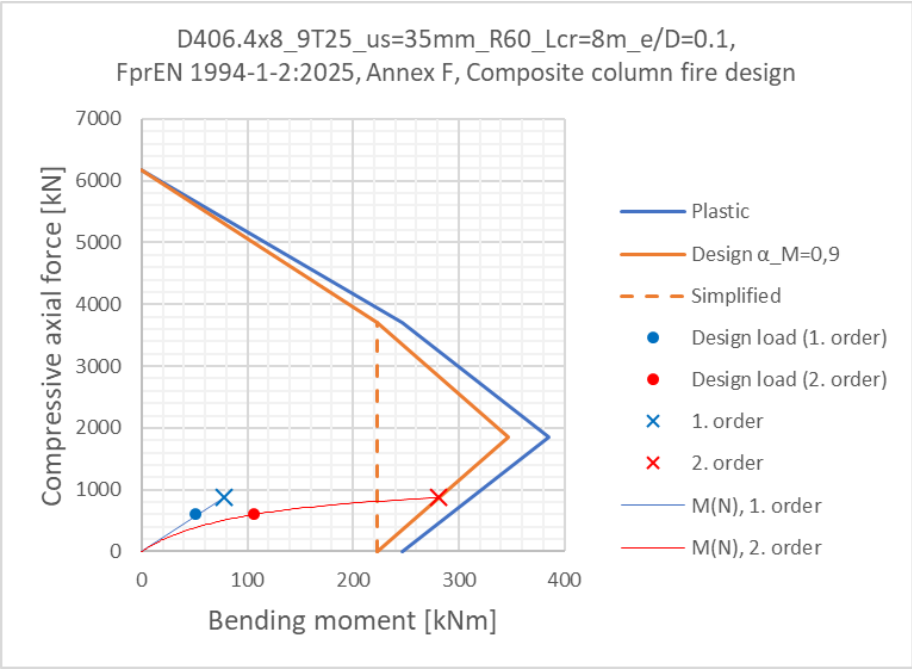
$$B_{fi} = 1 + \frac{1}{\chi(\bar{\lambda}_{\theta})} + e_{fi}\,\frac{N_{fi.pl.Rd} - N_{fi.c.Rd}}{M_{fi.pl.Rd}} \qquad (2.0)$$

Kaavat lähteestä [2]

SWECO

FprEN 1994-1-2:2025, Annex F, puristus + taivutus (N + M)

- Poikkileikkauksen N-M kapasiteettikuvaajaan perustuva menetelmä (vastaavasti kuin normaalilämpötilassa)
- Myös palotilanteessa kapasiteettikuvaajaa pienennetään varmuuskertoimella $\alpha_M = 0{,}9$
- Toisen kertaluvun ilmiöt huomioidaan voimasuureissa (taivutusmomentin korotus)
- Palotilanteen taivutusjäykkyys tyypillisesti n. 5-15 % murtorajatilan jäykkyydestä



Murtorajatila [14]: $(EI)_{\text{eff,II}} = K_o\,(E_a I_a + E_s I_s + K_{e,\text{II}}\, E_{cm}\, I_c)$

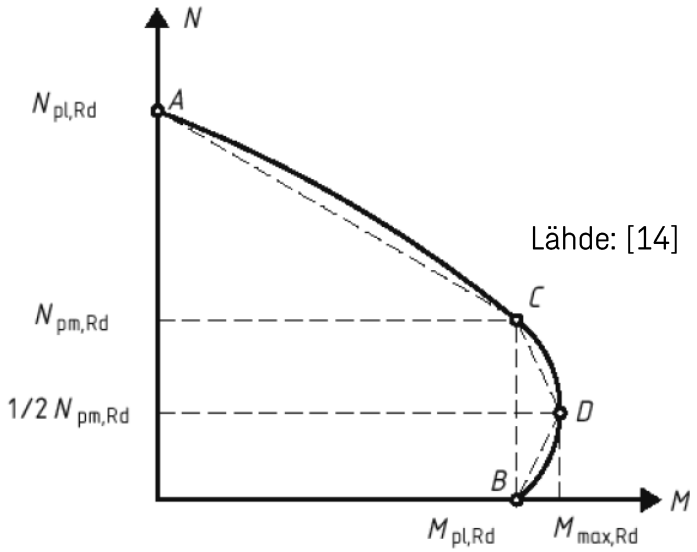
Palotilanne [6]: $(EI)_{\text{fi,eff,II}} = \boxed{K_\theta} K_o \left[\varphi_{a,\theta} \cdot E_a(\theta_{a,eq}) I_a + \varphi_{s,\theta} \cdot E_s(\theta_{s,eq}) I_s + K_{e,II} \cdot \varphi_{c,\theta} \cdot E_c(\theta_{c,eq}) I_c\right]$

$K_0 = 0{,}9$ $\quad t_{fi} < 60\ min$: $\quad K_\theta = 0{,}5 + 160\rho_s{}^2$

$K_{e,\text{II}} = 0{,}5$ $\quad t_{fi} \geq 60\ min$: $\quad K_\theta = 0{,}9$ $\quad$ Lähde: [6]

For steel grades between S235 and S355 inclusive, the coefficient α_M should be taken as 0.9, while for steel grades S420 and S460, a value of 0.8 should be used, as in cold design.

Lähde: [6]



Lähde: [14]

Epäkeskeisesti kuormitetun (N + M) liittopilarin nurjahduskestävyyden vertailu

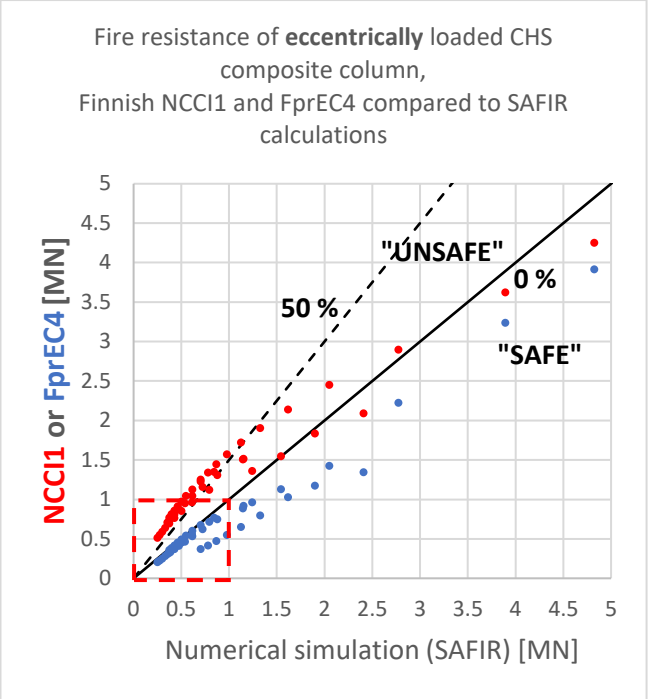
- Viereisissä kuvissa on vertailtu erilaisten (N=43 kpl) **epäkeskeisesti** kuormitettujen (e/D = 0,05 .. 1,0) liittopilarien nurjahduskestävyyttä laskettuna yksinkertaisilla menetelmillä (NCCI1 ja FprEC4) ja verraten niitä kehittyneellä menetelmällä (SAFIR-ohjelma) laskettuihin arvoihin.

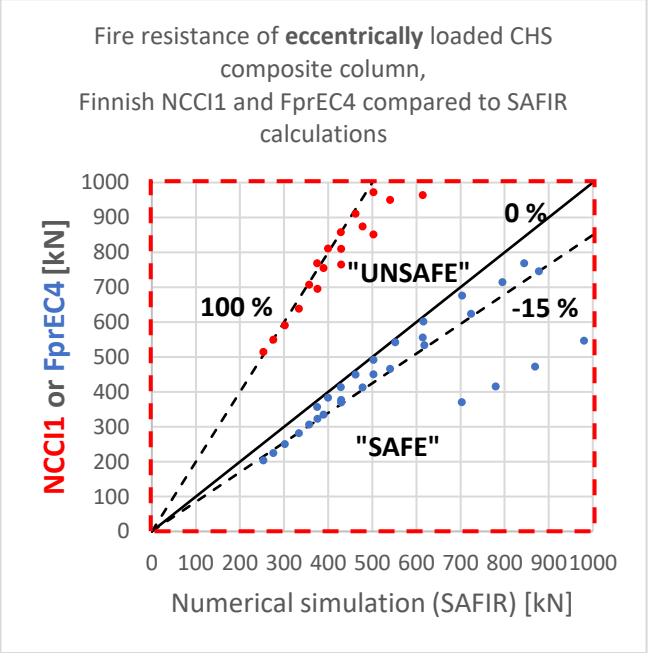
- NCCI1 -menetelmällä saadut kestävyydet ovat pääosin selvästi (keskimäärin 60 %) **suurempia (eli epävarmemmalla puolen)** verrattuna SAFIR-laskelmiin.

- FprEC4 -menetelmällä saadut kestävyydet ovat hieman (keskimäärin 20 %) **pienempiä (eli varmemmalla puolen)** verrattuna SAFIR-laskelmiin.

- Epäkeskisellä kuormalla NCCI1 menetelmä antaa noin kaksinkertaisia nurjahduskestävyyksiä verrattuna FprEC4 menetelmään. → Liittopilarien koot kasvavat uuden Eurokoodin myötä.
  - **Esim.** R60, L_{cr} = 8 m, e/D = 0,1, N_{fi} = 864 kN (hallin keskipilari, A_{load} = 540 m²)
    NCCI1: D355.6x6, 7T25, u_s=50 mm
    FprEC4: D406.4x8, 9T25, u_s=35 mm (arvio materiaalikustannusten noususta: +40 %)

- Yksinkertaisten menetelmien eron suurimpana syynä todennäköisesti FprEC4 menetelmän pienehkö taivutusjäykkyys (2. kertaluvun momentin laskennassa).



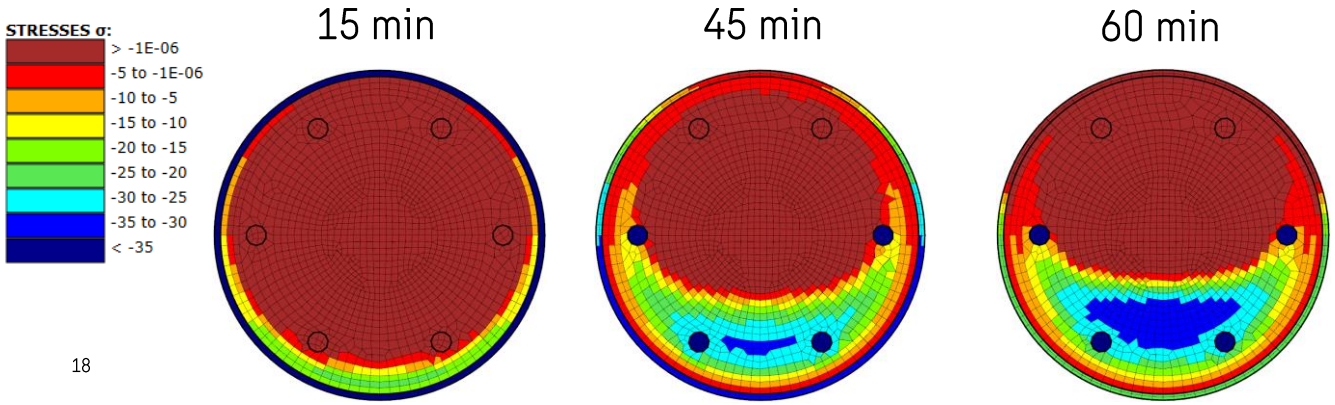


Kehittyneet menetelmät palotilanteen rakenneanalyysissä

SWECO

Nurjahduskestävyyden määritys kehittyneillä menetelmillä

- Rakenteen palonkestävyys voidaan määrittää ns. kehittyneillä menetelmillä. Tällöin on mahdollista huomioida myös osittainen paloaltistus (esim. seinäpilari, ks. [8]) tai paikallinen palo pilarin lähellä.
- Huomioita:
  - Teräsprofiilin ja betonin välinen kontakti / kitka vaikuttaa kestävyyteen (ehkäpä epäintuitiivisesti) siten, että teräsprofiilin liukuman estäminen (eli täyden liittovaikutuksen olettaminen) pienentää pilarin laskennallista kapasiteettia. [4]
  - Kuormitusjärjestyksellä on merkitystä (eli kuormittaako pilarin ensin ja lämmittää sen jälkeen, vai tekeekö toisin päin)
  - Alkukaarevuus L/1000 kehittyneitä menetelmiä käytettäessä.
  - **Laskenta vaatii tulosten kriittistä tarkastelua ja vertailua polttokoetuloksiin.**



SFS-EN 1994-1-2:2005 + AC:2009

4.4.3 Mekaaninen vaste

(1) P Mekaanista vastetta koskevien kehittyneiden laskentamenetelmien tulee perustua yleisesti hyväksyttyihin rakenteiden mekaniikan periaatteisiin ja oletuksiin, lämpötilan vaikutukset huomioon ottaen.

(2) P Mekaanisen vasteen mallissa tulee myös ottaa huomioon:

- mekaanisten kuormien, mittaepätarkkuuksien ja lämpörasitusten yhteisvaikutukset
- materiaalien lämpötilasta riippuvat mekaaniset ominaisuudet
- geometrisesti epälineaariset vaikutukset
- epälineaaristen materiaaliominaisuuksien vaikutukset, mukaan lukien kuormituksen pienenemisen vaikutukset rakenteen jäykkyyteen.

(3) P Sekä lämpötilojen muuttumisesta että lämpötilaeroista johtuvat termiset muodonmuutokset ja jännitykset tulee ottaa huomioon.

(4) Mikäli käytetään kohtien 3.1 ja 3.2 mukaisia jännityksen ja muodonmuutoksen välisiä yhteyksiä, ei korkeassa lämpötilassa tapahtuvan virumisen vaikutusta tarvitse erikseen ottaa huomioon.

(5) P Laskentamallin avulla saatujen siirtymien tulee murtorajatilassa pysyä tarpeen mukaan rajallisina, jotta rakenteen kaikkien osien välinen yhteensopivuus murtorajatilassa säilyy.

4.4.4 Kehittyneiden laskentamallien todentaminen

(1) P Kehittynyt laskentamalli tulee todentaa seuraavien sääntöjen (2)P ja (4)P mukaisesti.

(2) P Laskentamallin tuottamat tulokset tulee osoittaa oikeiksi asianmukaisten koetulosten perusteella.

(3) Laskentojen tulokset voivat sisältää siirtymätilaa, lämpötiloja ja palonkestävyysaikoja koskevia arvoja.

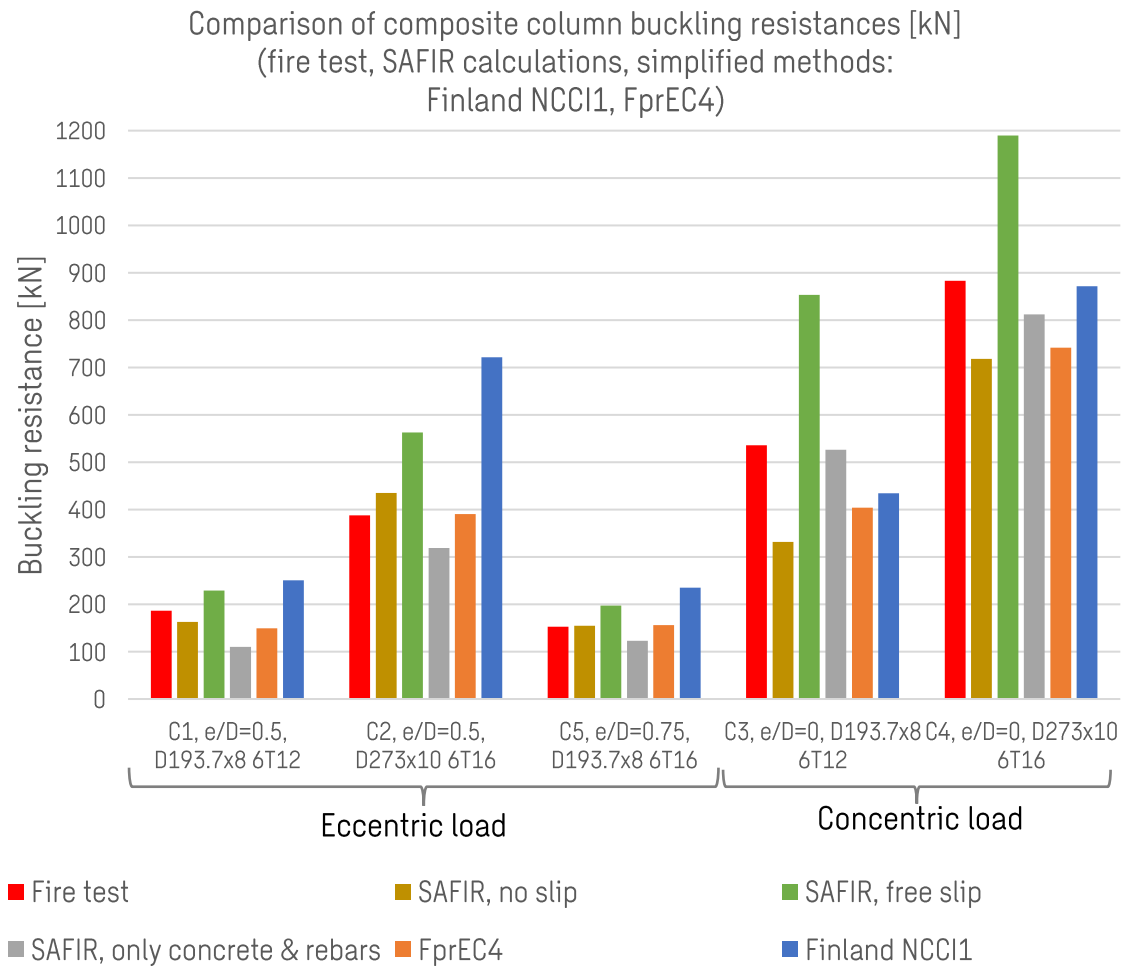
(4) P Kriittiset parametrit tulee tarkistaa herkkyysanalyysin avulla sen takaamiseksi, että malli noudattaa luotettavia teknistieteellisiä periaatteita.

(5) Kriittiset parametrit voivat liittyä nurjahduspituuteen, rakenneosien kokoon, kuormitustasoon jne.

SWECO

Eri menetelmien vertailu polttokoetuloksiin

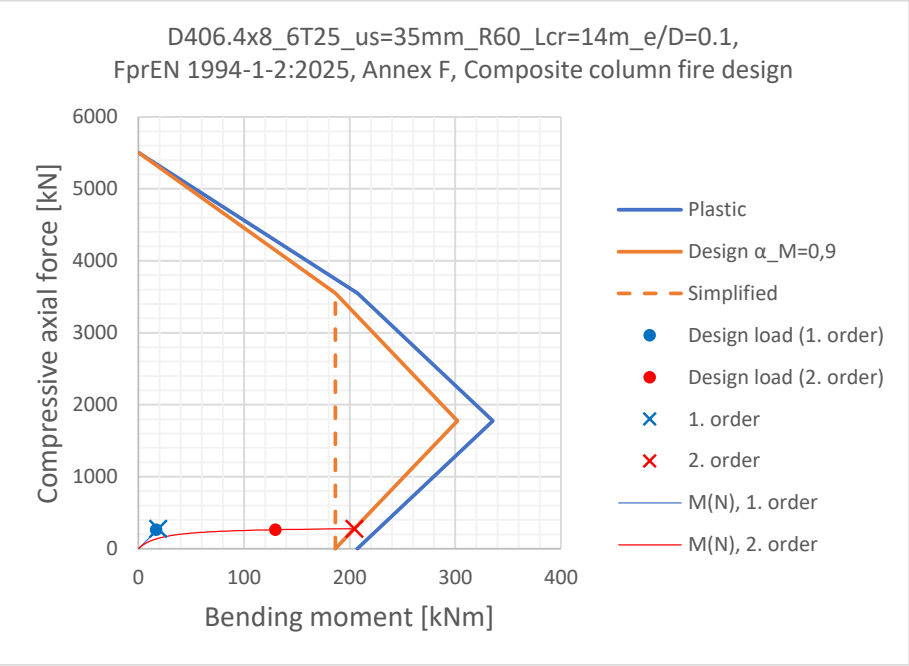
- Yksinkertaisia menetelmiä (FprEC4 ja NCCI1) ja SAFIR-laskelmia verrattiin FRISCC hankkeen [4] polttokoetuloksiin (5 kpl)
- Lämpöanalyysissä (SAFIR) huomioitiin profiilin ja betonin väliin muodostuva rako.
- Rakenneanalyysi tehty vertailun vuoksi eri oletuksin:
  1. Olettaen täysi liittovaikutus (no slip)
  2. Olettaen vapaa liukuma (free slip), mutta asettaen pystykuorma heti analyysin alussa betoniosalle, joten teräsputki tuo vain taivutusjäykkyyttä.
  3. Jättämällä teräsputki kokonaan huomiotta rakenneanalyysissä
- FprEC4 ja SAFIR laskelmat täydellä liittovaikutuksella olivat yleisesti lähimpänä polttokoetuloksia.



Sivusiirtyvän kehän pilarin palomitoitus

- Sivusiirtyvän pilarin palomitoitukseen ei ole virallisia yksinkertaisia menetelmiä.
- Karkeita menetelmiä:
  1. Laskentamallissa ekvivalentti teräspilari, jonka poikkileikkaus on määritetty sellaiseksi, että taivutusjäykkyys vastaa Eurokoodin mukaan laskettua palotilanteen jäykkyyttä $(EI)_{eff,II,fi}$ Lasketaan voimasuureet huomioiden geometrinen epälineaarisuus ja tarkistetaan kestävyys kapasiteettikuvaajalla.
  2. Määritetään laskentamallilla nurjahduspituus ja lasketaan voimasuureet Eurokoodin kaavoilla ja kestävyys kapasiteettikuvaajalla.
     - Pitkä nurjahduspituus ylittää helposti myös FprEC4 ylärajan: $L_{cr,fi,max} = 30*D$

Huom! Näitä menetelmiä tulee käyttää varoen ja tiedostaen, että poikkileikkauksen sisäiset lämpöjännitykset saattavat vuorovaikuttaa 2. kertaluvun vaikutusten kanssa, eikä yksinkertaisia menetelmiä ole kalibroitu siten, että mukana olisi ollut sivusiirtyvien pilareiden polttokokeita / numeerisia laskelmia.



- Kehittyneet menetelmät ovat suositeltava vaihtoehto
- Esim.
  - D406.4x8, 6T25, us=35mm, R60, Lcr = 2,0*7 m = 14 m, e/D = 0,1, alkuvinous L/300
  - FprEC4 → kestävyys 286 kN
  - SAFIR → kestävyys 264 kN (-8 %)

SWECO

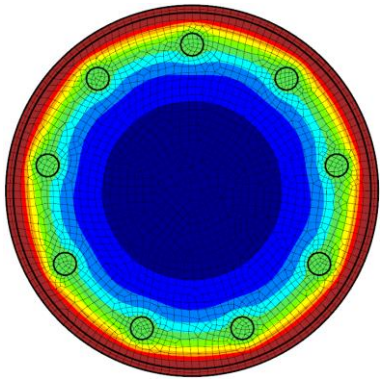
Yhteenveto

- Toisen sukupolven Eurokoodissa on uusi palomitoitusmenetelmä liittopilareille (velvoittavassa liitteessä)
  - Laajemmat käyttömahdollisuudet, mutta nykyisen NCCI1 tavoin rajattu sivusiirtymättömien kehien pilareihin

- Menetelmä johtaa epäkeskisellä kuormalla järeämpiin pilareihin kuin nykyinen NCCI1 –ohjeen menetelmä. Keskeisellä kuormalla menetelmien ero on pienehkö.
  - Kattavammat vertailut (myös muut poikkileikkaukset) olisi hyvä jatkoselvitysaihe.

- Kehittyneillä menetelmillä ei juuri käyttörajoituksia, kunhan kaikki oleelliset murtotavat ja ilmiöt huomioidaan ja tulokset varmennetaan soveltuvilla polttokoetuloksilla.

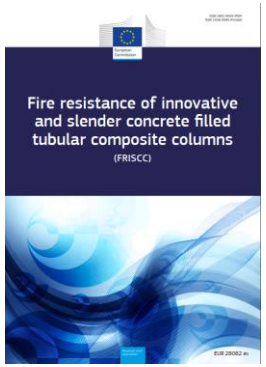
- Sivusiirtyvän pilarin palomitoitukseen ei ole virallisia yksinkertaisia menetelmiä.
  - Suositellaan käyttämään kehittyneitä menetelmiä.

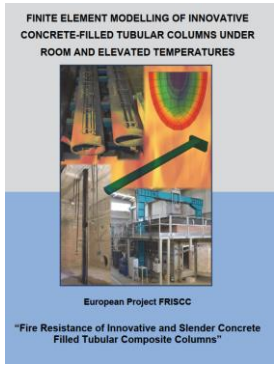


SWECO

Lähteet

1. SFS-EN 1994-1-2:2005 + AC:2009 + A1:2014. Eurokoodi 4. Betoni-teräs –liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus.
2. Ympäristöministeriö. Suomen Rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betoni-teräs -liittorakenteet. 2016. Linkki ympäristöministeriön sivulle.
3. FprEN 1994-1-2:2025. Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures — Part 1-2: Structural fire design.
4. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Laim, L., Christophe, R., Rodrigues, J. P., Espinós, A. et al., Fire resistance of innovative and slender concrete filled tubular composite columns (FRISCC) – Final report, Publications Office, 2016, https://data.europa.eu/doi/10.2777/37808
5. Espinós Capilla, A.; Romero García, ML. (2013). FINITE ELEMENT MODELLING OF INNOVATIVE CONCRETE-FILLED TUBULAR COLUMNS UNDER ROOM AND ELEVATED TEMPERATURES. Editorial Universitat Politècnica de València. https://riunet.upv.es/handle/10251/33434
6. V. Albero, A. Espinós, M.L. Romero, Y.C. Wang, C. Renaud, P. Schaumann, E. Nigro, Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns, Thin-Walled Structures, Volume 130, 2018, pp. 641-651, https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.017.
7. BY 58 Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus — Eurocode 4 –oppikirja. 2012. 1. painos. Teräsrakenneyhdistys ry / Suomen Betoniyhdistys ry. ISBN 978-952-9683-52-9.
8. Salonen, E. Pyöreän betoni-teräs –liittopilarin palomitoitus. 2020. Insinöörityö. Satakunnan ammattikorkeakoulu. https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202005128636
9. Jokinen, T. Seinää vasten olevat liittopilarit tulipalossa. 2013. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201310241378
10. Peltomaa, M. Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu Eurokoodien mukaan. 2008. Tampereen teknillinen yliopisto.
11. Innos, T. Betonitäytteisen teräsputkiprofiililiittopilarin rakenteellinen toiminta palossa ja kestävyyksien vertailu hiili- ja ruostumattomalla teräsprofiililla. 2019. Diplomityö. Tampereen yliopisto. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201908303065
12. Kielenniva, K. Pyöreän betoni-teräs-liittopilarin suunnittelu ja mitoitus murtorajatilassa ja palotilanteessa. 2017. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201708241786
13. Bzdawka, K. Composite column - Calculation examples. 2010. Tampereen teknillinen yliopisto. http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-2011041510618
14. SFS-EN 1994-1-1:2004 + AC:2009. Eurokoodi 4. Betoni-teräs –liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.





SWECO

SWECO