

Nomogrammen

Grafische methode voor de bepaling van de brandwerendheid van staalconstructies volgens EN 1993-1-2: 2005



1 INLEIDING

De vereiste brandwerendheid van staalconstructies – variërend van 15 tot en met 120 minuten – wordt bepaald door de nationale regelgeving. Deze regelgeving houdt rekening met het aantal bouwlagen, het gebruik van het gebouw, het aanwezige brandbaar materiaal, het aantal aanwezige personen en het gunstige effect van eventuele actieve maatregelen zoals sprinklers en detectie.

De brandwerendheid van constructie-elementen wordt geëvalueerd door het uitvoeren van een standaard brandproef in een oven of door een berekening.

Dit infoblad beschrijft berekeningsmethoden voor staalconstructies in gebouwen, met of zonder brandwerende bescherming en is gebaseerd op de Europese norm EN 1993-1-2: 2005 met de Belgische Nationale Bijlage.

2 BEREKENINGGRONDSLAGEN

2.1 Basisprincipes

Het tijdstip waarop de staalconstructie bezwijkt, hangt af van:

- **De kritieke temperatuur θ_{cr} :** De eigenschappen van staal zijn afhankelijk van de temperatuur, zie figuur 1. De kritieke temperatuur is de temperatuur waarbij het staal bezwijkt. Deze hangt af van de benuttingsgraad μ_0 :

$$\mu_0 = E_{f_i,d} / R_{f_i,d,0}$$

$E_{f_i,d}$: Het effect van de rekenwaarden van de belastingen in geval van brand;

$R_{f_i,d,0}$: De rekenwaarde van de weerstand in geval van brand op het tijdstip $t = 0$. Voor liggers en trekstaven is $R_{f_i,d,0}$ gelijk aan de weerstand in koude toestand R_d omdat $\gamma_M = \gamma_{M,f_i} = 1,0$. Voor doorgaande kolommen over meerdere bouwlagen waarbij elke bouwlaag een apart brandcompartiment is, mag de kinklengte voor de brandberekening worden gereduceerd ten opzichte van het koude ontwerp tot $l_{fi} = \alpha \cdot L_{cr}$:

$\alpha = 0,5$ voor kolommen in een tussenverdieping;

$\alpha = 0,7$ voor kolommen op de bovenste verdieping.

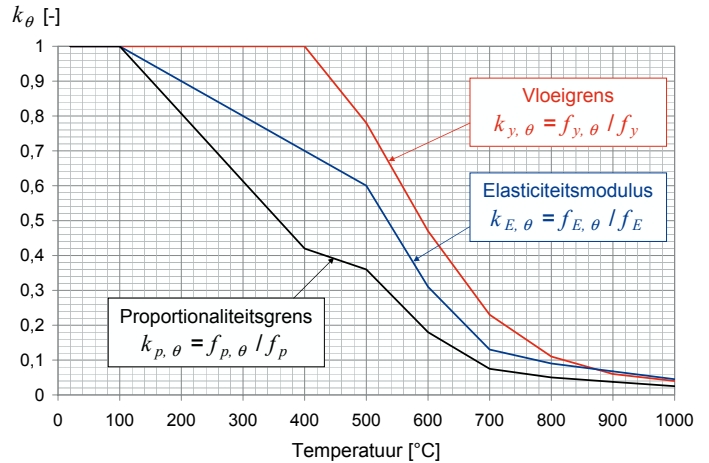
In alle andere gevallen blijft de kinklengte bij brand gelijk aan die van het koude ontwerp ($\alpha = 1$).

- **De opwarmingssnelheid:** Deze snelheid hangt af van drie factoren:
 - Het temperatuurverloop van de brand zelf;
 - De profielfactor P [m^{-1}]. Dit is de verhouding tussen het aan brand blootgestelde buitenoppervlak (A) en het staalvolume (V).
 - De bijdrage aan de brandwerendheid van het eventueel aanwezige beschermingsmateriaal. Dit wordt bepaald door de dikte d_p en de thermische eigenschappen:
 - warmtegeleidingcoëfficiënt λ_p [W/mK]
 - de soortelijke warmte c_p [J/kgK]
 - de dichtheid ρ_p [kg/m^3]
- De bijdrage aan de brandwerendheid moet worden bepaald volgens ENV 13381-4 of ENV 13381-8 of de nationale norm.

2.2 Toepassingsgebied

De rekenprocedure is geldig binnen het volgende toepassingsgebied:

- **Statisch schema:**
 - Trekstaven belast op trek;
 - Statisch bepaalde en statisch onbepaalde liggers belast op buiging;
 - Kolommen uitsluitend belast op centrische normaalkracht;
 - Elementen die gevoelig zijn voor kinstabiliteit of die worden belast op een combinatie van normaalkracht, dwarskracht en/of moment vallen buiten het bestek van deze methode. Kip treedt niet op als de gedrukte flens van de ligger zijdelings is gesteund door bijvoorbeeld de vloer.
- **Staalkwaliteiten:** Alle kwaliteiten volgens EN 10025.
- **Staaldoorsneden:** Klasse 1, 2 of 3. Voor doorsneden van klasse 4 is de kritieke temperatuur standaard 350 °C. De profielfactor moet groter zijn dan 10 m^{-1} . De doorsnede-classificatie volgt uit tabel 1.



Figuur 1: Reductiefactoren voor de mechanische eigenschappen van staal in functie van de temperatuur.

Tabel 1: Classificatie van de doorsnede belast op druk.

Interne plaatdelen					
Doorsnedeklasse	Belast op buiging	Belast op druk			
1	$c / t \leq 72 \cdot \epsilon$	$c / t \leq 33 \cdot \epsilon$			
2	$c / t \leq 83 \cdot \epsilon$	$c / t \leq 38 \cdot \epsilon$			
3	$c / t \leq 124 \cdot \epsilon$	$c / t \leq 42 \cdot \epsilon$			
Uitstekende plaatdelen					
Doorsnedeklasse	Belast op druk				
1	$c / t \leq 9 \cdot \epsilon$				
2	$c / t \leq 10 \cdot \epsilon$				
3	$c / t \leq 14 \cdot \epsilon$				
Overige profielen					
Hoekprofielen		Buizen			
Doorsnedeklasse	Belast op druk	Belast op druk en/of op buiging			
1	-	$d / t \leq 50 \cdot \epsilon^2$			
2	-	$d / t \leq 70 \cdot \epsilon^2$			
3	$h / t \leq 15 \cdot \epsilon$	$d / t \leq 90 \cdot \epsilon^2$ Voor $d / t \geq 90 \cdot \epsilon^2$ zie EN 1993-1-6			
Waarden van ϵ bij brand					
f_y	S235	S275	S355	S420	S460
ϵ	0,85	0,79	0,69	0,64	0,61
ϵ^2	0,72	0,62	0,48	0,40	0,37

2.3 Uitgangspunten

- Het temperatuurverloop van de brand volgt de standaardbrandkromme [ISO 834].
- De mechanische belasting wordt constant verondersteld voor de gehele duur van de brand. De effecten van thermische uitzetting op de krachtsverdeling worden verwaarloosd.
- De temperatuurverdeling in de staalconstructie is uniform. Een niet-uniforme temperatuurverdeling wordt in rekening gebracht door de correctiefactor $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$. κ is gelijk aan 0,6, 0,7, 0,85 of 1,0 met:
 - κ_1 : Om het effect van een niet-uniforme temperatuur over de doorsnede van een ligger in rekening te brengen:
 - $\kappa_1 = 0,70$ voor onbeschermd liggers aan drie zijden verhit
 - $\kappa_1 = 0,85$ voor beschermde liggers aan drie zijden verhit
 - $\kappa_1 = 1,00$ voor liggers verhit aan vier zijden
 - κ_2 : Om het effect van een niet-uniforme temperatuur over de lengte van een ligger in rekening te brengen:
 - $\kappa_2 = 0,85$ bij de oplegging van statisch onbepaalde liggers
 - $\kappa_2 = 1,00$ voor alle overige gevallen

3 BELASTINGEN BIJ BRAND

Volgens Eurocode 1 met de Nationale Bijlage moet bij brand de verticale veranderlijke belasting $Q_{k,i}$ worden gereduceerd van de extreme waarde van het ontwerp in koude toestand tot de quasi-blijvende waarde met de reductiefactor $\psi_{2,i}$. Bovendien moeten de veiligheidsfactoren voor de permanente en veranderlijke belastingen worden gelijkgesteld aan 1.

$$E_{f_i,d} = \sum_j G_{k,j} + \sum_i \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

De veranderlijke belastingen $Q_{k,i}$ en $\psi_{2,i}$ voor het quasi-blijvende deel hiervan zijn weergegeven in tabel 2 in functie van de gebruikscategorie. Afhankelijk van de verhouding tussen $Q_{k,i}$ en de permanente belastingen $G_{k,j}$ en het aantal verdiepingen n dat een kolom draagt, zal totale belasting bij brand kleiner zijn dan in het koude ontwerp, zie tabel 2. De reductiefactor voor de belastingen kan gebruikt worden als een veilige waarde van de benuttingsgraad, mits het ontwerp in koude toestand voldoet. In tabel 2 is aangenomen dat voor het ontwerp in koude toestand van liggers die grote oppervlakten dragen geen reductie van de veranderlijke belasting is toegepast.

Tabel 2: Verticale belastingen en de bijbehorende reductiefactoren bij brand in functie van de verhouding tussen Q_k en G_k .

Gebouwfunctie	Q_k kN/m ²	Q_k/G_k $\psi_{2,i}$	liggers			kolommen ($n > 2$)		
			0,5	1	2	0,5	1	2
A: Woningen	2,0	0,3	0,55	0,46	0,37	0,61	0,53	0,45
B: Kantoren	3,0	0,3	0,55	0,46	0,37	0,61	0,53	0,45
C: Bijeenkomst ruimten	5,0	0,6	0,62	0,56	0,51	0,69	0,65	0,62
D: Winkelruimtes	5,0	0,6	0,62	0,56	0,51	0,69	0,65	0,62
E: Opslagruimten	7,5	0,8	0,67	0,63	0,60	0,67	0,63	0,60
F: Parking: auto's < 3 ton	2,5	0,6	0,62	0,56	0,51	0,69	0,65	0,62
G: Parking: auto's 3-16 ton	5,0	0,3	0,55	0,46	0,37	0,61	0,53	0,45
H: Daken ¹⁾		0,0	0,48	0,35	0,23	0,57	0,46	0,33

¹⁾ Sneeuwbelasting [EN 1991-1-3] en belasting door onderhoudswerk.

4 REKENPROCEDURE

4.1 Berekening van de kritieke temperatuur

De eenvoudige methode is toepasbaar op liggers en trekstaven. Voor kolommen is de methode ook toepasbaar maar de uitkomsten zijn conservatief. Een economischer ontwerp wordt bereikt met de geavanceerde methode van 4.1.2.

4.1.1 Eenvoudige methode

Step 1a: Bepaal de benuttingsgraad bij brand

$$\mu_0 = E_{f_i,d} / R_{f_i,d,0}$$

Als veilige waarde mag volgens de Eurocode worden uitgegaan van $\mu_0 = 0,70$ voor vloeren van categorie E van EN 1990 (opslagruimten) en van $\mu_0 = 0,65$ voor alle andere situaties. Voor op druk belaste elementen kan men als benadering de benuttingsgraad berekenen op basis van de weerstand van het ontwerp in koude toestand: R_d .

$$\mu_0 = E_{f_i,d} / R_d$$

Step 2a: Bepaal voor liggers de correctiefactor κ in functie van de uniformiteit van de temperatuurverdeling. Bepaal voor kolommen de kniklengtereductie α bij brand ten opzichte van die bij kamertemperatuur in functie van verdieping die wordt beschouwd en de verbindingen tussen de kolommen over de verdiepingen heen.

Step 3a: Bepaal grafisch de kritieke temperatuur uit figuur 2.

4.1.2 Geavanceerde methode voor gedrukte staven

Step 1b: Een nauwkeurigere berekening wordt verkregen door de toelaatbare reductiefactor van de plastische normaalkracht te berekenen als:

$$\mu_{pl} = E_{f_i,d} / (A_a \cdot f_y)$$

Met A_a het oppervlak van de staaldoorsnede en f_y de vloeigrens bij kamertemperatuur.

Step 2b: Bereken de slankheid op tijdstip $t = 0$, dus rekening houdend met de kniklengtereductie als

$$\bar{\lambda}_{\theta,0} = \alpha \cdot \bar{\lambda} = \alpha \cdot \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{93,9 \cdot \varepsilon} \quad \text{met } \varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

Step 3b: Lees met deze μ_{pl} en $\lambda_{\theta,0}$ de kritieke temperatuur af uit tabel 4.

4.2 Berekening van de optredende temperatuur

Step 4: Bepaal de profielfactor. De profielfactor P wordt gegeven door

$$P = A/V$$

Met A het aan brand blootgestelde buitenoppervlak en V het staalvolume. Voor A mag voor onbeschermd staal en voor met rechthoekig bekleed staal uitgegaan worden van de kleinste contour om het profiel, zie tabel 3. Voor profielvolgend beschermde profielen moet voor A van de profielvolgende contour worden uitgegaan. De profielfactoren staan vermeld in tabel 6 voor zowel driezijdige als vierzijdige verhitting.

Step 5: Corrigeer de profielfactor. Voor onbeschermd I-profielen moeten de waarden uit tabel 6 met een factor 0,9 worden vermenigvuldigd.

Voor beschermde profielen wordt de opwarming berekend met een gemodificeerde profielfactor, gelijk aan:

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} \quad \text{met } \phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V}$$

Hierin representeert ϕ de relatieve thermische traagheid van de isolatie, ρ_a de dichtheid van staal gelijk aan 7850 kg/m³ en c_a de soortelijke warmte van staal. Voor de berekening kan c_a benaderd worden met een constante waarde van 600 J/kgK. Als veilige benadering kan $\phi = 0$.

Step 6: Bepaal uit figuur 2 grafisch de tijd tot de kritieke temperatuur in functie van de gecorrigeerde profielfactor. Dit is de brandwerendheid.

Tabel 3: Profielfactoren in functie van het profieltype en de verhitingswijze.

Onbekleed vierzijdig verhit I-profiel	Vierzijdig verhit I-profiel met holle bekleding	Vierzijdig verhit I-profiel met profielvolgende bekleding
$P = 0,9 \cdot A/V = 0,9 \cdot (2 \cdot b + 2 \cdot h) / V$	$P = A/V = (2 \cdot b + 2 \cdot h) / V$	$P = A/V$
Onbekleed driezijdig verhit I-profiel	Driezijdig verhit I-profiel met holle bekleding	Driezijdig verhit I-profiel met profielvolgende bekleding
$P = 0,9 \cdot A/V = 0,9 \cdot (b + 2 \cdot h) / V$	$P = A/V = (b + 2 \cdot h) / V$	$P = (A-b) / V$
Onbekleed hoekprofiel	Onbekleed buisprofiel	Onbekleed massieve doorsnede
$P = A/V \approx 2 \cdot t$	$P = A/V \approx 1 \cdot t$	$P = A/V = 4 \cdot d$

Tabel 4: Kritieke temperaturen voor gedrukte staven.

$\lambda_{\theta,0}$	μ_{pl}	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0,2		918	796	745	697	673	649	625	601	582	564	546	528	509
0,4		892	777	714	678	650	622	595	574	553	532	512	485	452
0,6		867	747	685	651	617	588	564	539	515	483	441	391	164
0,8		829	699	657	615	581	552	522	486	430	320	117		
1		784	674	621	578	542	506	437	316	124				
1,2		738	645	585	541	492	385	197						
1,4		694	611	552	495	346	127							
1,6		674	582	516	364	116								
1,8		652	554	436	169									
2		628	524	294										
S235														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0,2		921	797	747	698	675	651	627	603	584	566	548	530	512
0,4		894	780	718	680	653	625	598	578	557	536	516	493	460
0,6		871	752	688	655	622	592	568	544	520	494	453	411	246
0,8		835	703	660	619	585	557	528	499	444	367	186		
1		788	677	625	582	547	512	452	353	177				
1,2		743	648	589	545	502	407	234						
1,4		695	614	556	503	370	162							
1,6		676	585	520	384	147								
1,8		654	557	447	195									
2		630	527	312										
S275														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0,2		924	798	749	700	677	653	630	606	587	569	551	533	515
0,4		897	783	724	684	657	630	603	582	562	542	522	502	472
0,6		878	758	692	660	628	598	575	552	529	506	470	431	356
0,8		845	713	666	627	591	564	537	509	466	413	278		
1		795	681	632	588	555	521	474	403	250				
1,2		752	653	594	552	511	430	288	101					
1,4		698	620	562	511	403	213							
1,6		679	589	526	409	191								
1,8		658	562	465	230									
2		634	532	337										
S355														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0,2		926	799	750	702	678	654	631	608	588	571	553	535	517
0,4		899	786	727	686	660	633	607	585	566	546	526	506	479
0,6		881	762	694	663	632	602	579	556	534	511	481	442	404
0,8		851	719	669	631	595	569	542	515	479	428	329	144	
1		800	683	636	592	559	527	488	419	292	117			
1,2		757	656	597	556	516	444	318	143					
1,4		700	623	565	515	416	241	292	111					
1,6		681	591	530	422	216	217							
1,8		660	564	475	250	194								
2		636	535	351	395	171								
S420														
0		950	820	767	725	692	671	650	629	608	590	574	558	542
0,2		927	799	751	703	678	655	632	609	589	571	554	536	518
0,4		900	787	729	687	661	635	609	587	567	548	528	509	483
0,6		883	764	695	665	635	604	581	559	536	514	486	448	411
0,8		853	722	670	633	597	571	545	519	485	435	354	181	
1		803	685	638	594	562	530	495	426	312	145			
1,2		759	657	598	558	519	451	332	164					
1,4		702	625	567	518	423	255							
1,6		682	592	532	428	228								
1,8		661	566	481	260									
2		637	536	358	241									
S460														

6 SYMBOLENLIJST

α	Reductiefactor voor de kniklengte van kolommen bij brand	[-]
ε	Dimensieloze grootheid voor lokale en globale instabiliteit	[-]
ϕ	Relatieve thermische traagheid van de isolatie	[-]
γ_M	Partiële factor voor het materiaal in koude toestand = 1	[-]
$\gamma_{M,fi}$	Partiële factor voor het materiaal bij brand = 1	[-]
κ	Product van de correctiefactoren voor temperatuurgradiënten	[-]
κ_j	Correctiefactor voor temperatuurgradiënt over de doorsnede	[-]
κ_L	Correctiefactor voor temperatuurgradiënt over de lengte	[-]
$\bar{\lambda}$	Relatieve slankheid in koude toestand	[-]
$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	Relatieve slankheid bij brand op tijdstip $t = 0$	[-]
λ_p	Warmte geleidingscoëfficiënt van het isolatiemateriaal	[W/mK]
μ_0	Benuttingsgraad	[-]
μ_{pl}	Plastische benuttingsgraad	[-]
ρ_a	Dichtheid van staal = 7850	[kg/m ³]
ρ_p	Dichtheid van het isolatiemateriaal	[kg/m ³]
θ_{cr}	Kritieke temperatuur	[°C]
$\psi_{2,i}$	Reductiefactor voor de quasi-permanente belasting i	[-]
A	Aan brand blootgesteld oppervlak van het staalprofiel	[m ²]
A_a	Doorsnede van het staalprofiel	[m ²]
$E_{fi,d}$	Effect van de rekenwaarden van de belastingen bij brand	
$G_{k,i}$	Karakteristieke waarde voor de permanente belastingen i	
L_{cr}	Kniklengte in koude toestand	[m]
$M_{Ed,fi}$	Rekenwaarde van het buigend moment bij brand	[kNm]
$M_{Rd,fi}$	Rekenwaarde van het weerstandbiedend moment bij brand	[kNm]
P	Profielfactor	[m ⁻¹]
P_{mod}	Gemodificeerd profielfactor voor beschermde profielen	[W/m ³ K]
$Q_{k,i}$	Karakteristieke waarde voor de veranderlijke belastingen i	
R_d	Rekenwaarden van de weerstand in koude toestand	
$R_{fi,d,0}$	Rekenwaarden van de weerstand bij brand op tijdstip $t = 0$	
V	Volume van het staalprofiel	[m ³]
b	Breedte van een profiel	[m]
c	Lengte van het plaatdeel voor de doorsnede classificatie	[m]
c_a	Soortelijke warmte van staal ≈ 600	[J/kgK]
c_p	Soortelijke warmte van het isolatiemateriaal	[J/kgK]
d	Diameter van een buis	[mm]
d_p	Droge laagdikte van het isolatiemateriaal	[m]
f_y	Vloei grens in koude toestand van het staal	[N/mm ²]
h	Hoogte van een profiel	[m]
i	Traagheidsstraal van een profiel om de zwakke of sterke as	[m ³]
$k_{E,\theta}$	Reductiefactor bij brand voor de elasticiteitsmodulus	[-]
$k_{p,\theta}$	Reductiefactor bij brand voor de proportionaliteitsgrens	[-]
$k_{y,\theta}$	Reductiefactor bij brand voor de vloei grens	[-]
l_{fi}	Kniklengte bij brand	[m]
n	Aantal verdiepingen dat een kolom draagt	
q_{fi}	Uniform verdeelde lijnlast bij brand	[kN/m]
t	Tijd na het begin van de brand	[min]
t	Dikte van het plaatdeel voor de doorsnede classificatie	[m]

5 EIGENSCHAPPEN VAN DE ISOLATIE

Voor een eerste ontwerpberekening van de opwarming van het staal kan gebruik gemaakt worden van de richtwaarden van de thermische eigenschappen van isolatiematerialen zoals gegeven in tabel 5. Voor een definitieve bepaling van de benodigde isolatiedikte wordt verwezen naar de attesten van de leveranciers van de brandwerende materialen.

Tabel 5: Praktische waarden voor de thermische eigenschappen van isolatiematerialen.

Isolatiemateriaal	ρ_p [kg/m ³]	λ_p [W/mK]	c_p [J/kgK]
Spuitmateriaal met lage dichtheid			
- minerale vezels	300	0,12	1200
- vermiculiet cement of perliet	350	0,12	1200
Spuitmateriaal met hoge dichtheid			
- vermiculiet of perliet met cement	550	0,12	1100
- vermiculiet of perliet met gips	650	0,12	1100
Plaatmateriaal			
- vermiculiet of perliet met cement	800	0,20	1200
- silicaat- of calciumsilicaat vezel	600	0,15	1200
- vezel cement	800	0,15	1200
- gips	800	0,20	1700
Dekens: minerale wol, steenwol	150	0,20	1200
Opschuimende verf	0	0,005 -0,012	0

7 REFERENTIES

- EN 10025-1: 2005, *Warmgewalste producten van constructiestaal – Deel 1: Algemene technische leveringsvoorwaarden*, CEN, Brussel, België
- EN 1990: 2005, *Eurocode 0, Basis of design*, CEN, Brussel, België
- EN 1991-1-2: 2002, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, CEN, Brussel, België
- EN 1991-1-3: 2003, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads*, CEN, Brussel, België
- EN 1993-1-1: 2005, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN, Brussel, België
- EN 1993-1-2: 2005, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*, CEN, Brussel, België
- ISO 834: 1999, *Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements*, ISO, Geneve, Zwitserland

8 CONTACTGEGEVENS

Staalinfocentrum
Zelliksesteenweg 12
1082 Brussel
helpdesk@infosteel.be
www.infosteel.be



9 REKENVOORBEELDEN

9.1 Statisch bepaalde ligger

Gegeven: Ligger IPE300 in een kantoor met een staalplaatbetonvloer op de bovenflens in S235. Het plastisch moment bij kamertemperatuur is $M_{Ra,fi,0} = 147,7$ kNm. De ligger is bekleed met een opschuimende verf met een droge laagdikte van 1 mm. Overspanning 6 m. De hart-op-hart-afstand tussen de liggers is 3 m. Eigen gewicht van de vloer inclusief afwerking: $G_{vl} = 3$ kN/m². Eigen gewicht ligger: 0,4 kN/m'. Veranderlijke belasting voor een kantoorgebouw, zie tabel 2: $Q_{ver} = 3$ kN/m².

Gevraagd: Bepaal de brandwerendheid.

9.1.1 Eenvoudige bepaling

Stap 1: Bepaal de benuttingsgraad. De meest eenvoudige benadering is de veilige aanname: $\mu_0 = 0,65$.

Stap 2: Bepaal de correctiefactor. Omdat de bovenflens gesteund is tegen kip door de vloer zijn de κ -factoren van toepassing. Voor geïsoleerde statisch bepaalde liggers met een betonplaat aan de bovenzijde geldt: $\kappa = 0,85$.

Stap 3: Bepaal de kritieke temperatuur uit figuur 2: $\theta_{cr} = 573$ °C.

Stap 4: Bepaal de profielfactor: Uit tabel 6 volgt $P = 188$ m⁻¹ voor een contourvolgend bekleed profiel.

Stap 5: Corrigeer de profielfactor: Neem $\lambda_p = 0,01$ W/mK. De thermische traagheid van opschuimend verf is verwaarloosbaar ($\phi = 0$)

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 188 \cdot \frac{0,01}{0,001} \cdot \frac{1}{1 + 0} = 1880 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Stap 6: Bepaal grafisch de brandwerendheid uit figuur 2: $t = 50$ minuten. De ligger voldoet aan een R30 eis.

9.1.2 Nauwkeurige bepaling

Stap 1: Bepaal de benuttingsgraad als

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

De belasting bij brand is gelijk aan:

$$q_{fi} = 3 \cdot 3 + 0,4 + 0,3 \cdot 3 \cdot 3 = 12,1 \text{ kN/m}^2$$

Het optredend buigend moment bij brand is dan gelijk aan:

$$M_{Ed,fi} = \frac{1}{8} \cdot 12,1 \cdot 6^2 = 54,5 \text{ kNm}$$

En de benuttingsgraad is gelijk aan:

$$\mu_0 = \frac{54,5}{147,7} = 0,37$$

Stap 2: Deze stap is identiek aan 9.1.1: $\kappa = 0,85$.

Stap 3: Uit figuur 2 volgt: $\theta_{cr} = 665$ °C.

Stap 4 & 5: Deze stappen zijn identiek aan 9.1.1: $P_{mod} = 1880$ W/m³K.

Stap 6: De brandwerendheid is 66 minuten. De ligger voldoet aan R60.

9.2 Statisch onbepaalde ligger

Gegeven: Dezelfde ligger als uit 9.1, maar nu statisch onbepaald opgelegd.

Gevraagd: Bepaal de isolatiedikte voor 120 minuten brandwerendheid, uitgaande van een plaat van calciumsilicaat.

Stap 1: Het buigend moment wordt bij benadering gegeven door

$$M_{Ed,fi} = \frac{1}{12} \cdot 12,1 \cdot 6^2 = 36,3 \text{ kNm}$$

Hieruit volgt $\mu_0 = 36,3 / 147,7 = 0,25$.

Stap 2: Voor beschermde driezijdig verhitte statisch onbepaalde liggers:
 $\kappa = 0,85 \cdot 0,85 = 0,7$

Stap 3: Uit figuur 2 volgt: $\theta_{cr} = 748$ °C.

Stap 4: Uit tabel 6 volgt met box-vormige isolatie geldt: $P = 139$ m⁻¹.

Om aan R120 te voldoen blijkt uit figuur 2 dat een gemodificeerde profielfactor nodig is van $P_{mod} = 1350$ W/m³K. Als eerste benadering verwaarlozen we de thermische traagheid van de isolatie ($\phi = 0$). Met $\lambda_p = 0,15$ W/mK hebben we een dikte nodig van:

$$d_p = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{P_{mod}} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 139 \cdot \frac{0,15}{1350} \cdot \frac{1}{1 + 0} = 15,4 \text{ mm}$$

Het verschil in dikte door de thermische traagheid van de isolatie in rekening te brengen wordt afgeschat: Met $d_p = 13,9$ mm en de waarden uit tabel 5 vinden we

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V} = \frac{600 \cdot 1200}{600 \cdot 7850} \cdot 0,0154 \cdot 139 = 0,33$$

Met deze waarde vinden we een benodigde dikte van:

$$d_p = 15,4 / (1 + 0,33 / 3) = 13,9 \text{ mm.}$$

9.3 Onbeschermde statisch onbepaalde ligger

Gegeven: De ligger van het voorbeeld van 9.2 wordt niet beschermd, maar uitgevoerd in S355.

Gevraagd: Controleer of de ligger voldoet aan een R30 eis.

Stap 1: Door de toepassing van S355 daalt de benuttingsgraad tot:

$$\mu_0 = 235 / 355 \cdot 0,25 = 0,16$$

Stap 2: Voor onbeschermde driezijdig verhitte statisch onbepaalde liggers:

$$\kappa = 0,7 \cdot 0,85 = 0,6$$

Stap 3: Uit figuur 2 volgt: $\theta_{cr} = 825$ °C

Stap 4: Er moet worden uitgegaan van de boxvormige profielfactor:

$$P = 139 \text{ m}^{-1}$$

Stap 5: De profielfactor van een onbekleed I-profiel moet worden gecorrigeerd met een factor 0,9:

$$P = 0,9 \cdot 139 = 125 \text{ m}^{-1}$$

Stap 6: De brandwerendheid = 32 minuten. De ligger voldoet aan R30.

9.4 Centrisch belaste kolom

Gegeven: Een uitsluitend op normaalkracht belaste kolom HEA 200 in S235. De traagheidsstraal om de zwakke as $i = 49,8$ mm en het oppervlak van de doorsnede $A_a = 5383$ mm². De kolom is bekleed met 20 mm gipsplaat. De verdiepingshoogte is 3 m. De draagkracht in het koude ontwerp is $R_d = 962$ kN. De doorgaande kolom op een tussen-gelegen verdieping wordt beschouwd. De kolom draagt vijf verdiepingen met aan weerszijden van de kolom de ligger van voorbeeld 9.1.

Gevraagd: Bepaal de brandwerendheid.

9.4.1 Eenvoudige methode met een schatting van de benuttingsgraad

Stap 1: Bepaal de benuttingsgraad. De verhouding van Q_d/G_k is

$$Q_d/G_k = (3 \cdot 3) / (3 \cdot 3 + 0,4) \approx 1$$

Uit tabel 2 blijkt dat de belastingen bij brand tot 0,53 worden gereduceerd. Dit is een veilige aanname voor μ_0 .

Stap 2: Bepaal de correctiefactor. Voor doorgaande kolommen op tussengelegen verdiepingen geldt dat de kniklengte in geval van brand mag worden gehalveerd: $\alpha = 0,5$.

Stap 3: Bepaal de kritieke temperatuur uit figuur 2: $\theta_{cr} = 560$ °C.

Stap 4: Bepaal de profielfactor: Uit tabel 6 volgt $P = 145$ m⁻¹ voor een box-vormig bekleed profiel.

Stap 5: Corrigeer de profielfactor.

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A}{V} = \frac{800 \cdot 1700}{600 \cdot 7850} \cdot 0,02 \cdot 145 = 0,84$$

$$P_{mod} = \frac{A}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 145 \cdot \frac{0,2}{0,02} \cdot \frac{1}{1 + 0,84/3} = 1134 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Stap 6: Bepaal grafisch de brandwerendheid uit figuur 2: $t = 70$ minuten. De kolom voldoet aan R60.

9.4.2 Eenvoudige methode met nauwkeurige bepaling benuttingsgraad

Stap 1: De kolom draagt $5 \cdot 2 = 10$ liggers van voorbeeld 9.1. De helft van de belasting van elke ligger wordt naar de kolom afgedragen:

$$E_{fi,d} = 10 \cdot 12,1 \cdot 6 / 2 = 363 \text{ kN}$$

Om de lijnen in figuur 2 van $\alpha = 0,5$, 0,7 en 1 te kunnen hanteren moeten de benuttingsgraad worden berekend voor kolommen als:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_d = 363 / 962 = 0,38$$

Stap 2: Deze stap is identiek aan 9.4.1: $\alpha = 0,5$.

Stap 3: Uit figuur 2 volgt: $\theta_{cr} = 618$ °C

Stap 4 & 5: Deze stappen zijn identiek aan 9.4.1: $P_{mod} = 1134$ W/m³K

Stap 6: Bepaal grafisch de brandwerendheid uit figuur 2: $t = 83$ minuten. De kolom voldoet aan R60.

9.4.3 Nauwkeurige methode

Stap 1: Bepaal de plastische benuttingsgraad:

$$\mu_{pl} = E_{fi,d} / (A_a f_y) = 363 / (5383 \cdot 235) = 0,29$$

Stap 2: Bereken de slankheid op $t = 0$:





$$\bar{\lambda}_{\theta,0} = \alpha \cdot \bar{\lambda} = \alpha \cdot \frac{L_{cr}}{i} = 0,5 \cdot \frac{3000}{93,9 \cdot \sqrt{235/f_y}} = 0,5 \cdot \frac{3000}{49,8 \cdot 93,9} = 0,32$$

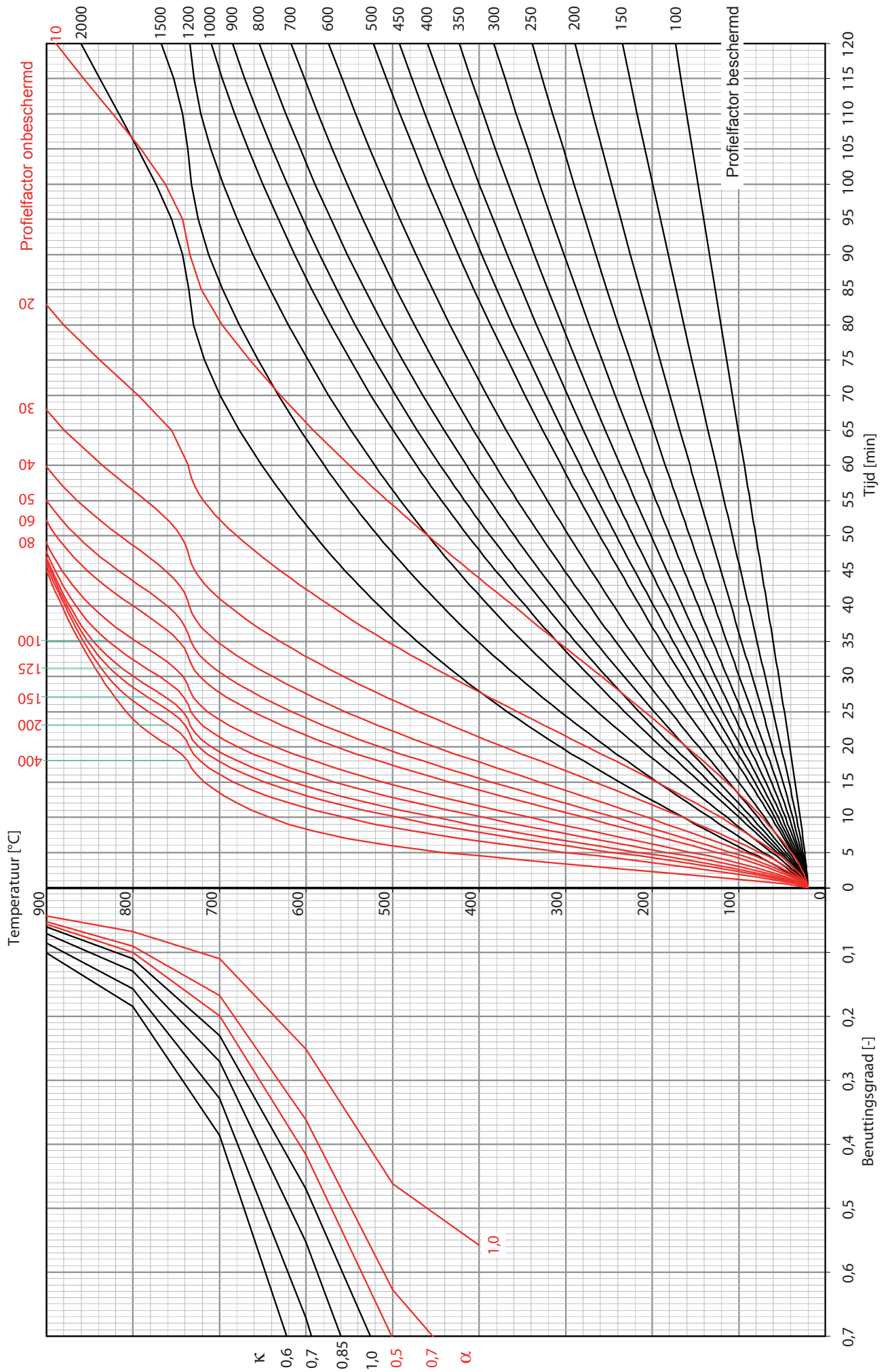
Stap 3: Bepaal de kritieke temperatuur uit tabel 4: $\theta_{cr} = 639$ °C.

Stap 4 & 5: Deze stappen zijn identiek aan 9.4.1: $P_{mod} = 1134$ W/m³K

Stap 6: De brandwerendheid is 88 minuten. De kolom voldoet aan R60.

Tabel 6: Profiefactoren voor staalprofielen. Voor onbeschermde I-profielen en H-profielen moeten de waarden worden toegepast behorend bij een box-vormige bescherming vermenigvuldigd met een factor 0,9.

																			
HEAA					HEA					HEB					HEM				
100	181	288	245	353	100	137	217	185	264	100	115	180	154	219	100	65	97	85	116
120	182	296	247	361	120	137	221	185	268	120	106	168	141	203	120	61	92	80	111
140	172	282	233	343	140	129	207	174	251	140	98	156	130	189	140	58	89	76	107
160	150	244	203	296	160	120	193	161	235	160	88	140	118	170	160	54	83	71	100
180	141	230	190	279	180	115	186	155	225	180	83	132	110	159	180	52	80	68	96
200	130	211	175	256	200	108	175	145	212	200	77	122	102	147	200	49	76	65	91
220	122	200	165	243	220	99	162	134	196	220	72	115	97	139	220	47	73	62	88
240	114	185	154	225	240	91	147	122	178	240	68	108	91	130	240	39	61	52	73
260	108	175	146	213	260	88	141	117	170	260	66	105	88	127	260	39	60	51	72
280	104	168	139	204	280	84	136	113	165	280	64	102	85	123	280	38	58	50	70
300	97	159	131	192	300	78	126	105	153	300	60	96	80	116	300	33	50	43	60
320	95	152	127	184	320	74	117	98	141	320	58	91	77	110	320	33	50	43	60
340	94	147	123	177	340	72	112	94	135	340	57	88	75	106	340	34	50	43	60
360	92	142	120	170	360	70	107	91	128	360	56	86	73	102	360	34	51	44	61
400	90	135	115	161	400	68	101	87	120	400	56	82	71	98	400	36	52	45	61
450	90	132	114	156	450	66	96	83	113	450	55	79	69	93	450	38	53	47	63
500	91	130	113	152	500	65	92	80	107	500	54	77	67	89	500	39	54	48	63
550	88	123	108	143	550	65	90	79	104	550	55	76	67	87	550	41	56	50	64
600	88	120	106	138	600	65	89	79	102	600	56	75	67	86	600	42	57	51	65
650	88	118	105	135	650	65	87	78	100	650	56	74	66	85	650	44	58	52	66
700	86	114	102	129	700	64	85	76	96	700	55	72	65	82	700	45	59	53	67
800	84	108	98	122	800	66	84	76	94	800	57	72	66	81	800	48	61	55	68
900	81	102	93	113	900	65	81	74	90	900	57	70	65	78	900	50	62	57	69
1000	79	98	90	108	1000	66	81	74	89	1000	58	70	65	78	1000	52	64	59	70
IPE					IPE A					IPE O					HL				
80	270	369	330	429	80	317	429	389	502	180	168	228	202	262	1000 AA	71	93	83	105
100	247	334	300	388	100	286	393	349	456	200	158	212	190	244	1000 A	58	76	68	86
120	230	315	279	363	120	271	368	329	426	220	149	200	179	230	1000 B	51	66	59	74
140	215	290	259	335	140	260	356	314	411	240	139	185	167	213	1000 M	46	60	54	67
160	200	268	241	309	160	245	333	295	383	270	127	170	152	195	1000 x 477	40	52	47	58
180	188	254	226	292	180	227	306	274	352	300	121	162	145	186	1000 x 554	35	45	41	51
200	176	235	211	270	200	210	281	253	324	330	114	153	137	175	1000 x 642	31	39	36	44
220	165	222	198	255	220	192	258	231	297	360	107	142	127	163	1000 x 748	27	34	31	38
240	153	204	184	235	240	178	240	214	276	400	103	135	122	154	1100 A	59	76	68	85
270	147	197	176	226	270	171	231	205	266	450	94	121	110	138	1100 B	52	67	60	75
300	139	188	167	216	300	160	217	192	249	500	89	114	104	129	1100 M	47	61	55	68
330	131	174	157	200	330	149	199	178	228	550	85	107	98	121	1100 R	42	53	48	59
360	122	162	146	186	360	138	184	165	211	600	73	93	85	104					
400	116	153	137	174	400	133	175	158	200										
450	110	144	130	163	450	127	165	149	187										
500	104	133	121	151	500	118	152	138	172										
550	97	124	113	140	550	111	142	129	160										
600	91	115	105	129	600	103	131	119	147										
750 x 137	101	129	116	144															
750 x 147	94	120	109	134															
750 x 173	81	102	93	114															
750 x 196	72	91	83	102															
UPE					L					HD					HE				
80	209	291	258	341	90 x 90 x 9	143	168	201	226	260 x 54.1	108	175	146	213	400 x 299	31	45	40	53
100	204	278	248	322	100 x 100 x 8	159	187	223	251	260 x 68.2	88	141	117	170	400 x 347	28	40	35	47
120	195	259	233	298	100x10 0x 10	129	151	181	204	260 x 93	66	105	88	127	400 x 403	25	35	31	41
140	187	247	223	282	100 x 100 x 12	109	128	153	172	260 x 114	55	86	73	104	400 x 468	22	31	27	36
160	180	235	212	267	110 x 110 x 10	128	151	180	203	260 x 142	46	71	60	85	450 x 312	33	46	40	53
180	173	225	203	254	110 x 110 x 12	108	127	152	171	260 x 172	39	60	51	72	450 x 368	28	39	35	46
200	165	213	193	240	120 x 80 x 8	174	201	225	252	260 x 225	31	47	40	56	450 x 436	25	34	30	40
220	155	198	180	223	120 x 80 x 10	141	163	183	204	260 x 299	25	37	32	44	450 x 519	22	29	26	34
240	148	188	171	211	120 x 120 x 11	117	138	164	185	320 x 74.2	95	152	127	184	500 x 320	34	47	41	54
270	142	178	163	199	120 x 120 x 12	108	127	151	170	320 x 97.6	74	117	98	141	500 x 379	29	40	36	47
300	124	153	141	171	120 x 120 x 13	100	118	141	158	320 x 127	58	91	77	110	500 x 451	25	34	31	40
330	113	138	128	153	120 x 120 x 15	88	103	123	138	320 x 158	48	74	63	89	500 x 534	22	30	27	35
360	107	130	121	144	130 x 130 x 12	107	126	150	170	320 x 198	39	60	51	73	550 x 330	35	48	42	55
400	100	120	112	133	140 x 140 x 13	99	116	139	157	320 x 245	33	50	43	60	550 x 393	30	41	37	47
					150 x 90 x 10	143	164	182	203	320 x 300	28	42	36	50	550 x 466	26	35	32	40
					150 x 90 x 11	131	150	166	185	320 x 368	24	35	30	42	550 x 552	23	30	28	35
					150 x 100 x 10	139	161	180	203	320 x 451	20	29	26	35	600 x 340	36	48	43	55
					150 x 100 x 12	117	136	152	170	360 x 134	63	104	85	125	600 x 402	31	42	38	48
					150 x 150 x 12	106	125	149	168	360 x 147	58	95	78	114	600 x 477	27	36	32	41
					150 x 150 x 14	92	108	129	145	360 x 162	53	87	71	105	600 x 564	24	31	28	35
					150 x 150 x 15	86	101	121	136	360 x 179	49	79	65	95	650 x 347	38	49	45	56
					150 x 150 x 18	73	85	102	115	360 x 196	45	72	60	87	650 x 410	33	42	39	48
					160 x 160 x 15	86	101	121	136	400 x 187	47	78	64	94	650 x 487	28	36	33	42
					160 x 160 x 17	76	90	107	121	400 x 216	42	68	56	82	650 x 579	24	31	29	36
					180 x 180 x 16	74	95	107	128	400 x 237	38	63	52	76	700 x 356	39	50	46	57
					180 x 180 x 18	66	85	96	114	400 x 262	35	57	47	69	700 x 421	34	43	39	49
					200 x 100 x 10	147	167	181	201	400 x 287	32	52	43	63	700 x 500	29	37	34	42
					200 x 100 x 12	124	140	153	169	400 x 314	30	48	40	58	700 x 594	25	32	29	36
					200 x 100 x 14	107	121	132	146	400 x 347	28	44	37	53	800 x 377	41	51	47	58
					200 x 200 x 16	80	95	112	127	400 x 382	25	40	34	49	800 x 448	35	44	40	49
					200 x 200 x 20	65	77												



Figuur 2: Nomogram voor de bepaling van de kritieke temperatuur en de brandwerendheid.