

Dunwandig koudgevormde profielen: van theorie naar praktijk



Brandveiligheid koudgevormde dunwandige profielen – R 15 ?

Staalbouwdag: 18/11/2010 – Louvain-La-Neuve

Luc Schueremans, Iveta Georgieva: K.U.Leuven

Lincy Pyl, Willem Dierckx: Lessius Mechelen, Campus De Nayer

www.TETRA-CFS.be



Inleiding



Inhoud:

- Achtergrond vanuit TETRA-project CFS
- Nieuwe wetgeving Bijlage 6 “Industriegebouwen” (Staatsblad 15-07-2009)
- Structurele elementen Type I-II
- Type II: “*Geen R bepaald*” – impliciet R 15 voor slanke constructies
- Aftasten toepassing van Bijlage 6 \Rightarrow Fire Safety Engineering
- 1. Eenvoudige modellen aan **weerstandzijde**:
 - Ligger
 - Dubbele portiek
- 2. Mogelijkheden aan de zijde van de **brandbelasting**
 - Parametrische brand – natuurlijke brandkrommen
 - Equivalente tijdsduur ($t_{e,d}$)
- Validatie (verder onderzoek) – brandproef op reële schaal
- Conclusies



Verkenkend onderzoek

- **Brandwerendheid** → FSE
- **Slip thv bouten** → alternatief
- **Ontwerp/optimalisatie verbindingen**
→ berekeningsvereisten

Design

Ontwerpen volgens EN 1993-1-3 :2007
Stap 1 : **bundeling** informatie

Verkenning

Innovatierapport met
onderzoekresultaten verkenning

Ontwerpen volgens EN 1993-1-3 :2007
Stap 2: **vertaling in boekvolumes**
Stap 3: **praktijkvoorbeelden**
Stap 4: generieke **flowcharts**

Vertaling

→ Naar onderwijs en industrie toe

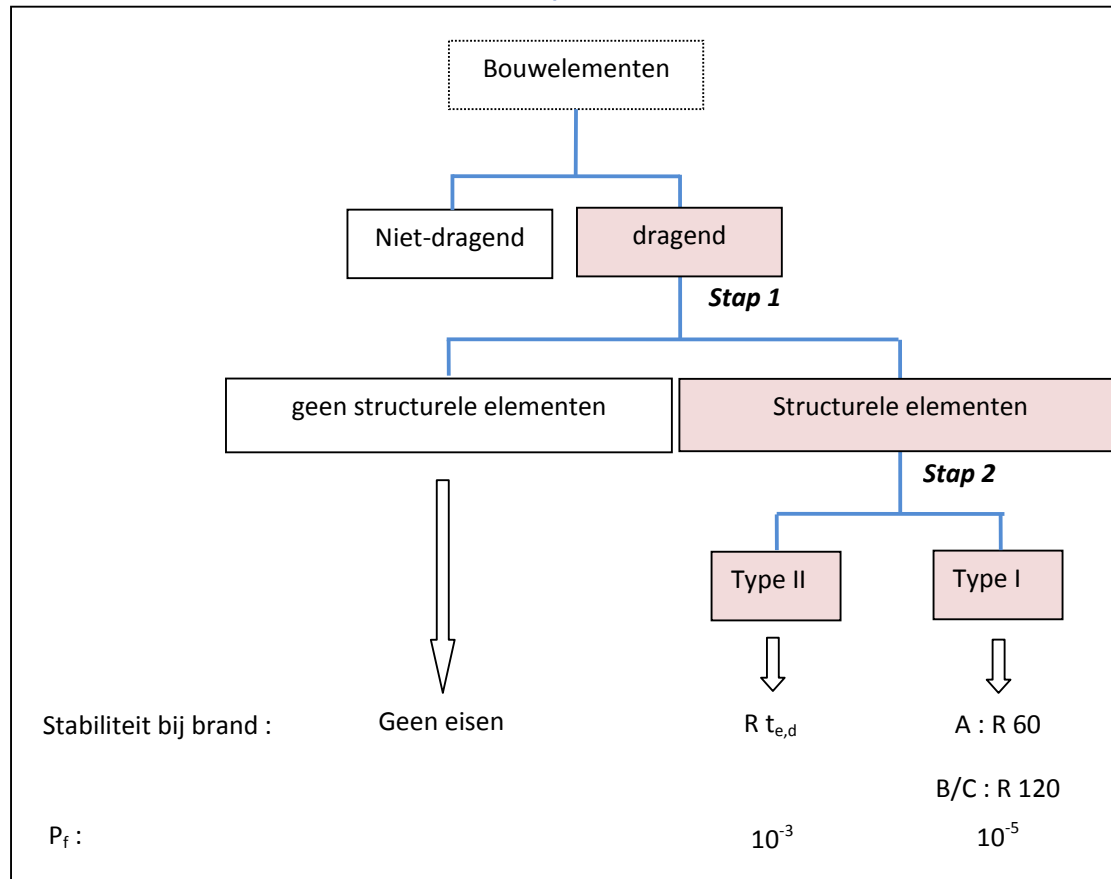
Verspreiding

Studiedag
Project website
Cursusmodules
Academische publicaties
Interactie met gebruikerecommissie

Structurele elementen



Structurele elementen Type I/II – onderscheid en impact;



Stap 1: criterium – **gevaar op voortschrijdende instorting**

Dragende bouwelementen die geen structurele elementen zijn;

Dragende bouwelementen die structurele elementen zijn;

Stap 2: ENKEL voor de dragende bouwelementen die structurele elementen zijn, geldt het criterium: **grens opgelegd aan voorschrijdend falen of beschadiging van compartimentwand:**

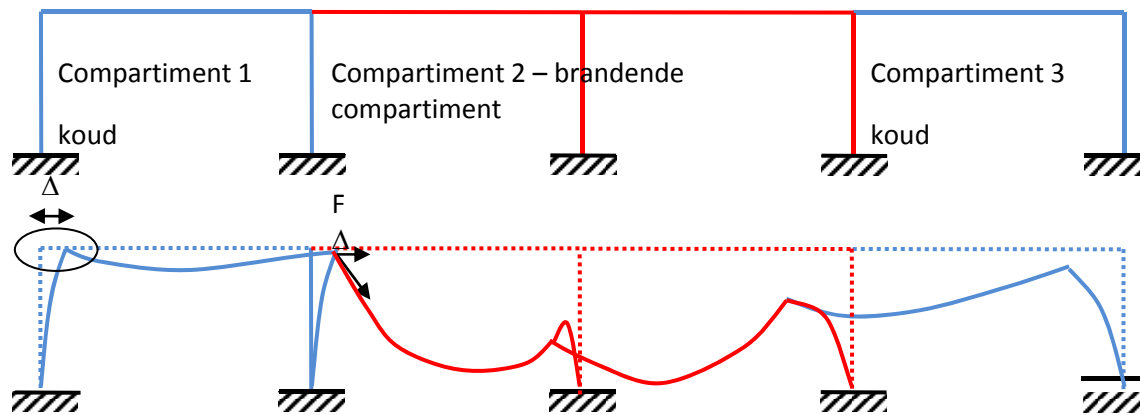
type I elementen;
type II elementen.

Eén brandcompartiment: alle structurele elementen: per definitie structurele elementen Type II

Typologie 102 - kader



Structurele elementen Type I/II – onderscheid en impact;



Compartment 1:

- Tussenkolom behoort tot koude constructie
- én: kan **horizontale krachten (F)** opnemen;
- én: is compatibel met **verplaatsingen (Δ)**;

→ Structureel element TYPE II

Compartment 2 en 3:

- Tussenkolom behoort tot warme constructie – leidt tot voortschrijdend falen over compartimentwand heen of tot schade aan compartimentwand.

→ Structureel element TYPE I

Impact Structurele elementen



Structurele elementen Type I/II – onderscheid en impact;

Minimaal vereiste brandweerstand voor structurele elementen		
Type I	R 60	Voor een gebouw of deel ervan van klasse A ($q_{fi,d} \leq 350 \text{ MJ/m}^2$)
	R 120	Voor een gebouw of deel ervan van klasse B of C ($q_{fi,d} > 350 \text{ MJ/m}^2$)
Type II	$R t_{e,d}$	Algemene regel
	"Geen R bepaald" (impliciet R 15) R 30 (of hoger)	Enkel voor type oplossingen in functie van de grootte van het compartiment
Opm.	R 30	Tussenvloeren en hun draagstructuur

Weerstand - Nomogrammen



Uitgangspunt – vereenvoudigde rekenmethodiek – algemene werkwijze:

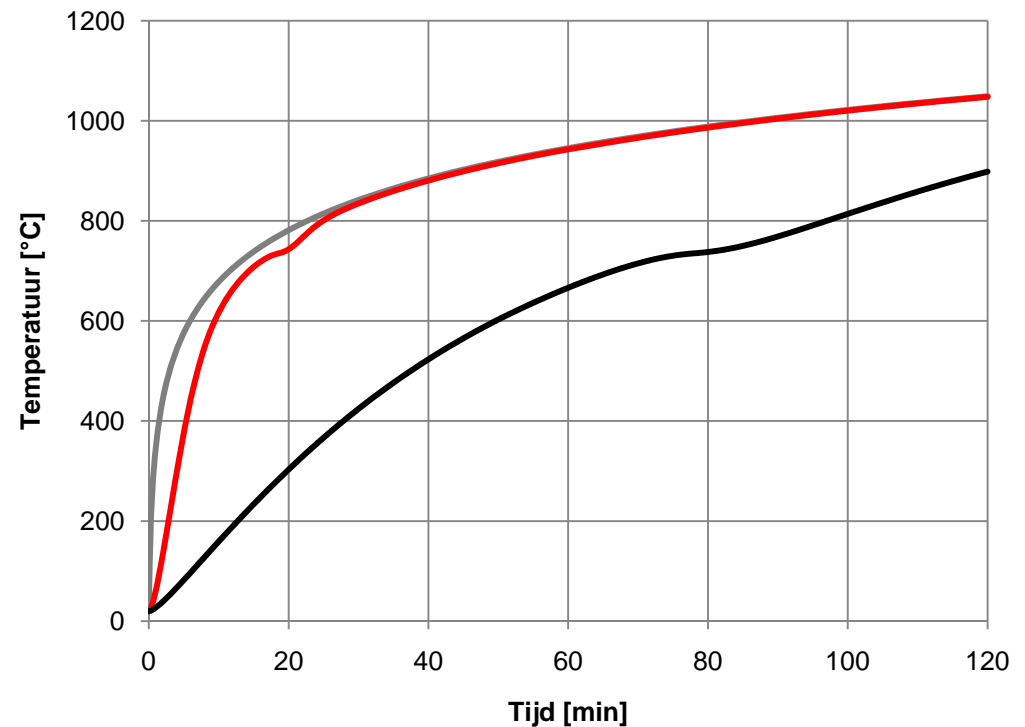
- ISO-834 brandkromme;
- Gastemperatuur gekend;
- Staaltemperatuur berekenbaar;
- Profielweerstand bepaalbaar;
- Vergelijking van weerstand met belastingeffect: $E_{d,fi} \leq R_{d,fi,t}$

Weerstand - Nomogrammen



Uitgangspunt - rekenmethodiek:

- ISO-834 brandkromme;
- Gastemperatuur gekend;
- **Staaltemperatuur** berekenbaar.



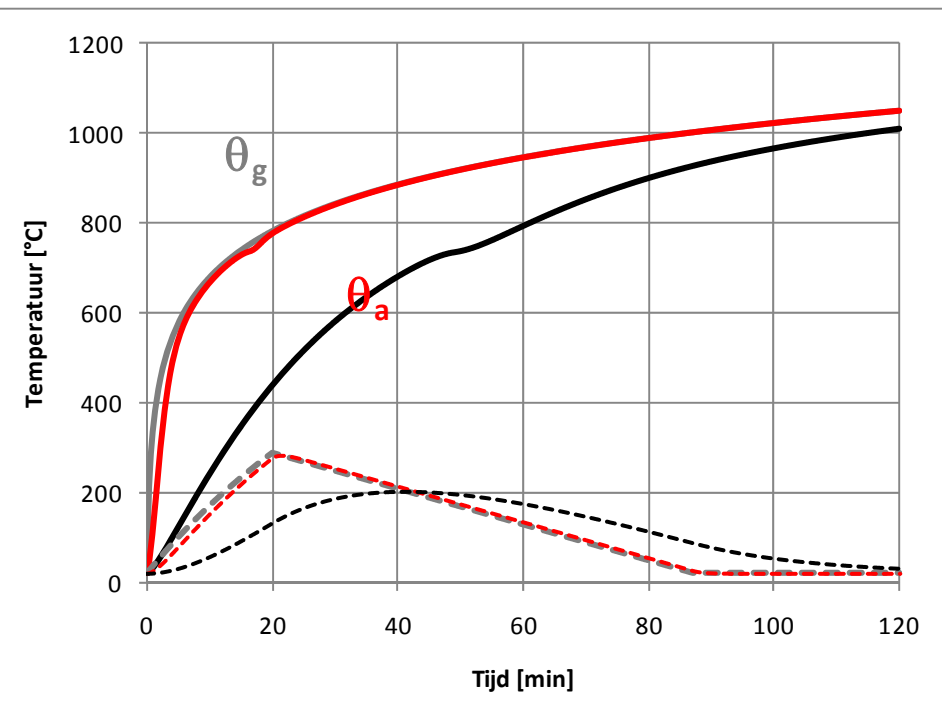
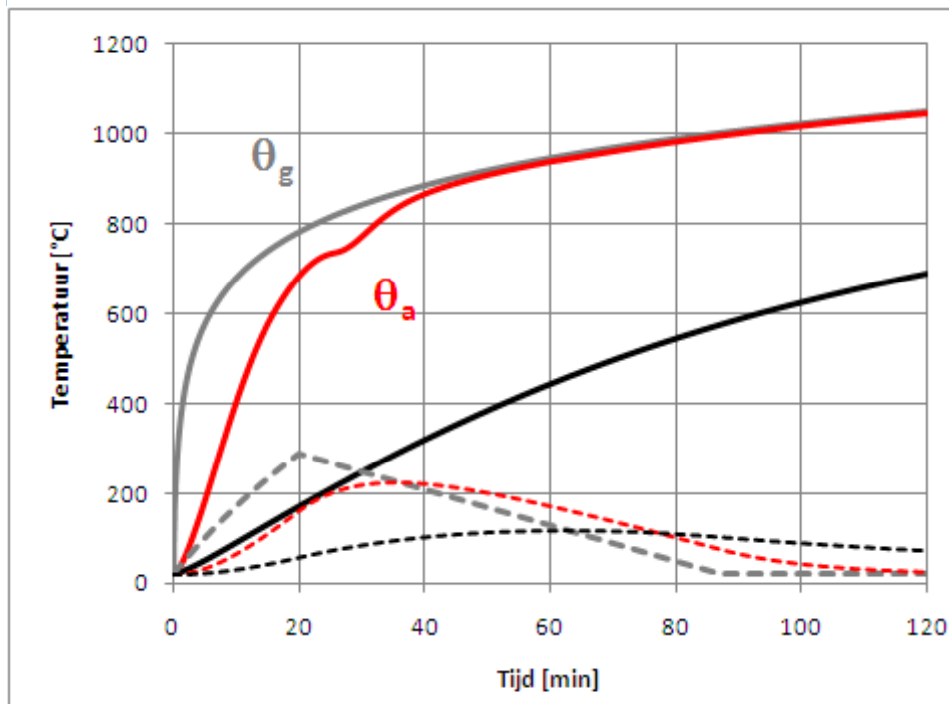
Weerstand - Nomogrammen



Klasse IV:

- Dunwandig → massiviteit beperkt t.o.v. warmgewalste profielen.

	HEB200	C360/2.0
A/V [1/m]	211	403



Weerstand - Nomogrammen



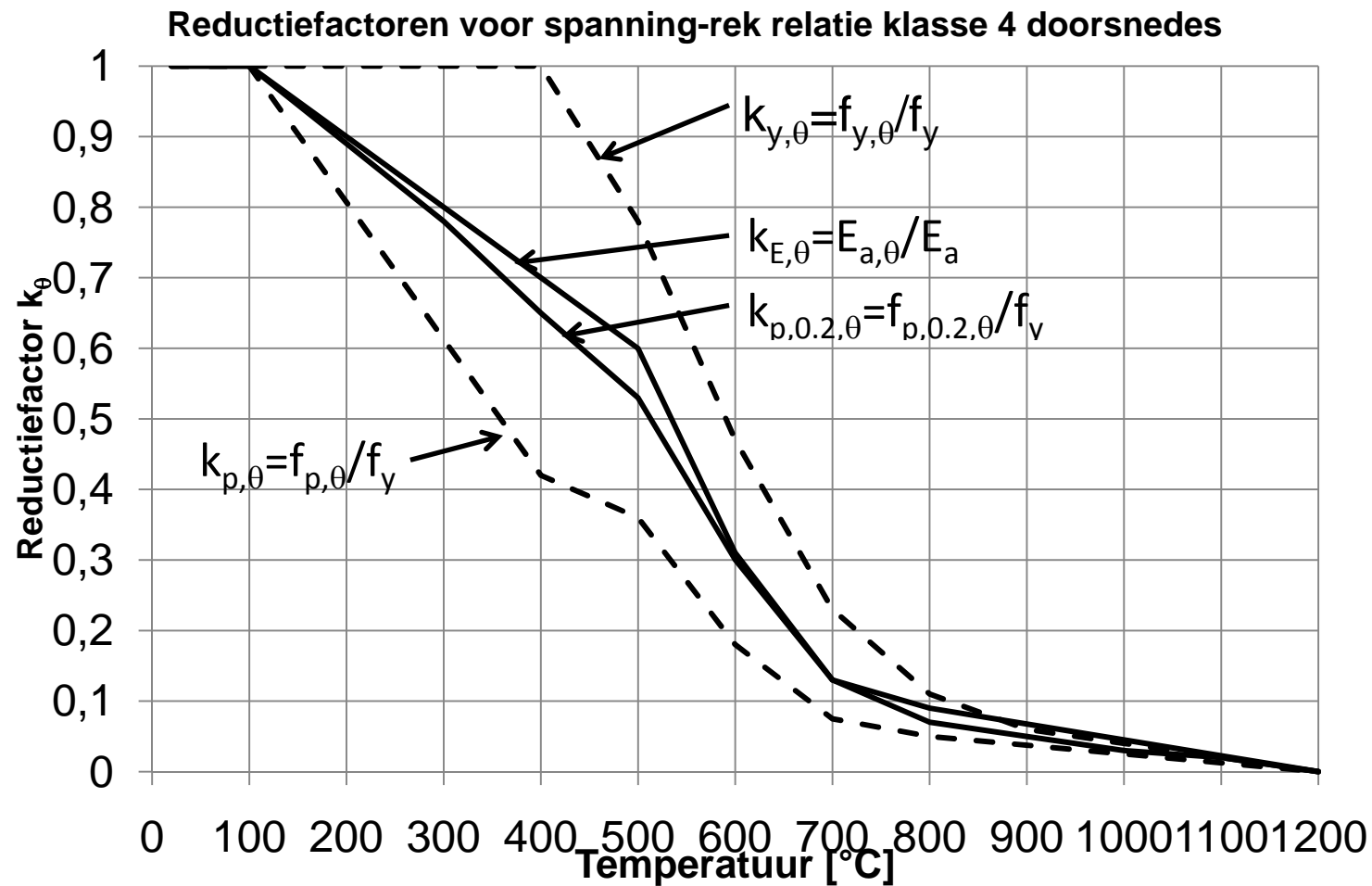
- Profielweerstand bepaalbaar;

θ_a [°]	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,t} = E_{a,t}/E_a$	$k_{p,0.2,\theta} = f_{p,0.2,\theta}/f_y$
20	1	1	1	1
100	1	1	1	1
200	1	0.807	0.9	0.89
300	1	0.613	0.8	0.78
400	1	0.42	0.7	0.65
500	0.78	0.36	0.6	0.53
600	0.47	0.18	0.31	0.3
700	0.23	0.075	0.13	0.13
800	0.11	0.05	0.09	0.07
900	0.06	0.0375	0.0675	0.05
1000	0.04	0.025	0.045	0.03
1100	0.02	0.0125	0.0225	0.02
1200	0	0	0	0

Weerstand - Nomogrammen



- Profielweerstand bepaalbaar;



Weerstand - Nomogrammen

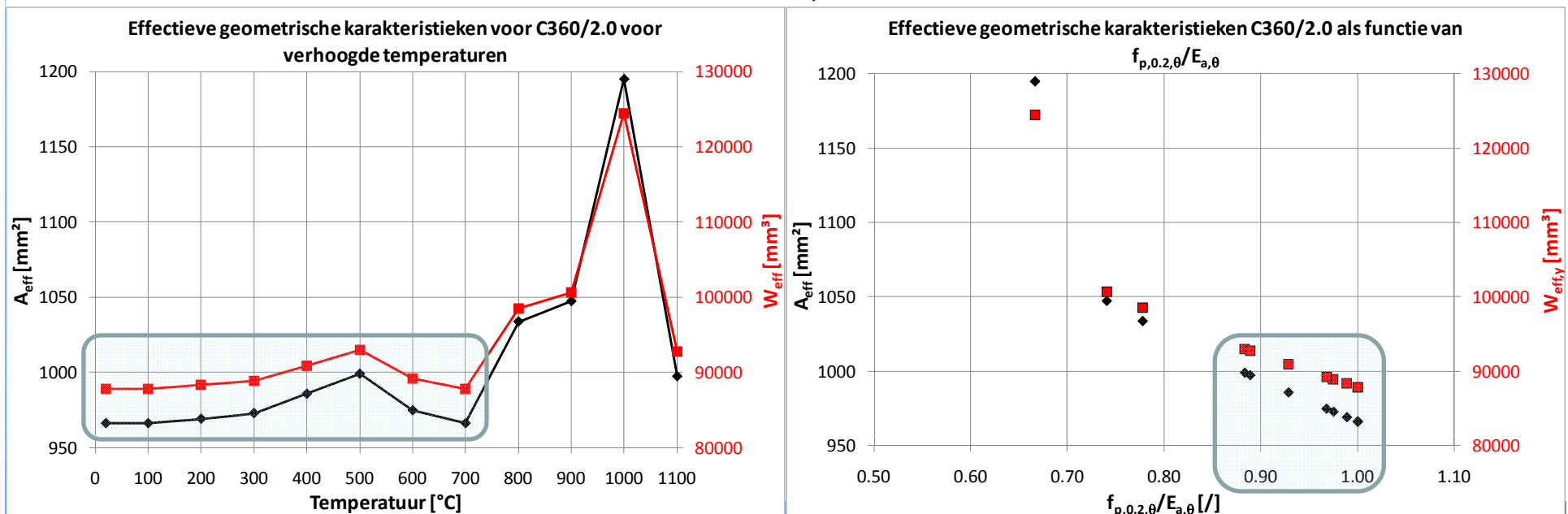


Klasse IV: impact op weerstand. Rekenen met:

- $A \rightarrow A_{\text{eff}}$;
- $W_{\text{pl},y}$ of $W_{\text{el},y} \rightarrow W_{\text{eff},y}$.

Opm.: de effectieve geometrische eigenschappen (A_{eff} , W_{eff}) mogen daarbij bepaald zijn op omgevingstemperatuur (20°C): **OK**.

! Voornamelijk bepaald door verhouding $f_{p,0.2}/E$.



Weerstand - Nomogrammen



Vergelijking van weerstand met **belastingeffect**.

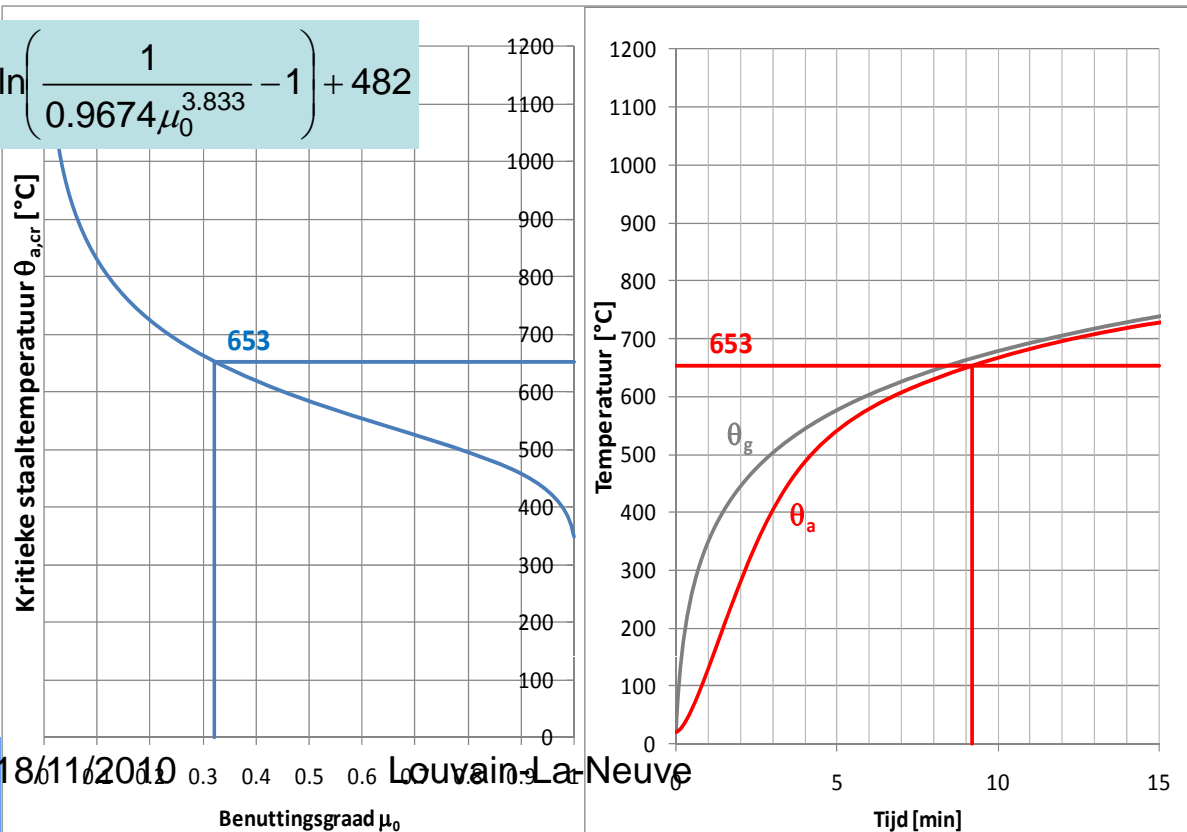
$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi,t}$$

Via belastingsgraad: $E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d$

En benuttingsgraad: $\mu_0 = \kappa_1 \kappa_2 \eta_{fi}$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_1 Q_{k,w}}{\gamma_g G_k + \gamma_q Q_{k,w}} = \frac{G_k + 0.2 Q_{k,w}}{1.35 G_k + 1.50 Q_{k,w}} = \frac{1 + 0.2 \frac{Q_{k,w}}{G_k}}{1.35 + 1.50 \frac{Q_{k,w}}{G_k}}$$

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left(\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482$$



Weerstand - Nomogrammen



Voorbeeld - Ontwerp van een gording:

- Doorlopende ligger over meerdere velden;
- Overspanning $L = 7$ m;
- Afdragende lengte: 2.5 m.

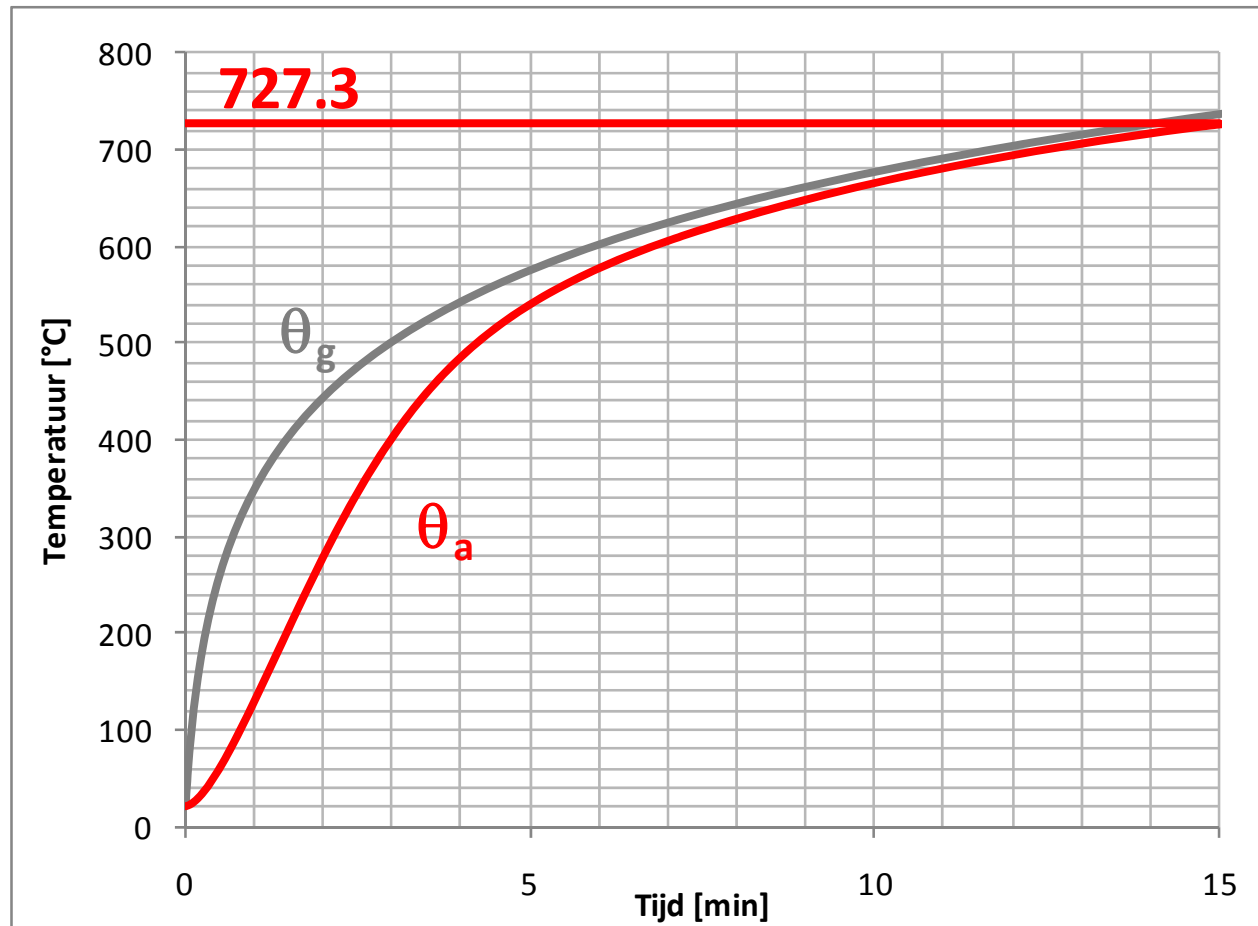
Het voorbeeld gaat uit van volgende belastingsgevallen:

- Eigen gewicht van het profiel: $g_k = 0.68$ kN/m;
- Permanente last (lichte dakbedekking) $g_k = 0.25 \text{ kN/m}^2 \times 2.5 \text{ m} = 0.63$ kN/m;
- Windlast: $q_w = 0.2 \text{ kN/m}^2 \times 2.5 \text{ m} = 0.5$ kN/m;
- Sneeuwlast: $q_s = 0.4 \text{ kN/m}^2 \times 2.5 \text{ m} = 1.0$ kN/m

Weerstand - Nomogrammen



Voorbeeld - Ontwerp van een gording: - gas- en staaltemperatuur ISO834



Weerstand - Nomogrammen



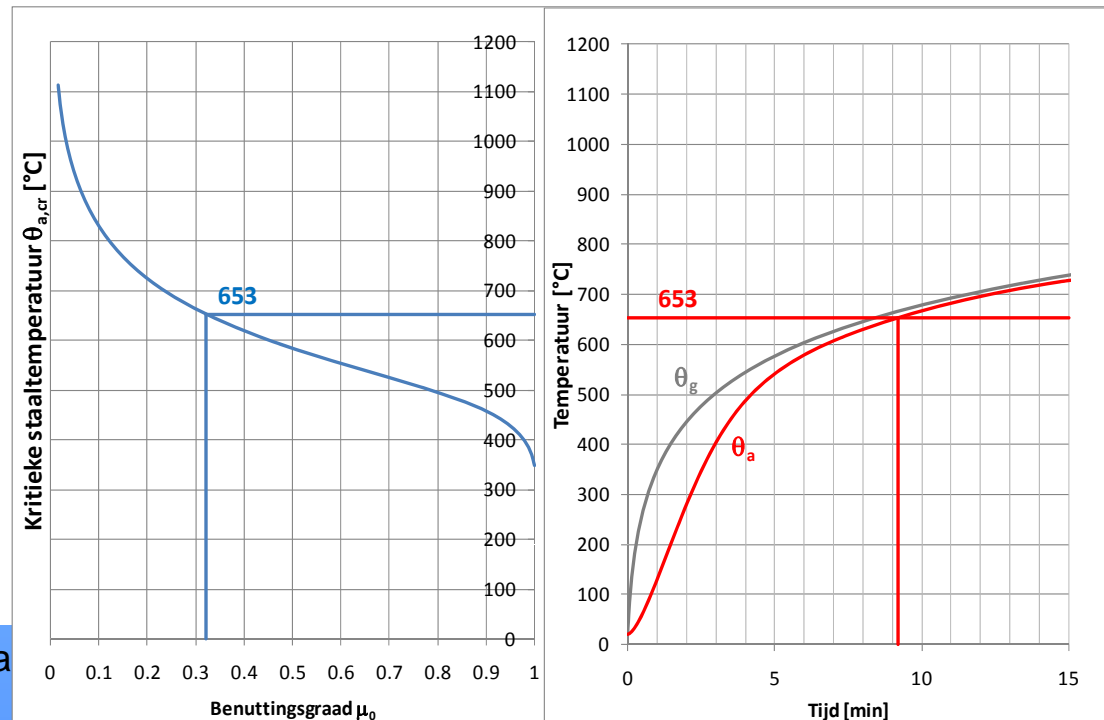
Voorbeeld - Ontwerp van een gording: - benuttingsgraad

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} = 1.0 \times (0.678 + 0.625) + 0.2 * 0.5 = 1.4 \text{ kN} / \text{m}$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_1 Q_{k,w}}{\gamma_g G_k + \gamma_q Q_{k,w}} = \frac{1.4}{3.71} = 0.378 \quad \theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left(\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 653^\circ\text{C}$$

$$\mu_0 = \kappa_1 \kappa_2 \eta_{fi} = 0.85 \times 1 \times 0.378 = 0.321$$

Kritieke temperatuur wordt bereikt na 9.2 minuten.



Weerstand – CTICM

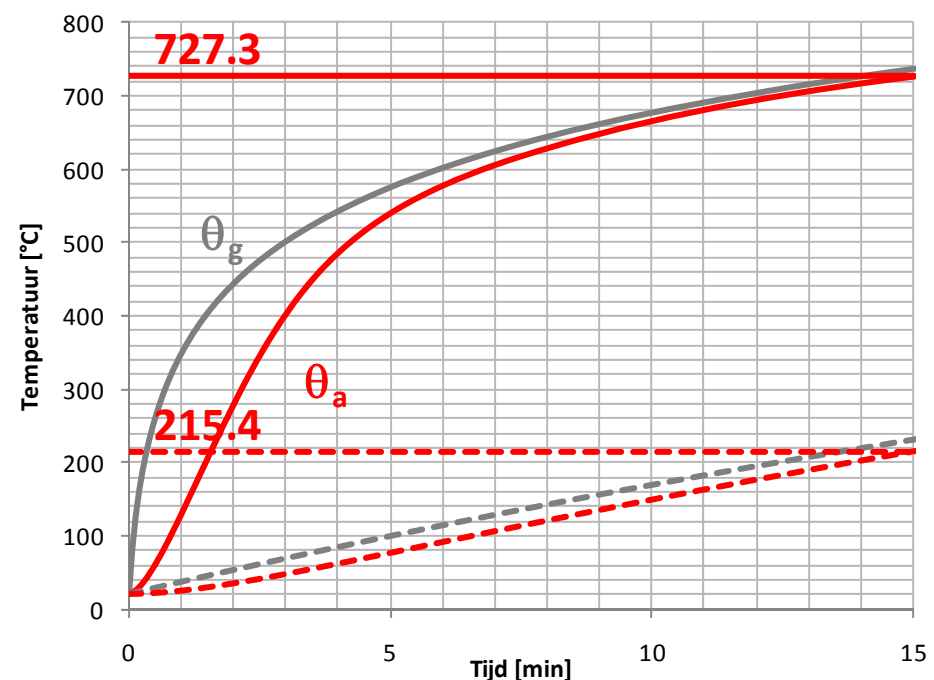


Methode A: maximaal draagvermogen na vooropgestelde $t = 15$ minuten.

$$q_{fi,Rd} = \frac{\alpha k_{p,0.2,\theta} f_y W_{eff,y}}{L^2} = \frac{12 \times 0.114 \times 280 \text{ MPa} \times 56836 \text{ mm}^3}{7 \text{ m}^2} = 0.443 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

θ_a [°]	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,t} = E_{a,t}/E_a$	$k_{p,0.2,\theta} = f_{p,0.2,\theta}/f_y$
727	0.197	0.068	0.119	0.114
700	0.23	0.075	0.13	0.13
800	0.11	0.05	0.09	0.07

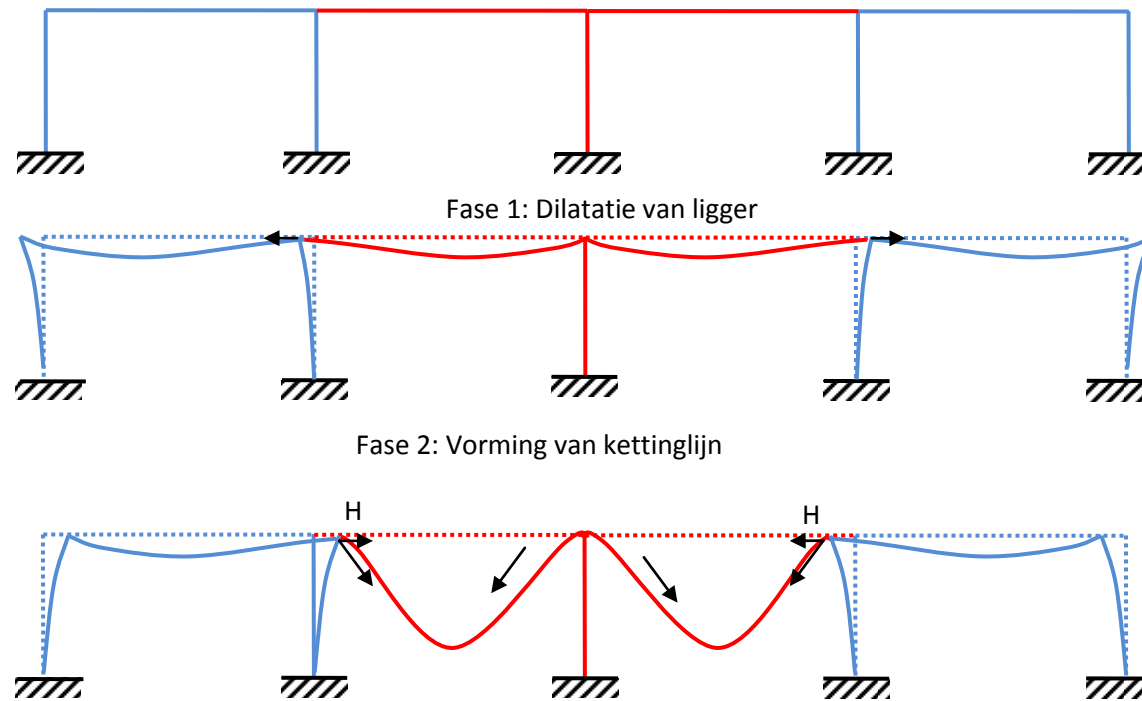
$$q_{fi,Ed} = 1.40 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \leq q_{fi,Rd} = 0.443 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Gedrag bij brand



Gedrag bij brand - algemeen:

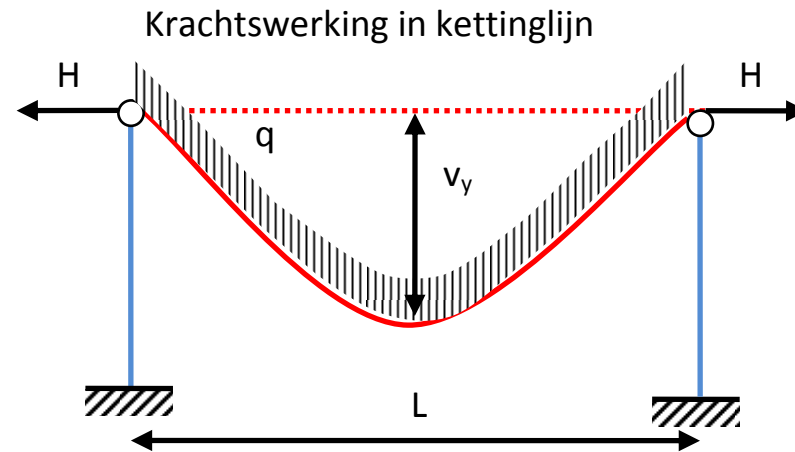


Gedrag bij brand - kettinglijn



Gedrag bij brand - algemeen:

$$H = \frac{qL^2}{8v_y}$$



Bepalen van de trekkracht: $H = mqL$

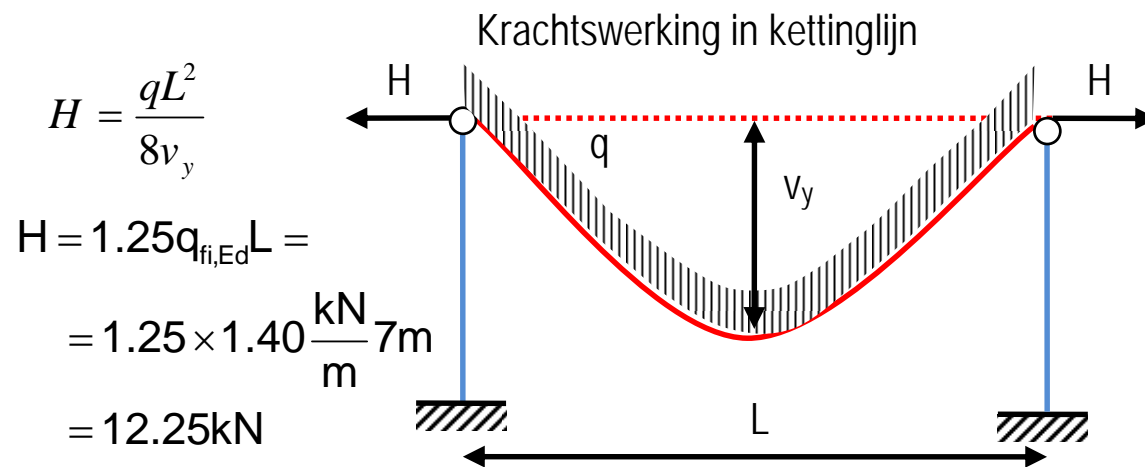
Weerstand – CTICM



Methode B: vorming van een kettinglijn draagvermogen na $t = 15$ minuten

$$q_{fi,Rd} = \frac{0.8 k_{p,0.2,\theta} f_y A}{L} \geq \frac{0.8 \times 0.114 \times 280 \text{ MPa} \times 880.27 \text{ mm}^2}{7 \text{ m}} = 3.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{fi,Ed} = 1.40 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \leq q_{fi,Rd} = 3.20 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

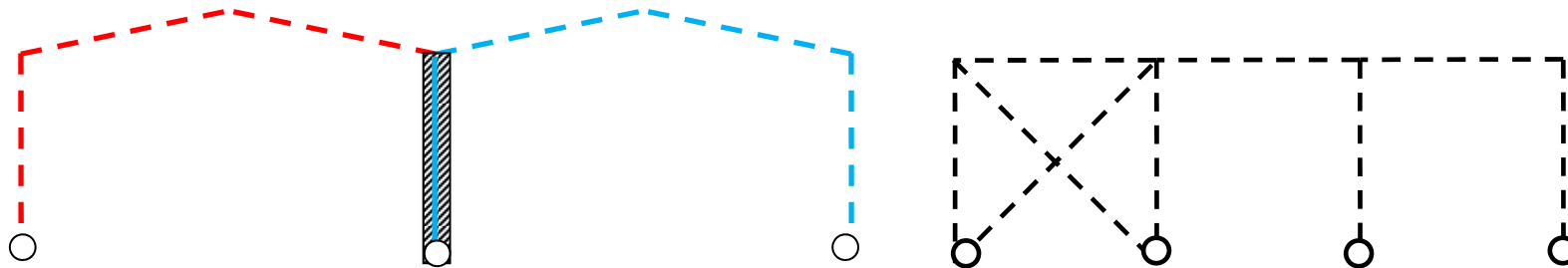


Gebruik van geavanceerde modellen



Gebruik van geavanceerde modellen \Rightarrow voorstellen van vereenvoudigde ontwerpformules:

- Type I/II – onderscheid;
- CFS – impact op brandweerstand;
- Voorbeeld typologie – dubbele beuk – 2 brandcompartimenten – stalen portiek:
- onderlinge vergelijking met warmgewalste profielen.



Voorbeeld Typologie



Typologie – opbouw (2 compartimenten)

Bepaling van:

- Trekkracht F
- Verplaatsing Δ
- Faalmode (bezwijken naar brandend compartiment toe ?)

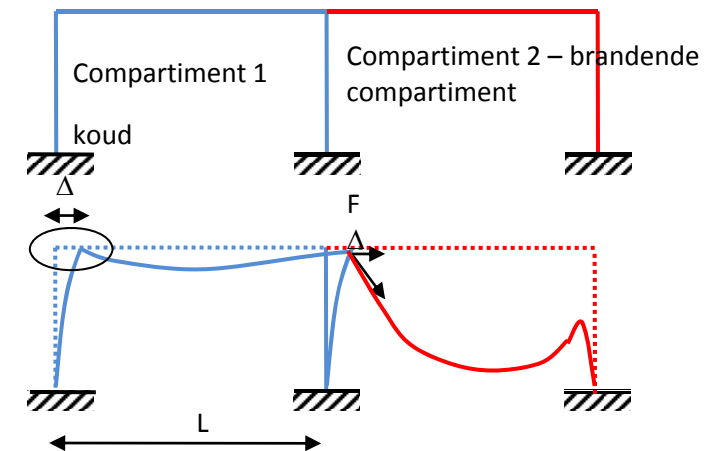
Via geavanceerde modellering (Safir)

Gevolgd door:

- Afleiden van vereenvoudigde ontwerpformules:

$$F = m q L$$

$$\Delta = n q L$$

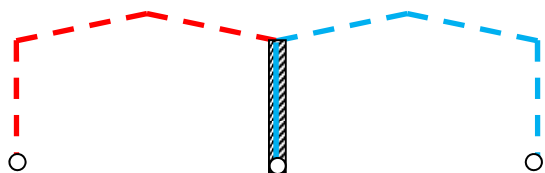
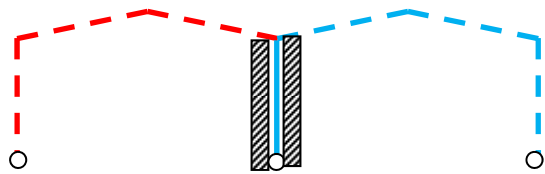
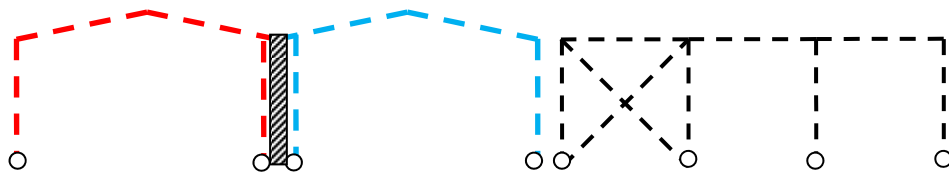


Typologie - opbouw



Typologie – opbouw (2 compartimenten):

- Liggers: warmgewalste I- en/of H-profielen → **CFS**;
- Hoogte/Lengte verhouding: $H/L < 0.4$ → **0.8**;
- Lichte dakbedekking (30kg/m^2);



Brandwand aan de brandzijde → middenkolom koud
Brandlast:

- 3-zijdige blootstelling aan brand (ISO-brand) van buitenkolom,
- 4-zijdige blootstelling van ligger.

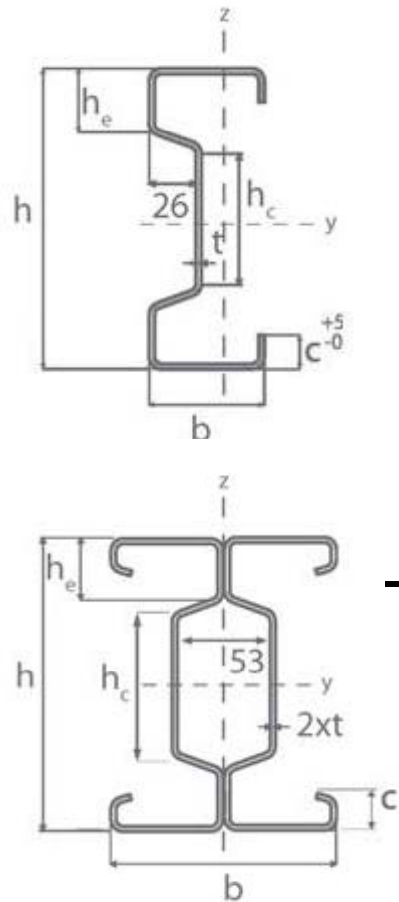
Randvoorwaarden:

- Verbinding met fundering: scharnierend
- Verbinding ligger-kolom: continu

Typologie - opbouw



Typologie – opbouw (2 compartimenten): Σ -profielen



Profiel	h [mm]	b [mm]	c [mm]	h_c [mm]	h_e [mm]	t [mm]
S250x70x4	250	70	25	120	50	4
S300x80x4	300	80	25	170	50	4
S300x80x5	300	80	30	170	50	5
S350x90x4	350	90	30	220	50	4
S350x90x5	350	90	30	220	50	5
S400x100x4	400	100	35	250	60	4
S450x110x4	450	110	35	280	70	4
S450x110x5	450	110	35	280	70	5
IS400x200x4	400	200	35	250	60	4
IS450x220x4	450	220	35	280	70	4
IS450x220x5	450	220	35	280	70	5

Typologie - analyse



Typologie – doorgerekende cases met geavanceerde modellen - Safir:

Case	Hoogte [m]	Lengte [m]	H/L	kolom	Ligger
102-01	4	8	0.50	S250x70x4	S300x80x4
102-02	4	10	0.40	S250x70x4	S350x90x4
102-03	4	12	0.33	S250x70x4	S400x100x4
102-04	4	15	0.27	S250x70x4	S450x110x5
102-05	4	20	0.20	S450x110x4	IS400x200x4
102-06	6	8	0.75	S400x100x4	S300x80x4
102-07	6	10	0.60	S400x100x4	S300x80x5
102-08	6	12	0.50	S400x100x4	S400x100x4
102-09	6	15	0.40	S400x100x4	S450x110x4
102-10	6	20	0.30	S450x110x4	IS450x220x4
102-11	8	10	0.80	IS450x220x4	S350x90x5
102-12	8	12	0.67	IS450x220x4	S400x100x4
102-13	8	15	0.53	IS450x220x4	S450x110x5
102-14	8	20	0.40	IS450x220x4	IS450x220x4
102-15	10	12.5	0.80	IS450x220x5	IS450x220x5
102-16	10	15	0.67	IS450x220x5	IS450x220x5
102-17	10	20	0.50	IS450x220x5	IS450x220x5

Typologie - resultaten



Typologie – Safir - resultaten:

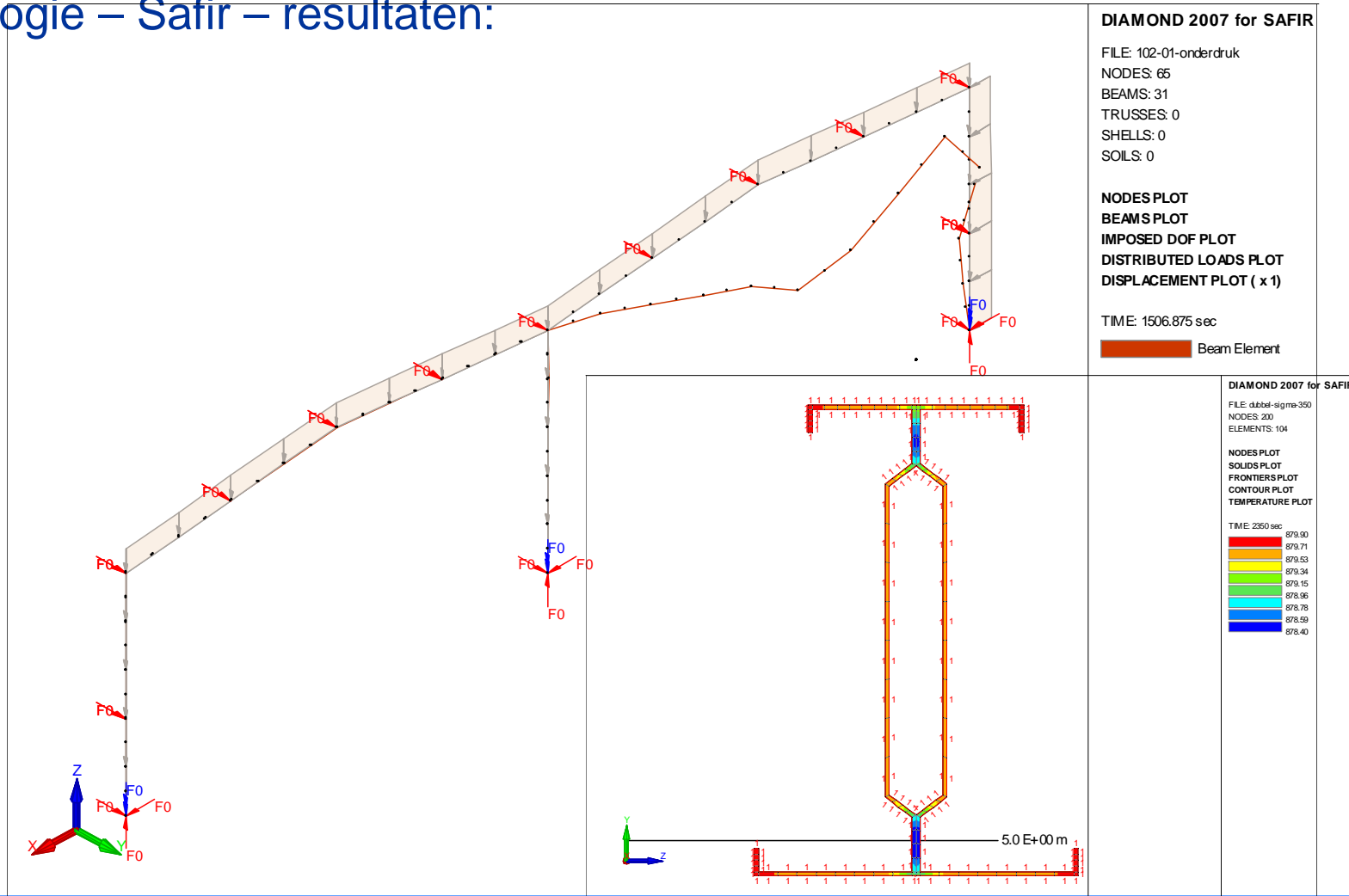
$$F = m q L \quad \Delta = n q L$$

Case	faalmode	Tijd [s]	Δ [m]	F [kN]	m [/]	n [/]
102-01	Inwendig-ligger	1508	0.101	5.17	0.536	0.0126
102-02	Inwendig-ligger	1178	0.126	9.08	0.738	0.0126
102-03	Inwendig-ligger	832	0.137	13.53	0.898	0.0114
102-04	Inwendig-ligger	784	0.178	16.25	0.813	0.0119
102-05	Inwendig-ligger	764	0.288	5.70	0.188	0.0144
102-06	Inwendig-ligger	1888	0.085	6.39	0.663	0.0106
102-07	Inwendig-ligger	1303	0.114	8.62	0.701	0.0114
102-08	Inwendig-ligger	1055	0.140	12.12	0.805	0.0117
102-09	Inwendig-ligger	737	0.156	10.03	0.502	0.0104
102-10	Inwendig-ligger	371	0.168	4.52	0.149	0.0084
102-11	Inwendig-ligger	2310	0.122	4.96	0.403	0.0122
102-12	Inwendig-ligger	1292	0.135	12.60	0.837	0.0113
102-13	Inwendig-ligger	1210	0.165	13.36	0.668	0.0110
102-14	Inwendig-ligger	1138	0.283	21.17	0.699	0.0142
102-15	Niet bezwijken op einde analyse					
102-16	Inwendig-ligger	2982	0.226	17/21	0.861	0.0150
102-17	Inwendig-ligger	1353	0.283	23.10	0.762	0.0142

Typologie - resultaten



Typologie – Safir – resultaten:



Typologie - samenvatting

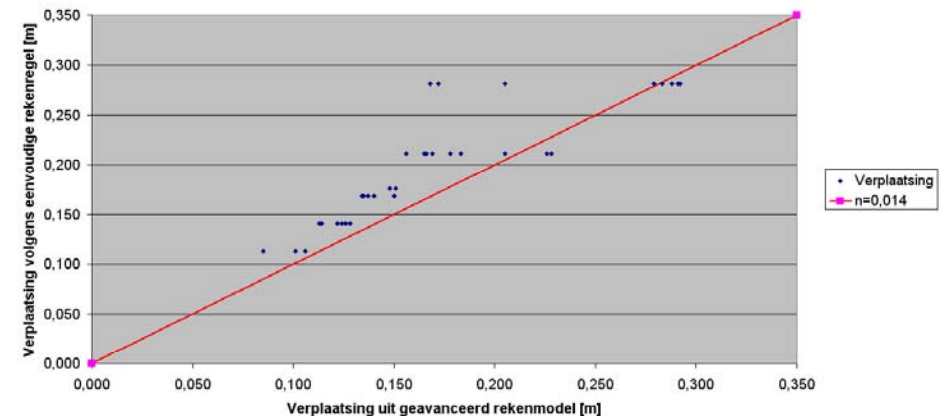
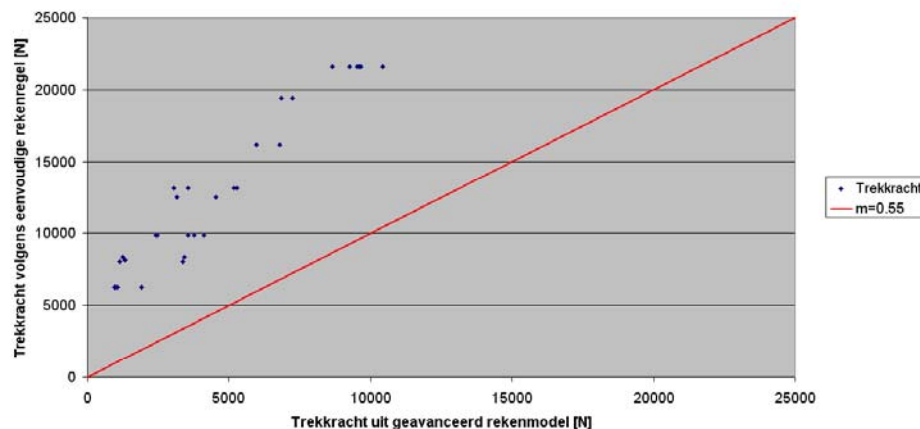


Typologie - conclusies:

	warmgewalst	CFS
$(F=mql) - m$	0.550	0.265
$(\Delta=nql) - n$	0.0140	0.0152

Formules voor warmgewalste profielen – vorm blijft van toepassing, eenvoudige aanpassing via nieuwe parameterwaarden mogelijk.

Faalgedrag/faalmodes gelijkaardig.



Brandbelasting – ISO834 ?



Mogelijkheden aan de zijde van de **brandbelasting**:

- ISO834 – standaardkromme;

Alternatieven:

- Parametrische brand;
- Natuurlijke brandkromme – bv.: Ozone;

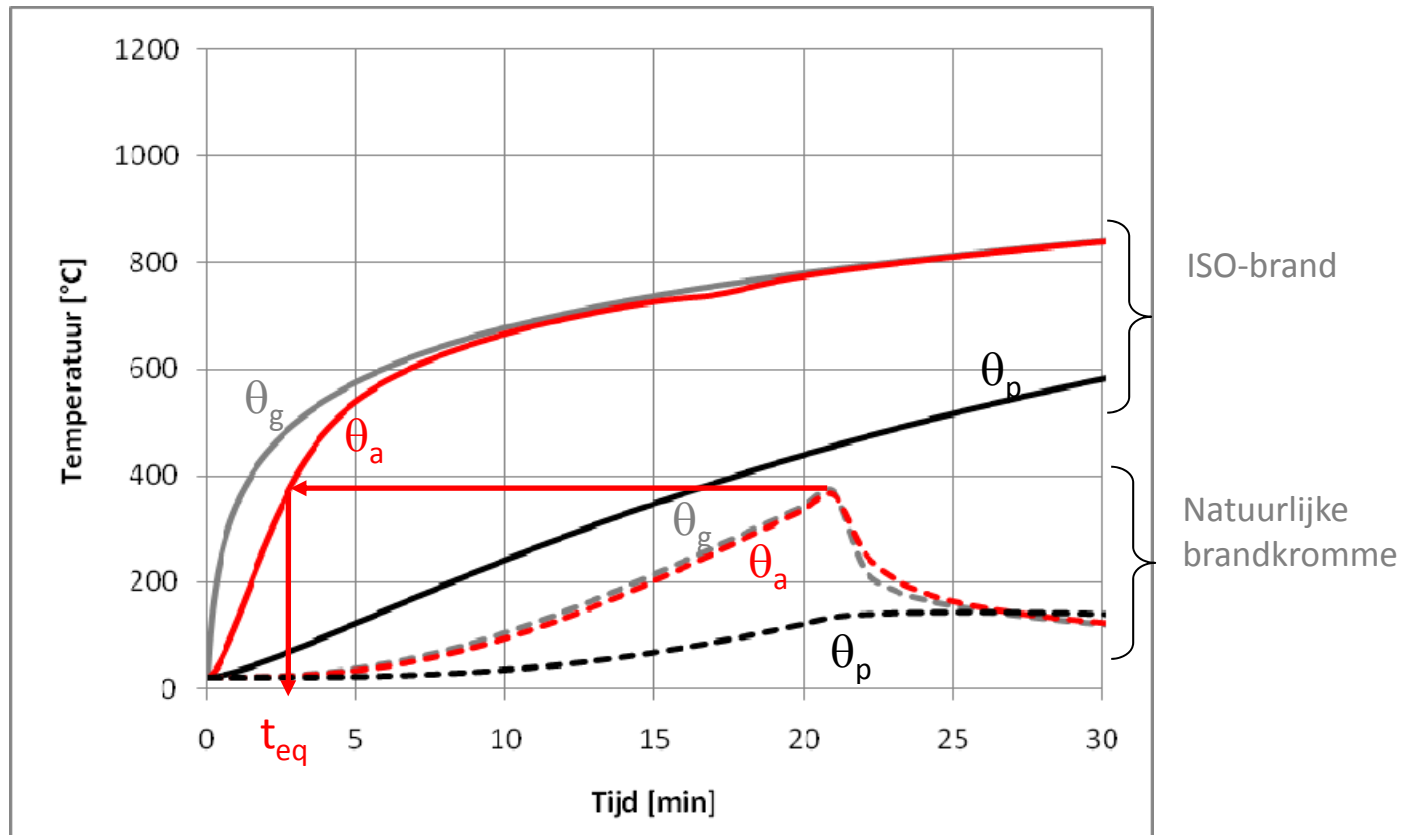
⇒ Toepassen algemene regel: Equivalente tijdsduur ($t_{e,d}$) – rekening houden met de “hevigheid” van de brand;

Minimaal vereiste brandweerstand voor structurele elementen		
Type I	R 60	Voor een gebouw of deel ervan van klasse A ($q_{fi,d} \leq 350 \text{ MJ/m}^2$)
	R 120	Voor een gebouw of deel ervan van klasse B of C ($q_{fi,d} > 350 \text{ MJ/m}^2$)
Type II	R $t_{e,d}$	Algemene regel
	“Geen R bepaald” (impliciet R 15) R 30 (of hoger)	Enkel voor type oplossingen in functie van de grootte van het compartiment
Opm.	R 30	Tussenvloeren en hun draagstructuur

Equivalente tijdsduur



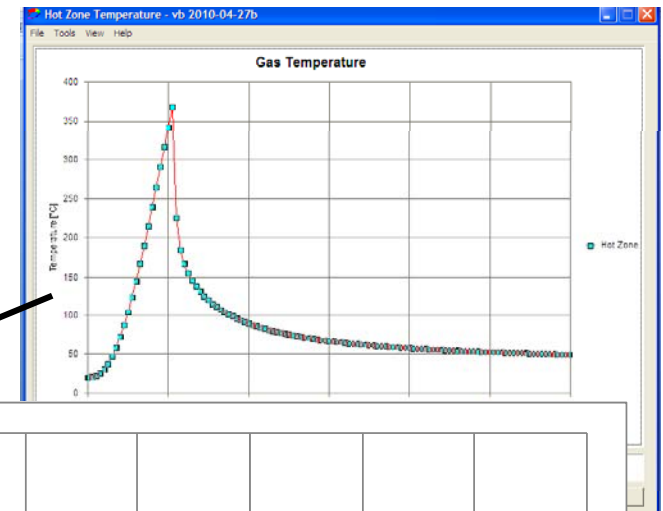
- Principe van de equivalente tijdsduur: $t_{e,d}$ En dus: $t_{fi,d} > t_{e,d}$



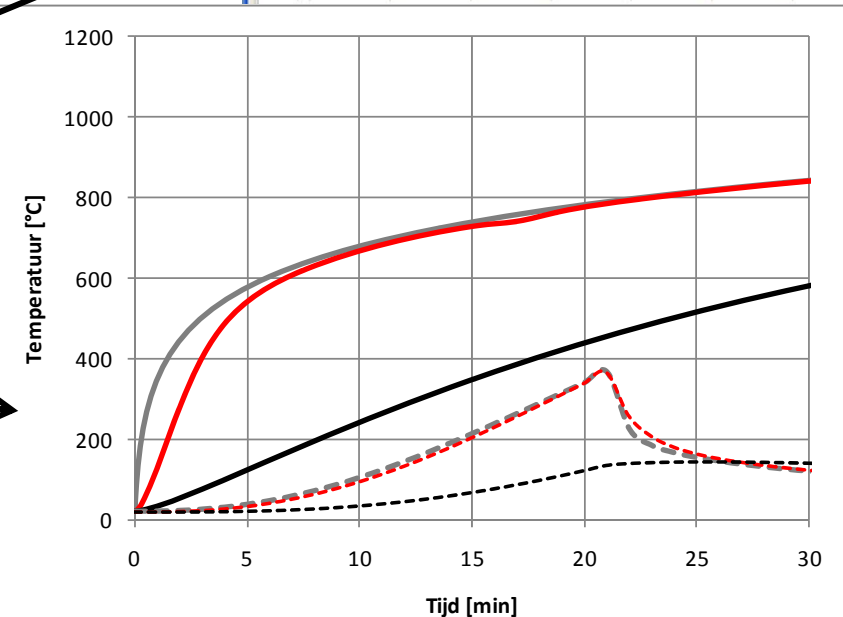
Equivalente tijdsduur



- Belangrijke opmerking: als ingevolge de oppervlakte- en/of de ventilatiefactor een equivalente tijdsduur ($t_{e,d}$) haalbaar is die kleiner is dan 15 minuten, dan mag deze toegepast worden.
- Rekenblad (Excel): www.TETRA-CFS.be



Temperatuursverloop - natuurlijke brandkromme - data afkomstig uit Ozone										
		Onbekleed profiel					Bekleed profiel			
		warmte overdrachtscoëff. [eq.2] [eq.3] [eq.4]					warmte overdrachtscoëff. [eq.5-6]			
Ozone data		tijd	brandkrortijd	staaltemp	staal	cap.	k_{staal}	$\Delta\theta_3$	cap.	$\Delta\theta_3$
start copy	t	θ_s	t	θ_s	c_s	k_{staal}	$\Delta\theta_3$	θ_s	c_s	$\Delta\theta_3$
in indicated	[min]	[°C]	[sec]	[°C]	[J/kgK]	[W/m ² K]	[K]	[°C]	[J/kgK]	[K]
cell	↓	15	214.138		202.8				68.3	
Hot Zone										
	0	20	0	20	438.9	39.00	0.17	20.00	438.9	0.015257
R2	1	20.27	60	20.17	439.1	39.03	0.97	20.02	439.0	0.097259
R3	2	21.762	120	21.14	439.7	39.12	2.33	20.11	439.0	0.269728
R4	3	24.957	180	23.46	441.2	39.26	4.03	20.38	439.2	0.539922
R5	4	30.081	240	27.50	443.8	39.52	5.95	20.92	439.6	0.908749
R6	5	37.251	300	33.45	447.6	39.87	7.98	21.83	440.2	1.373964
R7	6	46.531	360	41.43	452.5	40.34	10.08	23.20	441.1	1.930699
R8	7	57.939	420	51.51	458.4	40.95	12.20	25.14	442.3	2.571763
R9	8	71.45	480	63.71	465.2	41.72	14.30	27.71	444.0	3.287665



Validatie – verder onderzoek



Doelstelling – weergave constructief gedrag bij brand:

- Draagvermogen van een industriële hal - 2D-3D-modellering;
- Controle brandweerstand met geavanceerde modellering;
- Vergelijking met commerciële ontwerpsoftware (SCIA/Buildsoft);
- Validatie via een brandproef op ware grootte (op terrein NV Joris Ide).

Onderzoeksvragen:

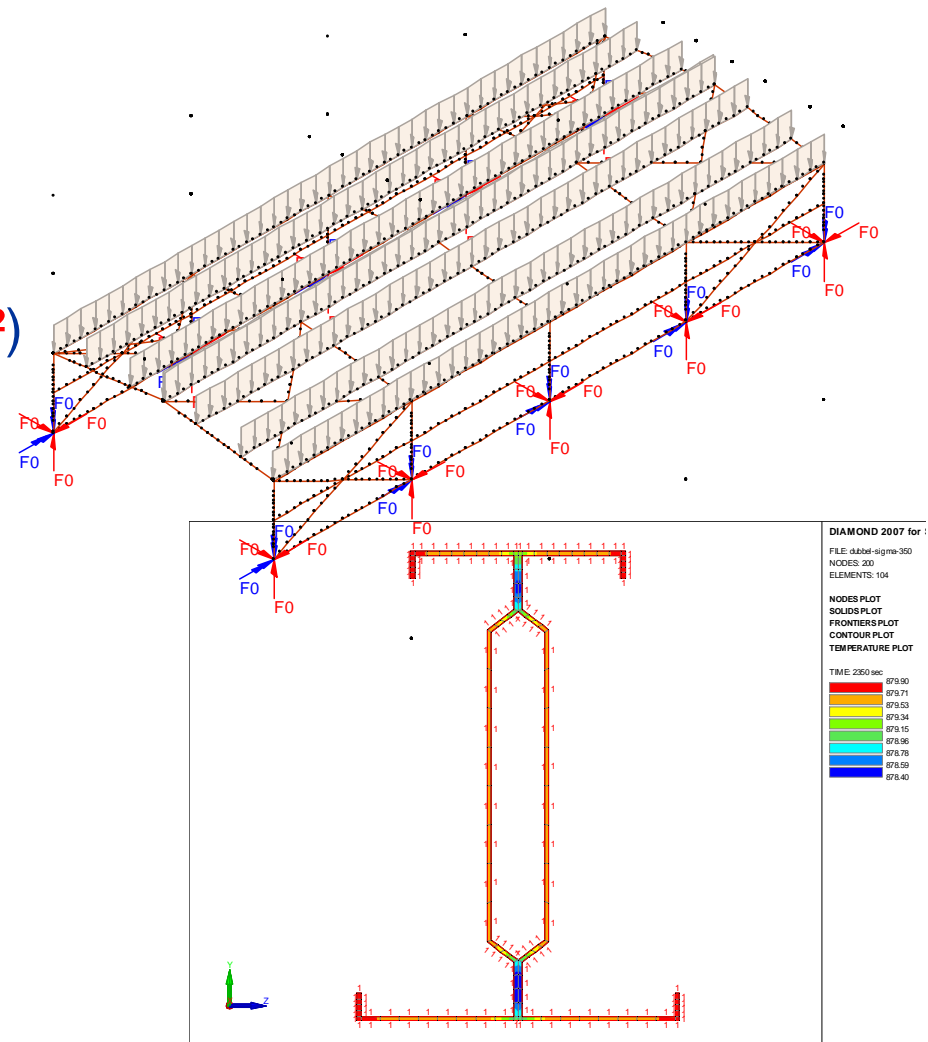
- 2D vorming kettinglijn–extrapoleerbaar naar 3D ? (is 3D opsplitsbaar in 2D)
- Effect van lokale instabiliteiten ?
- Brandgedrag getrouw modelleerbaar met geavanceerde modellen - Safir?
- Hoe toepasbaar is gebruik van commerciële software voor de bouw hierin ?

Validatie – verder onderzoek



Definiëren van:

- Geometrie van industriegebouw;
 - Overspanning: $L = 8 \text{ m}$
 - Afstand tussen portieken: 5 m
 - # portieken: $5 \rightarrow A = 128 \text{ m}^2$ (**<500m²**)
 - Hoogte tot goot: 2.5 m (**<4m**)
 - Hoogte tot nok: 3.0 m
 - Windverbanden:
 - 1 set vooraan
 - 1 set achteraan
 - Overspannen 1 wandvlak
 - Overspannen 1 dakvlak
- Opbouw:
 - Dubbele Sigma's: $\Sigma 170/2.0$



Validatie – verder onderzoek



Definiëren van de brandbelasting.

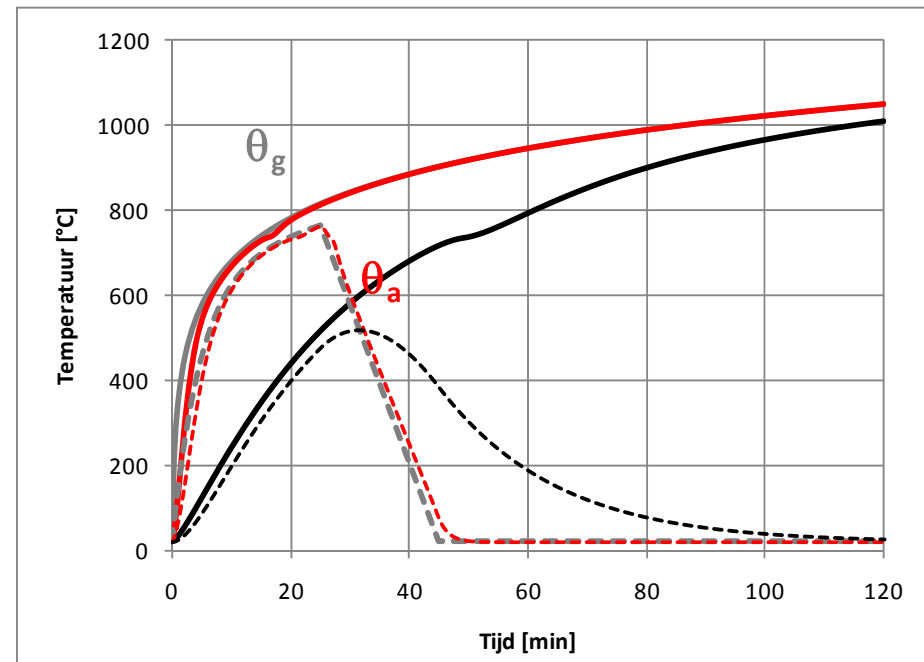
De industriegebouwen of delen daarvan kunnen in functie van de maatgevende brandbelasting $q_{fi,d}$ ingedeeld worden in de volgende klassen:

- Klasse A: $q_{fi,d} \leq 350 \text{ MJ/m}^2$;
- Klasse B: $350 < q_{fi,d} \leq 900 \text{ MJ/m}^2$;
- Klasse C: $900 \text{ MJ/m}^2 < q_{fi,d}$.

Voorstel: $q_{fi,d} = 500 \text{ MJ/m}^2 \rightarrow$
 $q_{fi,m} = 625 \text{ MJ/m}^2$



$700 \text{ MJ/m}^2 =$
 40 kg hout/m^2



Besluit



- CFS- klasse IV: verhoogde complexiteit bij berekenen \Rightarrow aanbieden gebruiksvriendelijke ontwerptools via www.TETRA-CFS.be;
- “Geen R bepaald” – impliciet R 15 voor slanke constructies
- Toepassing van bijlage 6 - FSE
 - Eenvoudige modellen aan **weerstandzijde**: (kettinglijn, voor standaard typologieën: eenvoudige ontwerpregels gevalideerd aan de hand van geavanceerde rekenmodellen);
 - Mogelijkheden aan de zijde van de **brandbelasting**: parametrische of natuurlijke brandkromme, gebruik van algemene regel $\Rightarrow t_{e,d}$;
- Validatie (verder onderzoek) – brandproof op reële schaal.

Minimaal vereiste brandweerstand voor structurele elementen		
Type I	R 60	Voor een gebouw of deel ervan van klasse A ($q_{fi,d} \leq 350 \text{ MJ/m}^2$)
	R 120	Voor een gebouw of deel ervan van klasse B of C ($q_{fi,d} > 350 \text{ MJ/m}^2$)
Type II	R $t_{e,d}$	Algemene regel
	“Geen R bepaald” (impliciet R 15) R 30 (of hoger)	Enkel voor type oplossingen in functie van de grootte van het compartiment
Opm.	R 30	Tussenvloeren en hun draagstructuur