

Brandwerendheid van slanke stalen plaatliggers in industriehallen



Afstudeerverslag
Rinse Wiersum

Maart 2011

Brandwerendheid van slanke stalen plaatliggers in industriehallen



Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Structural Engineering

Leden van de afstudeercommissie:

prof. ir. F.S.K. Bijlaard (TU Delft), Voorzitter

ir. R. Abspoel (TU Delft)

ir. L. Twilt (Efectis, Centrum voor Brandveiligheid TNO)

dr. ir. P.C.J. Hoogenboom (TU Delft)

prof. dipl. ing. J.N.J.A. Vambersky (TU Delft)

Maart 2011
Groningen, Nederland

Rinse Wiersum
CT 1181068

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport behorende bij mijn afstudeeronderzoek bij de vakgroep “Structural Engineering” van TU Delft. Op de TU Delft loopt, gelijktijdig met mijn afstuderen, een promotieonderzoek van ir. R. Abspoel naar de maximale lijfslankheid van gelaste stalen plaatliggers¹ in de uiterste grenstoestand.

Door het toepassen van slankere plaatliggers kan het materiaalgebruik worden geminimaliseerd, mede door het gebruik van hogere sterkte staal. Bij het toepassen van nieuwe criteria is het van belang dat de sterkte van de (draag)constructie in alle omstandigheden blijft gewaarborgd (ook onder bijzondere omstandigheden). Er zijn redenen om aan te nemen dat de sterkte van plaatliggers met een hoge lijfslankheid tijdens een brand drastisch afneemt, gelet op de verhouding tussen aangestraald oppervlak en het volume van de plaatligger. De brandwerendheid van stalen plaatliggers met hoge lijfslankheid toegepast in industriehallen is onderzocht in mijn afstudeerproject.

Het bereiken van het eindresultaat is niet zonder slag of stoot gegaan. Desalniettemin kan ik terug kijken op een periode waarbij veel positieve stimulans is gegeven door mijn afstudeerbegeleiders, ouders en medestudenten. Hierbij wil ik de heer Bijlaard in het bijzonder bedanken voor het actief motiveren om het rapport af te ronden.

Rinse Wiersum

Maart 2011, Groningen

¹ Stalen plaatliggers worden toegepast in de draagconstructie van bijvoorbeeld bruggen of gebouwen.

Samenvatting

Een stalen plaatligger is een hoog I-profiel samengesteld uit stalen platen die aan elkaar worden gelast of gebout. Stalen plaatliggers kunnen geplaatst worden als dakligger in industriehallen. Het toepassen van een stalen plaatligger in plaats van een raatligger of vakwerkligger kan in economisch opzicht de optimale keuze zijn. Door het verhogen van de maximale lijfslankheid van liggers kan het staal efficiënter in de doorsnede worden geplaatst.

Er zijn echter redenen om kritisch naar de brandwerendheid van slanke plaatliggers te kijken. De redenen waarom aangenomen mag worden dat een ligger met hogere lijfslankheid negatieve gevolgen heeft voor de brandwerendheid zijn:

- Door het dunner maken van de staalplaten, zal de profielfactor van de stalen plaatligger worden verhoogd en de opwarming sneller gaan. Door een snellere opwarming zal de kritieke staaltemperatuur eerder worden bereikt waardoor de ligger relatief snel zal bezwijken;
- Vanwege stabiliteitsproblemen is het aannemelijk dat de kritieke staaltemperatuur van plaatliggers met hoge lijfslankheid tijdens een brand snel zal worden bereikt. Het lijf van een stalen plaatligger met hoge slankheid zal doorgaans geclassificeerd worden als klasse 4. De kritieke staaltemperatuur van klasse 4 profielen is 350 °C conform de EN 1993-1-2 (indien geen hogere kritieke staaltemperatuur is aangetoond). Een temperatuur van 350 °C wordt tijdens een brand conform de standaard-brandkromme snel bereikt: na ca. 5 minuten.

In dit onderzoek zijn de gevolgen van het slanker maken van het lijf van stalen plaatliggers voor de brandwerendheid onderzocht. In het kader van dit onderzoek is gekeken naar een stalen plaatligger toegepast als dakligger in een industriehal. Een hal is een gebouw met één bouwlaag met een relatief grote ruimte. Industriehallen worden gebouwd met verschillende functies (bijv. productie, opslag of met agrarische bestemming). De overspanningen van deze hallen zullen afhankelijk van de functie variëren van 15 tot 50 meter. Voor dergelijke grote overspanningen kan als dakligger een stalen plaatligger, raatligger of vakwerkligger worden toegepast.

De maximale lijfslankheid van stalen plaatliggers is vanwege instabiliteitsproblemen (bijv. plooi van het lijf) in de EN 1993-1-5 beperkt. De formule in deze norm, voor de maximale lijfslankheid is echter in het begin van de jaren zestig bepaald aan de hand van één laboratoriumtest, die van Basler. De maximale lijfslankheid voor constructiestaal (S235) is ongeveer 700-800 (indien wordt uitgegaan van een verhouding tussen het lijf en flensoppervlak van $\frac{1}{2}$ tot 2).

In het Bouwbesluit wordt niet altijd een expliciete eis gesteld aan de standaard-brandwerendheid (brandwerendheid bij blootstelling aan opwarming volgens de standaard brandkromme) van de hoofddraagconstructie van industriehallen. Daardoor bestaat de mogelijkheid om, na het verruimen van de maximale lijfslankheid, een bouwvergunning te krijgen voor een gebouw met plaatliggers met extreem hoge lijfslankheid. Voor het onderzoeken van de veiligheid met betrekking tot bezwijken van de plaatliggers tijdens

een brand is voor dit onderzoek, mede omdat voor hallen niet altijd een expliciete brandwerendheidseis wordt voorgeschreven, een ondergrens gesteld aan de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie. Bij wijze van werkhypothese is in dit verslag verondersteld dat voor hallen een minimale brandwerendheid van 20 minuten, gerekend vanaf het begin van de brand, moet worden aangehouden. Indien gerekend wordt met de standaard-brandkromme wordt een brandwerendheid van 10 minuten voldoende geacht.

Een hoge lijfslankheid zal, zoals is aangetoond in dit onderzoek, veelal leiden tot een hoge profielfactor (A_m/V). De standaard-brandwerendheid van stalen plaatliggers met een profielfactor groter dan 250 m^{-1} is minder dan 10 minuten. Voor zeer slanke plaatliggers kan een profielfactor groter dan 350 m^{-1} worden verwacht. Dit is dus onvoldoende om zonder aanvullende voorzieningen veilig te kunnen worden toegepast in een industriehal. Het is noodzakelijk om kritisch te kijken naar de brandwerendheid van stalen plaatliggers met hoge lijfslankheid.

In het verslag worden oplossingen aangedragen om de brandwerendheid te vergroten. Het brandwerend bekleden van het profiel levert de grootste bijdrage aan de toename van de brandwerendheid, maar ondermijnt de economische winst van de toepassing van plaatliggers met grote lijfslankheid. Overige oplossingen die onderzocht zijn leveren onvoldoende brandwerendheid op, of zijn praktisch of economisch gezien niet de optimale oplossing om toe te passen in industriehallen.

Om een juist oordeel te geven over een realistische brandwerendheidseis is in dit onderzoek gekeken naar de brandwerendheid bij het totale verloop van de brand (dus inclusief de fase voor vlamoverslag).

Door een model op te stellen van een meer realistisch verloop van de temperatuur in een brandcompartiment is vast te stellen welke tijd de staaltemperatuur onder de kritieke staaltemperatuur van doorsnedeklasse 4 profielen zal blijven. In dit onderzoek is het verloop onderzocht van de temperatuur in een groot brandcompartiment (35m breed, 40m lang, 8m hoog). Aangetoond is dat de tijd voor het bereiken van de kritieke staaltemperatuur sterk afhankelijk is van de uitbreidingsnelheid van de brand. De branduitbreidingsnelheid wordt gekarakteriseerd door de tijd waarin de oppervlakte van de brand gegroeid is tot een oppervlakte met een effectieve hoeveelheid warmte afgifte van 1 MW, de zogenaamde tijdconstante (t_u). Een lage tijdconstante betekent een snelle branduitbreiding.

Indien de materialen gebruikt voor de afwerking van de gevels en vloer niet bijdragen aan een snellere branduitbreiding, is de tijdconstante afhankelijk van de hoeveelheid en aard van de opgeslagen materialen in de hal.

In het gekozen brandcompartiment wordt de kritieke staaltemperatuur (van $350 \text{ }^\circ\text{C}$) bereikt na 20 minuten (na ontsteking) bij een tijdconstante (t_u) van 160 seconden. Bij deze tijdconstante hebben de gebruikers dus voldoende tijd om uit het gebouw te vluchten, en de brandweer het gebouw te doorzoeken. Deze conclusie kan alleen worden getrokken voor het gekozen brandcompartiment. Indien de industriehal wordt gevuld met materialen waarbij een hogere tijdconstante moet worden aangenomen, kan een brandwerendheid worden verwacht van meer dan 20 minuten.

De tijdconstante van gebouwen met een industriefunctie kan variëren tussen 75 en 600 seconden. Een snelle branduitbreiding is te verwachten in industriehallen met veel hout / papieropslag. Een ultrasnelle branduitbreiding is te verwachten in een chemische fabriek of een opslag met gestoffeerde meubelen. Voorbeelden van fabrieken met een langzame branduitbreiding zijn opslag van staal / steen.

Aanbevolen wordt om stalen plaatliggers met grote lijfslankheid in de hoofddraagconstructie van industriegebouwen te accepteren met in achtname van het volgende. Voor bouw aanvragen van industriehallen waar een $t_a \leq 160$ seconden verwacht wordt, dient de ontwerper aan te tonen dat de constructie een minimale standaard-brandwerendheid bezit van 10 minuten.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	12
2. Constructief ontwerp stalen plaatliggers	15
2.1. Constructief ontwerp bij normale temperatuur.....	15
2.1.1. Mechanische belastingen	15
2.1.2. Mechanische response.....	16
2.2. Constructief ontwerp bij brand.....	17
2.2.1. Thermische belastingen.....	19
2.2.2. Thermische response	24
2.2.3. Mechanische belastingen	28
2.2.4. Mechanische response.....	29
2.2.5. Eisen Bouwbesluit.....	29
3. Industriehallen.....	31
3.1. Gebouwfunctie	31
3.2. Materiaalgebruik vloer/ gevels en dak	31
3.3. Constructie dak	33
3.4. Bouwkundige integratie dakliggers.....	33
3.5. Praktijkvoorbeeld.....	37
3.5.1. Stalen plaatligger.....	40
3.5.2. Raatligger	41
3.5.3. Vakwerkligger.....	41
3.5.4. Vergelijking	42
4. Brand in industriegebouwen	44
4.1. Brandeigenschappen	44
4.1.1. Geometrie.....	44
4.1.2. Ventilatiecondities.....	45
4.1.3. Brandvermogensdichtheid (Q)	45
4.1.4. Vuurbelasting	45
4.1.5. Branduitbreidingssnelheid.....	47
4.2. Parameterstudie	49
4.2.1. OZone	49
4.2.2. Brandscenario's.....	50
4.2.3. Resultaten parameterstudie	50
4.2.4. Conclusie.....	54
5. Benodigde brandwerendheid hoofddraagconstructie in industriehallen.....	55
6. Brandwerendheid stalen plaatliggers	57
6.1. Kritieke temperatuur	57
6.2. Brandwerendheid bepaald met standaard-brandkromme	57
6.3. Brandwerendheid bepaald met natuurlijk brandconcept	58

6.4. Bespreking thermische response slanke stalen plaatliggers (onder standaard-brandomstandigheden)	59
6.5. Bespreking mechanische response slanke stalen plaatliggers	61
6.6. Vergelijking brandwerendheid van liggers met alternatieve profielen.....	63
6.6.1. Raatligger	63
6.6.2. Vakwerkligger.....	65
7. Optimalisatie brandwerendheid stalen plaatliggers.....	66
7.1. Effect ligger geometrie.....	66
7.2. Effect isolatie	66
7.2.1. Profielvolgende bekleding.....	67
7.2.2. Kokervormige beplating.....	68
7.3. Effect bouwkundige integratie	68
7.4. Effect bescherming door een hitteschermb	70
7.5. Veranderen staalsoort (verhogen sterkte).....	72
7.6. Conclusie optimalisatie brandwerendheid stalen plaatliggers.....	73
8. Conclusies en aanbevelingen	74
Literatuurlijst.....	77

Bijlagen

Bijlage A	Constructief ontwerp van stalen plaatliggers bij normale temperatuur
Bijlage B	Constructief ontwerp van een raatligger bij normale temperatuur
Bijlage C	Constructief ontwerp van een vakwerkligger bij normale temperatuur
Bijlage D	Indicaties van kengetallen per m ² gebruikstoepassing
Bijlage E	Beschrijving modellering in OZone
Bijlage F	Analytische benadering kritieke staaltemperatuur
Bijlage G	Berekening vakwerkligger bij brand

Lijst met figuren

Figuur 1 symbolen gebruikt voor het bepalen van de classificatie van de doorsnede.....	14
Figuur 2 Windvormfactoren van toepassing op een plat dak volgens NEN 6702 [5]	16
Figuur 3 Knik van de gedrukte flens door plooï van het lijf [3].....	17
Figuur 4 Standaard-brandkromme v.s. natuurlijke brand	20
Figuur 5 Nominale brandkrommen	21
Figuur 6 Warmtestroomdichtheid IPE 500 onderworpen aan een brand volgens de standaard-brandkromme.....	24
Figuur 7 Soortelijke warmte van staal, afhankelijk van de staaltemperatuur	26
Figuur 8 Bescherming van het staal door het aanbrengen van een brandwerend plafond [10].....	28
Figuur 9 Eisen Bouwbesluit aan de hoofddraagconstructie voor nieuw te bouwen (niet tot bewoning bestemde) gebouwen	30
Figuur 10 Dak afwerking	32
Figuur 11 Optie 1	34
Figuur 12 Optie 2	35

Figuur 13 Optie 3	35
Figuur 14 Optie 4	36
Figuur 15 Optie 5	37
Figuur 16 Schematische weergave dakoverzicht hal.....	38
Figuur 17 Windvormfactoren op een plat dak volgens NEN 6702 [5]	39
Figuur 18 Stalen plaatligger	40
Figuur 19 Raatligger	41
Figuur 20 Vakwerkligger	41
Figuur 21 Voorbeeld van een gebouw met een vuurbelasting $> 2.680 \text{ MJ/m}^2$, op de foto een opslaghal van suikerwaren	46
Figuur 22 Voorbeeld van een gebouw met een vuurbelasting $< 95 \text{ MJ/m}^2$, op de foto een productiehal van (stalen) kraanbanen	47
Figuur 23 Verloop van de brandvermogensdichtheid tijdens de groeifase voor 4 verschillende branduitbreidingssnelheden.....	48
Figuur 24 Extreem brandscenario	51
Figuur 25 Lage vuurbelasting	51
Figuur 26 Lagere brandvermogensdichtheid.....	52
Figuur 27 Lage uitbreidingssnelheid.....	53
Figuur 28 Matige uitbreidingssnelheid	53
Figuur 29 Verloop staaltemperatuur plaatligger (lijf: 1600 x 2 flenzen: 400 x 6) onderworpen aan een standaardbrand	57
Figuur 30 Verloop staaltemperatuur plaatligger (lijf: 1600 x 2 flenzen: 400 x 6) onderworpen aan een natuurlijke brand	59
Figuur 31 Ontwikkeling van de staaltemperatuur van een stalen plaatligger met hoge lijfslankheid (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) en een IPE 500 profiel, onderworpen aan een standaardbrand.....	60
Figuur 32 Verloop profielfactor en lijfslankheid bij een toenemende lijfdikte (vaste lijfhoogte van 1600 mm) ..	60
Figuur 33 Verloop profielfactor en lijfslankheid bij een toenemende lijfdikte (vaste lijfhoogte van 2500 mm) ..	61
Figuur 34 Standaard-brandwerendheid afhankelijk van de profielfactor (kritieke temperatuur = $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$).....	61
Figuur 35 Kritieke staaltemperatuur afhankelijk van de benuttinggraad	62
Figuur 36 Raatligger	63
Figuur 37 Aftrek niet aanwezige staal per meter raatligger	64
Figuur 38 Verloop staaltemperatuur raatligger; $A_m/V = 119 \text{ m}^{-1}$ uitgaande van een standaardbrand	64
Figuur 39 Normaalkrachten in staven (helpt vakwerkligger) bij belastingen in rekening te brengen bij brandomstandigheden	65
Figuur 40 Mogelijkheden m.b.t. de bekleding van het staal oppervlak.....	66
Figuur 41 Ontwikkeling staaltemperatuur onbekleed stalen plaatligger (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) onderworpen aan een standaardbrand	67
Figuur 42 Staaltemperatuur stalen plaatligger (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) met 20 mm mineraalvezel beplating onder standaard-brandomstandigheden	67

Figuur 43 Staaltemperatuur stalen plaatligger (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) met 25 of 60 mm steenwol platen onder standaard-brandomstandigheden	68
Figuur 44 Stalen plaatligger met het grootste gedeelte boven het dak (in een niet besloten ruimte)	69
Figuur 45 Staaltemperatuur stalen plaatligger met gedeelte buiten dak ($A_m/V = 338 \text{ m}^{-1}$)	70
Figuur 46 Voorbeeld verlaagd plafond met brandwerende beplating [10]	70
Figuur 47 Temperatuurontwikkeling van de spouw tijdens een proefopstelling	71
Figuur 48 Stalen plaatligger met brandwerend plafond (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6)	71
Figuur 49 Detail van de aansluiting van de brandwerende platen	72

Lijst met tabellen

Tabel 1 Overzicht van verschillende stalen liggerprofielen	33
Tabel 2 Vergelijking profielen op basis van kosten	43
Tabel 3 Voorbeelden van gebouwen met verschillende branduitbreidingssnelheden.	49
Tabel 4 Brandscenario's t.b.v. parameterstudie	50
Tabel 5 Voorbeelden van gebouwen met verschillende branduitbreidingssnelheden	74

Lijst met symbolen

A_{fc}	effectieve doorsnede van de gedrukte flens [mm^2]
A_w	doorsnede van het lijf [mm^2]
A_a	totale staaldoorsnede [mm^2]
C_{dim}	factor in verband met de afmetingen van een gebouw [-]
E	elasticiteitsmodulus [mm^4]
$E_{fi,d,t}$	rekenwaarde van het belastingseffect van toepassing in de brandsituatie op tijdstip t
E_d	belasting bij normale temperatuur
L_{cr}	kinklengte in koude toestand
$R_{fi,d,0}$	rekenwaarde van de weerstand bij 20 °C ($t=0$)
$R_{fi,d,t}$	rekenwaarde van de weerstand van het element bij brand op tijdstip t
f_y	vloeigrens van de doorsnede [N/mm^2]
f_{yf}	vloeigrens van de flens [N/mm^2]
$\dot{h}_{net}$	totale netto warmteoverdracht (door convectie en straling) [W/m^2]
$\dot{h}_{net,c}$	netto warmteoverdracht door convectie [W/m^2]
$\dot{h}_{net,r}$	netto warmteoverdracht door straling [W/m^2]
h_w	hoogte van het lijf [mm]

i	traagheidsstraal [mm]
k_{sh}	correctiefactor voor het schaduweffect [-]
p_w	stuwdruk van wind conform NEN 6702 [kN/m ²]
t_α	tijdconstante die de brandgroeisnelheid karakteriseert
$t_{fi,d}$	de rekenwaarde van de brandwerendheid [seconden]
$t_{fi,requ}$	de vereiste tijdsduur van de brandwerendheid [seconden]
t_w	dikte van het lijf [mm]
α_c	warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie [W/m ² K]
α	reductiefactor voor de kniklengte van kolommen bij brand / absorptiefactor
θ_g	gas temperatuur bij een element blootgesteld aan brand [°C]
θ_m	oppervlakte temperatuur van het element [°C]
θ_d	rekenwaarde van de staaltemperatuur [°C]
$\theta_{cr,d}$	rekenwaarde van de kritieke materiaaltemperatuur [°C]
Φ	zichtfactor
ε_m	emissiefactor van het oppervlakte van het element
ε_f	emissiefactor van de brand
μ_0	benuttinggraad
μ_{pl}	plastische benuttinggraad
λ	relatieve slankheid in koude toestand
$\lambda_{\theta,0}$	relatieve slankheid bij brand op tijdstip $t = 0$

Lijst met gebruikte termen

benuttinggraad

Ratio van de tijdens brand heersende mechanische belastingen en de weerstand van het profiel tijdens normale temperatuur (20 °C).

bezettingsgraad van gebruiksoppervlakte

Aantal m² gebruiksoppervlakte per persoon.

bezettingsgraad van vloeroppervlakte

Aantal m² vloeroppervlakte van een verblijfsgebied per persoon.

bezettingsgraadklasse

Klasse die de bezettingsgraad van een gebruiksoppervlakte en de bezettingsgraad van een vloeroppervlakte aan verblijfsgebied aangeeft.

brandgroeisnelheid

De brandgroeisnelheid wordt gekarakteriseerd door de tijd waarin de oppervlakte van de brand gegroeid is tot een oppervlakte met een hoeveelheid warmte afgifte van 1 MW. Deze tijd wordt aangegeven met de tijdconstante (t_{α}) in seconden.

brandwerendheid

De tijd gedurende welke een constructie, een gedeelte of een element daarvan het vermogen bezit om de vereiste functies (dragend en/of scheidend) te vervullen bij een bepaald belastingsniveau en een bepaalde blootstelling aan brand.

constructieve elementen

Dragende elementen van een constructie met inbegrip van de verbindingen.

industriefunctie (definitie volgens bouwbesluit)

Gebruiksfunctie voor het bedrijfsmatig bewerken of opslaan van materialen en goederen, of voor agrarische doeleinden.

kritieke staaltemperatuur

De kritieke staaltemperatuur is de temperatuur waarbij een stalen constructie-element bezwijkt (verondersteld wordt een uniforme temperatuur verdeling).

meetniveau

Hoogte van het aansluitende terrein, gemeten ter plaatse van de toegang van het gebouw.

ontwerp en berekening bij normale temperatuur

Ontwerp en berekening van de uiterste grenstoestand bij een omgevingstemperatuur van 20 °C.

profielfactor

De profielfactor P is de aan verhitting blootgestelde oppervlakte A_m , in m^2 per m lengte, gedeeld door het volume van het staalprofiel V, in m^3 per m lengte. Dit is gelijk aan de aan verhitting blootgestelde omtrek, in m^1 , gedeeld door de doorsnede van het staalprofiel in m^2 . De eenheid van A_m/V is m^{-1} .

schaduweffect

Bij de bepaling van de thermische response van een staalprofiel mag rekening gehouden worden met afscherming van de warmtestraling naar de profielf delen door de flenzen. Dit wordt in rekening gebracht door een correctiefactor voor het schaduw effect (k_{sh}).

standaard-brandwerendheid

De tijd gedurende welke een constructie, een gedeelte of een element daarvan het vermogen bezit om de vereiste functies (dragend en/of scheidend) te vervullen bij een bepaald belastingsniveau en blootstelling aan opwarming volgens de standaard-brandkromme.

vlamoverslag (E: flash-over)

Vlamoverslag is het plotseling geheel in brand raken van een ruimte tijdens de ontwikkeling van een brand in die ruimte.

vuurbelasting

Hoeveelheid warmte die vrijkomt per eenheid vloeroppervlakte bij volledige verbranding van alle in een ruimte/gebouw aanwezige brandbare materialen, met inbegrip van de materialen in de constructieonderdelen die zich binnen die ruimte/dat gebouw bevinden dan wel die ruimte/dat gebouw begrenzen.

zichtfactor

De zichtfactor is een maat voor het deel van de totale stralingswarmte dat vanaf een bepaald stralend oppervlak op een bepaald ontvangend oppervlak bereikt.

1. Inleiding

Voor het toetsen van de sterkte, stijfheid en stabiliteit van constructie-elementen worden normen gebruikt. In de norm voor stalen plaatconstructies EN 1993-1-5 [1] is een formule gegeven voor de maximaal toelaatbare lijfslankheid van stalen plaatliggers. Door het staal op de plek te positioneren waar dit voor de inwendige krachten het meest effectief is, kan het staalgebruik worden gereduceerd. Het vergroten van de lijfslankheid van stalen plaatliggers, kan een reductie van het staalgebruik opleveren.

Het is dus van belang te onderzoeken of de huidige formule voor de maximale lijfslankheid toereikend is. Indien mogelijk zullen nieuwe grenzen worden vastgesteld, met het doel zo slank mogelijke liggers toe te passen. Hierbij is het van belang de constructieve weerstand van de dragende elementen in alle gevallen te verifiëren. Ook in bijzondere situaties (zoals brand) dient de constructie voldoende weerstand te bieden om een acceptabel veiligheidsniveau te hebben voor de gebruikers van het gebouw. In dit onderzoek zal worden gekeken naar de invloed van het vergroten van de maximale lijfslankheid op de brandwerendheid van stalen plaatliggers.

Stalen plaatliggers worden veelal toegepast in draagconstructies met grote overspanningen zoals hallen en bruggen. Omdat brandveiligheid vooral van belang is voor gebouwen zal het toepassingsgebied van dit onderzoek zich beperken tot hallen. Een hal is een gebouw met één bouwlaag met een relatief grote ruimte. Hallen worden gebouwd met verschillende functies.

In dit afstudeerproject zal de brandveiligheid van stalen plaatliggers met een hoge lijfslankheid worden onderzocht in hallen met de gebruiksfunctie “industrie”. Industriebouwen worden gebouwd voor het bedrijfsmatig bewerken of opslaan van materialen en goederen. Tevens kan een industriefunctie, conform de definitie van het Bouwbesluit [2], worden gebruikt voor agrarische bestemmingen. De overspanningen van deze hallen zullen afhankelijk van de functie variëren van 15 tot 50 meter.

Voor industriebouwen zal, mede afhankelijk van de overspanning, een keuze gemaakt moeten worden voor de draagconstructie van het dak. Indien gekozen wordt voor een staalconstructie kan een gewalst profiel, stalen plaatligger, raatligger of vakwerkligger worden toegepast. Afhankelijk van kostenaspecten (fabricagetijd, uurloon en staalprijs), bouwtijd en esthetische waarden zal een keuze gemaakt worden. Vanwege de beperkte draagcapaciteit zal een gewalst profiel bij grotere overspanningen vaak ontoereikend zijn.

Stalen plaatliggers zijn opgebouwd uit stalen platen die aan elkaar worden gelast of gebout. In dit onderzoek wordt alleen een gelast profiel behandeld, omdat een geboute ligger in de praktijk niet vaak meer wordt toegepast in industriebouwen. De hoogte van de ligger kan oplopen tot 5 meter. De maximale lijfslankheid van stalen plaatliggers, zoals beschreven in de EN 1993-1-5 [1], is gebaseerd op de formule van Basler [3]. De

formule van Basler is:
$$\frac{h_w}{t_w} \leq 0,55 \cdot \frac{E}{f_{yf}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

Uit de formule blijkt dat de lijfslankheid beperkt wordt door een factor die afhankelijk is van materiaalspecificaties en profielafmetingen. De dikte van het lijf zal (bij staalsoort S235) gelijk zijn aan:

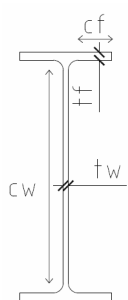
$$t_w \geq \frac{1}{500} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_f}} \cdot h_w$$

De verhouding A_w/A_f zal in de praktijk tussen $\frac{1}{2}$ en 2 zijn. De minimale dikte voor het lijf van een stalen plaatligger opgebouwd uit staalplaten met staalsoort S235 zal voor $\frac{1}{2} \leq A_w / A_f \leq 2$ volgens de formule van Basler gelijk zijn aan: $1/500 h_w \leq t_w \leq 1/350 h_w$.

Deze beperking is ingevoerd omdat bij zeer slanke liggerlijven is gebleken dat plooien van het lijf kan leiden tot het verticaal knikken van de flens in het lijf, oftewel “flange induced buckling”. Een analytisch model, opgesteld door Dr. Konrad Basler in 1961 [3], ligt hieraan ten grondslag.

Voor optimaal materiaalgebruik bij stalen plaatliggers is het wenselijk om slankere lijven toe te kunnen passen. Het slanker maken van het lijf van de ligger vereist extra onderzoek naar de brandwerendheid van de ligger. Er zijn namelijk twee redenen om aan te nemen dat de brandwerendheid van plaatliggers met een hoge lijfslankheid laag is. Deze zijn:

- Een hogere lijfslankheid zal leiden tot een hogere profielfactor (A_m/V). De profielfactor is de aanverhitting blootgestelde omtrek, in m^2 , gedeeld door het volume van het staalprofiel in m^3 . Een hoge profielfactor betekent dat de staaltemperatuur tijdens een brand snel zal toenemen. Bij een hogere lijfslankheid (bij gelijke hoogte) zal het volume van het lijf afnemen en de profielfactor toenemen. De kritieke staaltemperatuur zal tijdens een brand eerder worden bereikt. De profielfactor van walsprofielen zal tussen de $50 m^{-1}$ en $300 m^{-1}$ liggen. De profielfactor van stalen plaatliggers met een zeer hoge lijfslankheid is groter dan $400 m^{-1}$.
- De classificatie van de doorsnede van stalen I-liggers is afhankelijk van de lijf- en flensslankheid. Voor een ligger belast op buiging geldt dat het lijf van de ligger zal worden geclassificeerd als doorsnedeklasse 4, indien $c_w/t_w \geq 124\alpha$ met $\alpha = \sqrt{(235/f_y)}$, c_w en t_w volgens figuur 1. De kritieke temperatuur van klasse 4 profielen is $350^\circ C$ conform EN 1993-1-2 [4]. Deze norm biedt een mogelijkheid om een hogere kritieke temperatuur aan te tonen, maar voor een conservatieve benadering kan een kritieke temperatuur van $350^\circ C$ [4] worden aangehouden. Vanwege stabiliteitsproblemen (zoals plooien en het uitknikken van de gedrukte flens) van klasse 4 profielen is deze kritieke temperatuur relatief laag aangenomen. Een staaltemperatuur van $350^\circ C$ wordt tijdens een brand snel bereikt.



Figuur 1 symbolen gebruikt voor het bepalen van de classificatie van de doorsnede

Vanwege deze twee redenen is het van belang kritisch te kijken naar de brandwerendheid van stalen plaatliggers met hoge lijfslankheid, indien de grenzen van de maximale lijfslankheid worden verruimd. Alhoewel er niet in elke situatie een expliciete eis in het Bouwbesluit [2] wordt gesteld m.b.t. de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie, is het de zorg van de ontwerper – constructeur en architect - een gebouw zodanig te ontwerpen dat personen in het gebouw voldoende tijd hebben om het gebouw veilig te kunnen ontluchten tijdens een brand. Tevens moet de brandweer voldoende tijd hebben om het gebouw te kunnen doorzoeken.

Om de resultaten dicht bij de praktijk te houden, wordt er aan de hand van een constructief ontwerp van een industriehal gekeken naar de brandwerendheid van verschillende liggers. Naast de vaststelling van de brandwerendheid van de liggers, worden er aanbevelingen gedaan om de brandwerendheid te vergroten. De brandwerendheid van stalen plaatliggers wordt tevens vergeleken met de brandwerendheid van raatliggers en vakwerkliggers.

2. Constructief ontwerp stalen plaatliggers

De kenmerken van het constructief ontwerp van stalen plaatliggers met een grote lijfslankheid bij normale temperatuur (ca. 20 °C) en bij brand worden in dit hoofdstuk besproken. Bij het constructieve ontwerp van liggers dient rekening gehouden te worden met instabiliteitsproblemen. Voor stalen plaatliggers met een hoge lijfslankheid is de lokale stabiliteit kritisch.

Er zal hierna ingegaan worden op de rekenmethode voor het ontwerp en de toetsing van stalen plaatliggers. Voor het ontwerp bij normale temperatuur en brandomstandigheden zal in dit hoofdstuk een algemene bespreking worden gehouden.

2.1. Constructief ontwerp bij normale temperatuur

Aan de hand van normen kan de ontwerper van een constructie de criteria vaststellen waaraan een constructie dient te voldoen. In normen staan de belastingen waaraan de constructie weerstand moet bieden en rekenregels om de weerstand van de constructie te bepalen. Hierna zal worden ingegaan op de belastingen en de mechanische response van de constructie bij normale temperatuur die van toepassing zijn op dakliggers in industriehallen.

2.1.1. Mechanische belastingen

De belastingen waarop een constructie dient te worden gedimensioneerd kunnen worden onderverdeeld in permanente en veranderlijke belastingen. De belastingen zijn gegeven in de EN 1991. In EN 1990 wordt een beschrijving gegeven van de in rekening te brengen belastingcombinaties. In dit verslag wordt nog uitgegaan van de Nederlandse norm met belastingen en belastingcombinaties: NEN 6702 [5].

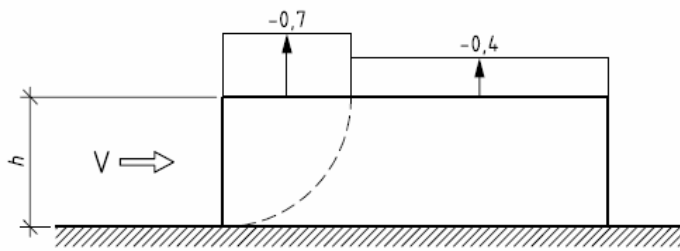
Permanente belastingen

De permanente belasting bestaat uit het eigen gewicht van de dakconstructie (inclusief liggers en gordingen). Er zal voor het toepassingsgebied gekeken worden naar veel toegepaste materialen voor de afwerking van het dak bij industriehallen. De installaties die aan het dak hangen dienen meegenomen te worden in de permanente belastingen.

Veranderlijke belastingen

De veranderlijke belastingen voor industriehallen in Nederland bestaat uit sneeuwbelasting, windbelasting en een verdeelde belasting door aanwezigheid van personen. Omdat de verdeelde belasting beperkt is tot een oppervlakte van 10m² zal deze voor de dimensionering van de dakliggers, met overspanningen zoals in dit onderzoek, niet van belang zijn.

Een vaak voorkomende dakvorm voor industriehallen is een plat dak. Hierna zal ingegaan worden op wind- en sneeuwbelastingen op platte daken. In figuur 2 worden de windvormfactoren gegeven voor een plat dak conform NEN 6702 [5].



Figuur 2 Windvormfactoren van toepassing op een plat dak volgens NEN 6702 [5]

Omdat de belastingsrichting van wind op het dak (windzuiging) tegengesteld is aan de belastingsrichting van het eigen gewicht, zal gekeken moeten worden welke belasting maatgevend is. Tevens dient er rekening gehouden te worden met overdruk in het gebouw.

De sneeuwvormfactor voor platte daken is 0,80. Er kan gereduceerd worden indien het gebouw op een open terrein staat. Hier wordt in dit onderzoek niet van uitgegaan.

Verderop in dit verslag wordt ingegaan op enkele getalwaarden van belastingen die gebruikelijk zijn voor industriehallen.

2.1.2. Mechanische response

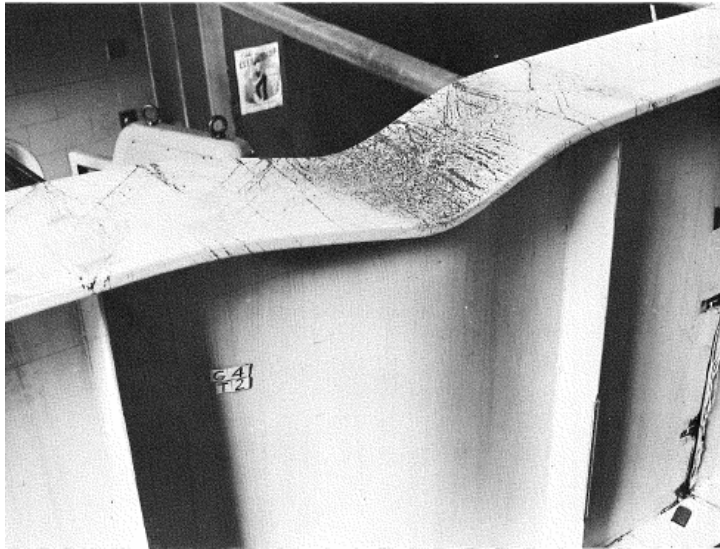
Het is waarschijnlijk dat lijven van stalen plaatliggers met een zeer hoge slankheid worden geclassificeerd als doorsnedeklasse 4 profielen. De sterkte van doorsnedeklasse 4 profielen dient te worden gereduceerd vanwege de mogelijkheid tot het optreden van (lokale en globale) instabiliteit van de ligger. Een manier om de lokale stabiliteit van een ligger te verbeteren is het plaatsen van verstijvingschotten. In dit onderzoek zal de stabiliteit gewaarborgd worden, zonder het plaatsen van schotten.

Voor het rekenkundig bepalen van de reductie van de sterkte van de ligger kan gekozen worden voor de spanningsreductie methode of de doorsnedereductie methode [6]. Bij de spanningsreductie methode wordt de kritieke plooispanning bepaald van de doorsnede. Bij de doorsnedereductie methode wordt de doorsnede van de ligger waarover de krachten worden verdeeld rekenkundig gereduceerd.

Tevens wordt in EN 1993-1-5 [1] de lijfslankheid van stalen plaatliggers beperkt. De beperking voor de lijfslankheid is ingevoerd omdat is gebleken dat er lokale stabiliteitsproblemen kunnen optreden bij liggers met een hoge lijfslankheid.

De formule in de EN 1993-1-5 [1] (zoals weergegeven in de inleiding) voor de maximale lijfslankheid is bepaald aan de hand van één laboratoriumtest van Basler [3]. Bij de test van Basler zijn verstijvingschotten toegepast. Echter, vanwege het ontbreken van aanvullende criteria bij het toepassen van de formule voor de maximale lijfslankheid, wordt deze formule ook toegepast voor stalen plaatliggers zonder verstijvingschotten. De stalen plaatligger die is gebruikt in de test van Basler is bezweken door “flange induced buckling”. Na het plooiën van

het lijf is de flens over de zwakke as uitgeknikt in het lijf, ofwel verticaal knikken van de flens in het lijf ten gevolge van de kromming van de ligger. De uiteindelijke vorm van de ligger na het verticaal knikken van de flens is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 Knik van de gedrukte flens door plooï van het lijf [3]

Uit recent uitgevoerd onderzoek is echter gebleken dat de gedrukte flens niet altijd hoeft uit te knikken, maar ook kan roteren.

2.2. Constructief ontwerp bij brand

De ontwerper van een constructie dient aan te tonen dat de constructie voldoende weerstand bezit tegen de in de gebruiksfase optredende omstandigheden. Eén van deze omstandigheden is brand. In de normen worden rekenmethodes aangereikt waarmee de ontwerper door middel van analytische methodes kan aantonen hoe lang een constructie weerstand biedt aan een brand volgens een aangenomen brandverloop.

Tijdens een brand wordt een constructie blootgesteld aan een thermische belasting en aan mechanische belastingen (wind + eigen gewicht). De thermische en mechanische belastingen tijdens een brand worden beschreven in EN 1991-1-2 [7]. De thermische en mechanische respons van staalconstructies worden beschreven in EN 1993-1-2 [4].

Hierna zal ingegaan worden op de ontwerpstappen die de ontwerper dient te volgen om aan te tonen hoelang een constructie weerstand kan bieden aan een brand.

1. Brand scenario

Er zal door middel van een model het temperatuursverloop tijdens brand worden bepaald. Het model dat opgesteld wordt is afhankelijk van de te verwachten brand.

2. Thermische berekening

Aan de hand van de vrijgekomen energie van een brand kan de omgevingstemperatuur worden vastgesteld, en daarmee de temperatuur van het staal. De snelheid van de opwarming van het staal is, behalve van de brand, ook afhankelijk van de geometrie van het staalprofiel. Bij beklede staalprofielen is tevens de isolatie van belang voor de opwarming van het staal. Hierbij speelt de grootte van het aangestraalde oppervlak ten opzichte van het volume een belangrijke rol, uitgedrukt in de profielfactor (A_m/V) in m^{-1} .

3. Mechanische berekening

Afhankelijk van de benuttinggraad kan de kritieke staaltemperatuur worden bepaald. De benuttinggraad is de ratio van de tijdens brand heersende mechanische belastingen en de weerstand van het profiel tijdens normale temperatuur. Voor constructie-elementen gekwalificeerd als doorsnedeklasse 4 is een kritieke staaltemperatuur van 350 °C [4] vastgesteld, rekening houdend met lokale instabiliteitsproblemen die op kunnen treden. Wanneer de staaltemperatuur tijdens een brand de zogenaamde kritieke staaltemperatuur overschrijdt zal de constructie rekenkundig bezwijken.

De uiteindelijke toetsing in de mechanische berekening kan worden uitgevoerd in het tijd- of in het sterktedomein. Indien er een uniforme temperatuursverdeling in de ligger optreedt kunnen de berekeningen ook in het temperatuurdomein worden uitgevoerd. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een uniforme temperatuursverdeling, en zal de berekening worden uitgevoerd in het temperatuurdomein.

Tijd: In geval van “tijd” betekent dit dat de rekenwaarde van de brandwerendheid groter moet zijn dan de vereiste brandwerendheid.

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

waarin:

$t_{fi,d}$ = de rekenwaarde van de brandwerendheid;

$t_{fi,requ}$ = de vereiste brandwerendheid.

Temperatuur: In geval van “temperatuur” betekent dit dat de rekenwaarde van de staaltemperatuur lager moet zijn dan de rekenwaarde van de kritieke staaltemperatuur.

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}$$

waarin:

θ_d = de rekenwaarde van de staaltemperatuur;

$\theta_{cr,d}$ = de rekenwaarde van de kritieke staaltemperatuur.

Sterkte: In geval van “sterkte” betekent dit dat de rekenwaarde van de weerstand van het element bij brand op tijdstip t groter moet zijn dan de rekenwaarde van het belastingseffect van toepassing in de brandsituatie op tijdstip t .

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

waarin:

$R_{fi,d,t}$ = rekenwaarde van de weerstand van het element bij brand op tijdstip t ;

$E_{fi,d,t}$ = rekenwaarde van het belastingseffect van toepassing in de brandsituatie op tijdstip t .

Hierna zullen de belastingen en de response - zowel thermisch als mechanisch - behandeld worden.

2.2.1. Thermische belastingen

De weerstand tegen brand kan aangetoond worden door de constructie rekenkundig aan een ontwerpbrand bloot te stellen. Indien de berekende staaltemperatuur gedurende de voorgeschreven brandduur onder de kritieke staaltemperatuur blijft, is de constructie voldoende brandwerend. Om de staaltemperatuur in de loop van de tijd te kunnen bepalen dient de omgevingstemperatuur bekend te zijn tijdens de brand. Er zijn verschillende modellen voorhanden om deze omgevingstemperatuur te beschrijven [8]. Dit kan aan de hand van een nominale brandkromme of de modellering van een natuurlijke brand.

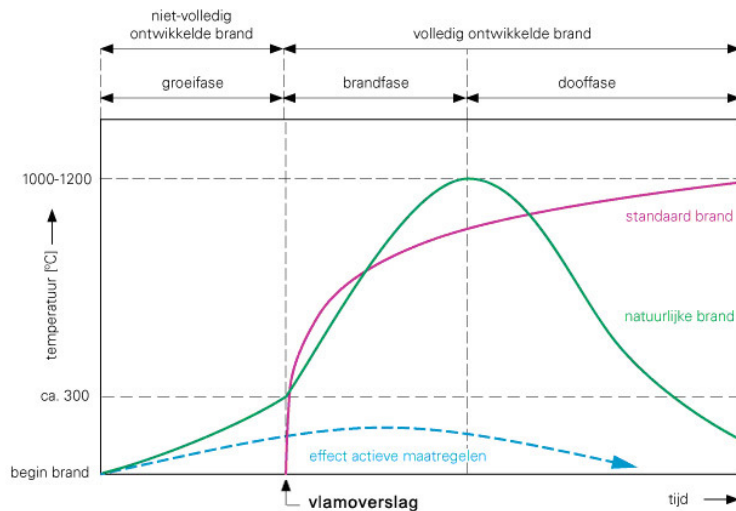
Een nominale brandkromme is een conventionele kromme als weergave van een volledig ontwikkelde brand in een compartiment. Voor brand in gebouwen wordt veelal uitgegaan van de zogenaamde “standaard-brandkromme”. Een natuurlijke brand is een meer realistisch gemodelleerde brand uitgaande van de werkelijke omstandigheden in het brandcompartiment zoals ventilatie, ruimtelijke dimensies en de aard en hoeveelheid van de aanwezige brandbare materialen.

Aan de hand van de standaard-brandkromme kan een aanvrager van een bouwvergunning aantonen dat het gebouw voldoet aan de eisen met betrekking tot de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie die gesteld worden vanuit het Bouwbesluit. Uit oogpunt van gelijkwaardigheid biedt het Bouwbesluit [2] de ruimte om, door middel van het toepassen van het natuurlijk brandconcept, aan te tonen dat de constructie voldoende tijd weerstand biedt om de aanwezige mensen te laten vluchten en de brandweer het gebouw te laten doorzoeken. Hierbij wordt, voor een specifieke situatie, een realistischer brand gemodelleerd.

Bij wijzigingen van bepaalde uitgangspunten dient opnieuw een bouwvergunning aangevraagd te worden. Hierbij zal gekeken moeten worden of de gewijzigde uitgangspunten nog leiden tot voldoende brandveiligheid in de nieuwe situatie. Een voorbeeld kan zijn het wijzigen van de functie van een gebouw.

Een natuurlijke brand start bij ontsteking van de brand, terwijl de standaard-brandkromme start vanaf het moment van vlamoverslag. In figuur 4 is de standaard-brandkromme vergeleken met een voorbeeld van een natuurlijke brand. Het moment van ontsteken is aangegeven met "begin brand". De standaardbrand start op het moment van vlamoverslag. Vlamoverslag is het plotseling geheel in brand raken van een ruimte tijdens de

ontwikkeling van een brand in die ruimte. In figuur 4 is de fase voor vlamoverslag aangegeven met “niet-volledig ontwikkelde brand”. Tevens wordt in de grafiek het effect van het toepassen van actieve maatregelen (zoals sprinklers) op het brandscenario weergegeven. Hier wordt in dit onderzoek niet verder op ingegaan.



Figuur 4 Standaard-brandkromme v.s. natuurlijke brand

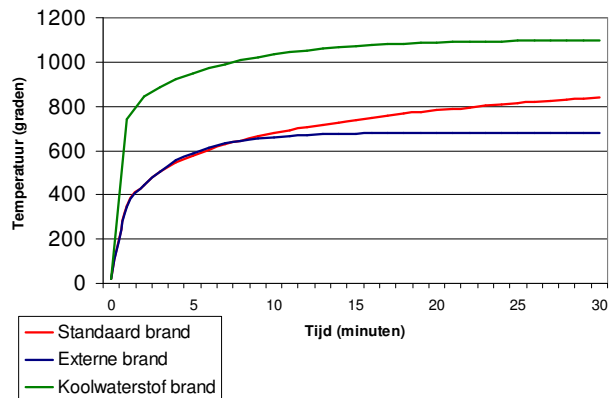
Nominale brandkromme

Een nominale brandkromme geeft de brandtemperatuur weer als functie van de tijd. De nominale brandkrommen zoals gegeven in EN 1991-1-2 [7] zijn de standaard-, externe- en de koolwaterstof-brandkromme.

Bij gebruik van een nominale brandkromme worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. De brand dooft niet;
2. De brand is aanwezig in het hele compartiment, ongeacht de werkelijke afmetingen van het compartiment;
3. De ontwikkeling van de brand is niet afhankelijk van ventilatie condities of hoeveelheid en aard van de brandbare materialen.

De nominale brandkrommen zijn weergegeven in figuur 5.



Figuur 5 Nominale brandkrommen

Nominale brandkromme 1: standaard-brandkromme

De meest gebruikte nominale brandkromme is de standaard-brandkromme (ISO 834 kromme). De omgevingstemperatuur tijdens een brand verlopend volgens de standaard-brandkromme wordt gegeven door de volgende formule [7]:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1)$$

Nominale brandkromme 2: kromme voor externe brand

De kromme voor een externe brand kan gebruikt worden voor het toetsen van wanden blootgesteld aan een brand van buiten.

Nominale brandkromme 3: koolwaterstof-brandkromme

Voor vloeibare brandstoffen is de standaard-brandkromme te conservatief. De temperatuur van een koolwaterstofbrand loopt op tot ongeveer 1100 °C.

De kromme voor externe branden en de koolwaterstof-brandkromme worden niet beschouwd in dit onderzoek. In de berekeningen waarbij niet uitgegaan wordt van een natuurlijke brand wordt de standaard-brandkromme gebruikt om de temperatuur te simuleren.

Natuurlijke brandmodellen

Bij een natuurlijke brand wordt een model gebruikt waarbij de rekenkundige brand wordt gerelateerd aan de werkelijke omstandigheden. Bij een natuurlijke brand wordt de werkelijkheid nauwkeuriger benaderd dan bij de standaardbrand. Doordat de brandparameters van het compartiment niet worden verrekend in de standaardbrand, is het voor elk ontwerp onzeker of de standaardbrand een veilige of onveilige benadering is. De natuurlijke brand heeft deze onzekerheid minder, omdat de brandkromme kenmerkend is voor de beschouwde situatie.

Een natuurlijke brand is realistischer en kan in sommige gevallen leiden tot minder benodigd staal om aan de vereiste brandwerendheid te voldoen. Natuurlijke brandmodellen vergen echter wel meer kennis en tijd om uit te werken.

Een natuurlijke brand leidt overigens niet altijd tot een grotere brandwerendheid dan bij toepassing van de standaardbrand. Doordat de gastemperaturen bij een natuurlijke brand soms tijdelijk hoger zijn dan bij de standaardbrand, kan met name bij snel opwarmende constructies een overschatting van de brandveiligheid optreden [9].

Berekening van de thermische belasting

De thermische belasting op het staaloppervlak wordt uitgedrukt in de netto warmtestroomdichtheid ($\dot{h}_{net}$). Dit wordt veroorzaakt door de warmteoverdracht als gevolg van convectie ($\dot{h}_{net,c}$) en straling ($\dot{h}_{net,r}$).

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

waarin:

$\dot{h}_{net}$ = totale netto warmtestroomdichtheid [W/m²];

$\dot{h}_{net,c}$ = warmteoverdracht als gevolg van convectie [W/m²];

$\dot{h}_{net,r}$ = warmteoverdracht als gevolg van straling [W/m²].

1. Convectie

De netto warmtestroomdichtheid door convectie ($\dot{h}_{net,c}$) wordt gegeven door de volgende formule:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m)$$

waarin:

α_c = warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie [W/m²K];

θ_g = gastemperatuur bij het element blootgesteld aan brand [°C];

θ_m = oppervlaktetemperatuur van het element [°C].

Indien de standaard-brandkromme of de kromme voor externe brand wordt gebruikt, mag voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie 25 W/m²K worden aangehouden. Bij het gebruik van de koolwaterstof-brandkromme is de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie 50 W/m²K. Bij geavanceerde brandmodellen behoort, conform de EN1991-1-2 [7], de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie 35 W/m²K te zijn, tenzij specifiekere gegevens beschikbaar zijn.

2. Straling

De nettowarmtestroomdichtheid door straling ($\dot{h}_{net,r}$) wordt bepaald volgens:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

waarin:

- Φ = zichtfactor;
- ϵ_m = emissiecoëfficiënt van het oppervlak van het element;
- ϵ_f = emissiecoëfficiënt van de brand (= 1);
- σ = constante van Stephan Boltzmann ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- θ_r = effectieve stralingstemperatuur van de omgeving van de brand [$^{\circ}\text{C}$];
- θ_m = oppervlaktetemperatuur van het element [$^{\circ}\text{C}$].

Uitgangspunten bij dit onderzoek

Zichtfactor

De zichtfactor is een maat voor het deel van de totale stralingswarmte dat vanaf een bepaald stralend oppervlak op een bepaald ontvangend oppervlak bereikt. De waarde is afhankelijk van de grootte van het stralend oppervlak, de afstand tussen het stralend en het ontvangend oppervlak en de hoek tussen deze oppervlakken. Indien geen specifieke waarde wordt gegeven dient voor de zichtfactor 1,0 te worden aangenomen (veilige aanname).

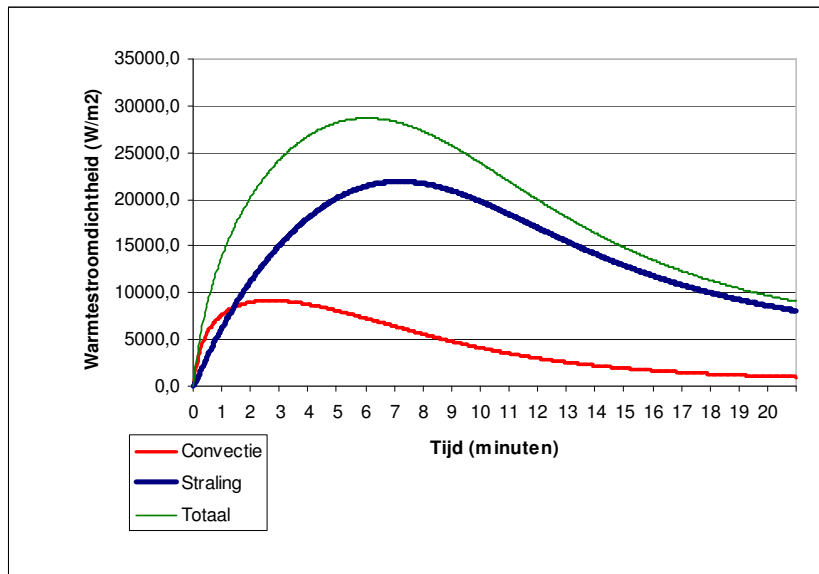
Stralingstemperatuur

In de praktijk wordt, bij wijze van conservatieve schatting, de stralingstemperatuur (θ_r) gelijk gesteld aan de omgevingstemperatuur (θ_g), ofwel de brandtemperatuur.

Emissiecoëfficiënt oppervlak

Gladde, sterk glimmende oppervlakken hebben een lage emissiecoëfficiënt. Door vervuiling en corrosie kan deze waarde oplopen. In de EN1993-1-2 [4] wordt een waarde gegeven voor de emissiecoëfficiënt (ϵ_m). Voor koolstofstaal is deze gelijk aan 0,7.

In figuur 6 wordt de warmtestroomdichtheid weergegeven van een IPE 500 profiel (aangestraald aan 4 zijden). Het bijbehorende temperatuursverloop behoort bij de standaard-brandkromme. In de grafiek wordt de bijdrage door de straling en convectie afzonderlijk weergegeven. Uit de grafiek is af te lezen dat door verhoging van de staaltemperatuur de warmtestroomdichtheid in verloop van tijd zal afnemen. Dit komt omdat het verschil tussen de gastemperatuur (θ_g) en de oppervlaktetemperatuur van het element (θ_m) in verloop van tijd kleiner wordt.



Figuur 6 Warmtestroomdichtheid IPE 500 onderworpen aan een brand volgens de standaard-brandkromme

2.2.2. Thermische response

De thermische response van de stalen ligger is afhankelijk van de afscherming door materialen tussen het profiel en de brandhaard. In dit hoofdstuk worden de rekenmethodes behandeld van een onbekleed profiel, een staalprofiel bekleed met brandwerend materiaal en een staalprofiel beschermd door een hittescherm.

Berekening van de thermische response van een onbekleed profiel

Voor de berekening van de thermische response van een onbekleed profiel wordt er vanuit gegaan dat de temperatuursverdeling uniform is. De berekeningsmethode wordt beschreven in EN 1993-1-2 [4] par. 4.2.5.1. Voor de bepaling van de netto warmtestroomdichtheid wordt verwezen naar het vorige hoofdstuk. Bij de bepaling van de thermische response van een staalprofiel mag rekening gehouden worden met afscherming van de warmtestraling naar de profieldelen door de flenzen. Dit wordt in rekening gebracht door een correctiefactor voor het schaduw effect (k_{sh}).

De temperatuursverandering van het staalprofiel volgt uit:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

waarin:

k_{sh} = correctiefactor voor het schaduw effect;

A_m/V = profielfactor voor onbeklede elementen van staal [1/m];

A_m = oppervlakte van het element per eenheid van lengte [m²/m];

V = volume van het element per eenheid van lengte [m³/m];

c_a = soortelijke warmte van staal [J/kg K];

$\dot{h}_{net}$ = rekenwaarde van de netto warmtestroomdichtheid per eenheid van oppervlakte [W/m^2];

Δt = tijdsinterval [seconden];

p_a = de volumieke massa van staal [kg/m^3].

Uitgangspunten in dit onderzoek

Volumieke massa

De volumieke massa van staal is $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Schaduwefect

De correctiefactor voor het schaduwefect (k_{sh}) voor I-profielen blootgesteld aan een nominale brand mag worden bepaald volgens:

$$k_{sh} = 0,9 \cdot \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V}$$

waarin $[A_m/V]_b$ de verhouding tussen het oppervlak van een denkbeeldig contour die het staalement omvat (waarlangs warmte wordt toegevoerd) en het staalvolume is.

In alle andere gevallen dient de correctiefactor voor het schaduwefect (k_{sh}) te worden bepaald volgens:

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V}$$

Soortelijke warmte van staal (c_a)

De soortelijke warmte van staal (c_a) is afhankelijk van de staaltemperatuur (θ_a). De soortelijke warmte beschrijft de warmte energie benodigd om 1 kg materiaal 1 K te verwarmen.

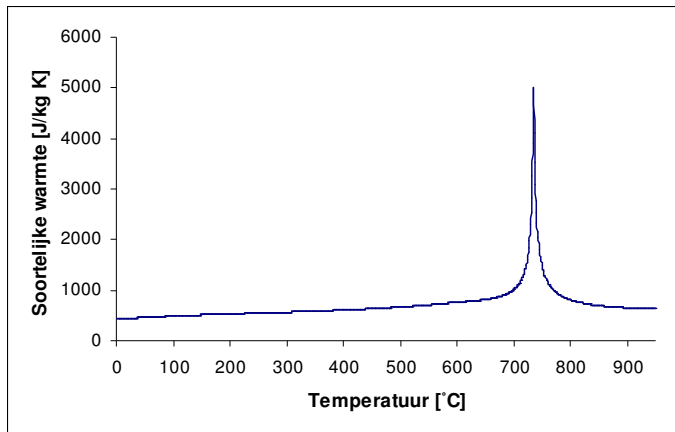
$$20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C} \rightarrow c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$$

$$600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C} \rightarrow c_a = 666 + (13002 / (738 - \theta_a))$$

$$735^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 900^\circ\text{C} \rightarrow c_a = 545 + (17820 / (\theta_a - 731))$$

$$900^\circ\text{C} \leq \theta_a \rightarrow c_a = 650$$

In figuur 7 is een grafiek weergegeven van de soortelijke warmte van staal afhankelijk van de temperatuur. Bij 735°C treden er veranderingen op in de kristalstructuur van staal, waardoor een piek te zien is in de grafiek. De soortelijke warmte is bij deze temperatuur extreem hoog.



Figuur 7 Soortelijke warmte van staal, afhankelijk van de staaltemperatuur

Profielfactor

De profielfactor P is de aan verhitte blootgestelde oppervlakte A_m , in m^2 per m lengte, gedeeld door het volume van het staalprofiel V , in m^3 per m lengte. Dit is gelijk aan de aan verhitte blootgestelde omtrek, gedeeld door de doorsnede van het staalprofiel in m^2 . De eenheid van A_m/V is m^{-1} .

Een hoge profielfactor betekent dat het staal sneller opwarmt, en dus ook sneller de kritieke temperatuur zal bereiken.

Thermische response van een staalprofiel bekleed met een brandwerend materiaal

Indien het staaloppervlak is bekleed met een brandwerend materiaal wordt de opwarming van het staal vertraagd.

De toename in staaltemperatuur ($\theta_{a,t}$) per eenheid van tijd (Δt) wordt bepaald volgens de volgende formule:

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left(e^{\frac{1}{10}\phi} - 1 \right) \cdot \Delta \theta_{g,t}$$

met:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

waarin:

A_p = het oppervlakte van het brandwerende bekledingsmateriaal waarlangs warmte wordt (getracht te worden) toegevoerd per eenheid van lengte van het element [m^2/m];

c_p = soortelijke warmte van het brandwerende bekledingsmateriaal, onafhankelijk van de temperatuur [J/kgK];

d_p = dikte van het brandwerende bekledingsmateriaal [m];

λ_p = warmtegeleidingcoëfficiënt van het brandwerende systeem [W/mK];

ρ_p = volumieke massa van het brandwerende bekledingsmateriaal [kg/m^3].

voor de ontbrekende symbolen wordt verwezen naar de formule voor een onbekleed profiel op pagina 24.

Uitgangspunten in dit onderzoek

Specifieke warmte bekledingsmateriaal

Als de temperatuursonafhankelijke soortelijke warmte van het bekledingsmateriaal wordt verwaarloosd kan de formule worden vereenvoudigd tot:

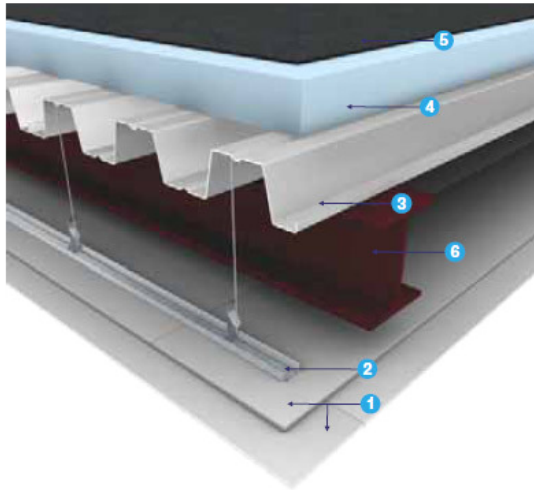
$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \cdot (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \cdot \Delta t$$

Thermische respons van staal beschermd door een hittescherm

Indien het staal wordt beschermd door een hittescherm wordt de thermische response van het staalprofiel bepaald conform EN 1993-1-2 [4] par. 4.2.5.3. Hierin staat vermeld dat de temperatuursontwikkeling in de afgesloten ruimte waarin de constructie-elementen zich bevinden behoort te zijn bepaald conform een bepalingmethode (ENV 13381 – 1 / 2), uitgaande van de standaard-brandkromme. Voor de bepaling van de temperatuursontwikkeling in het staalprofiel kan worden uitgegaan van de hiervoor behandelde methode voor onbekleed staal, waarbij voor de omgevingstemperatuur de temperatuur van de afgesloten ruimte wordt aangenomen.

Een voorbeeld van een hittescherm is een verlaagd plafond onder de constructie. Het plafond bestaat uit een brandwerende isolatielaag (bijvoorbeeld calciumsilicaatplaten). Indien in de ruimte onder het plafond de

standaardbrand wordt aangenomen, zal in de afgesloten ruimte boven het plafond een gereduceerde temperatuursontwikkeling plaatsvinden, e.e.a. afhankelijk van de mate van afscherming door het plafond. In figuur 8 is een voorbeeld te zien van een plafond met brandwerende plafondplaten.



Figuur 8 Bescherming van het staal door het aanbrengen van een brandwerend plafond [10]

In figuur 8 worden de volgende onderdelen met nummers aangegeven:

1. Brandwerende plafondplaten, bevestigd met zelftappende schroeven (3 rijen per plaatbreedte);
2. Stalen ophangstelsel;
3. Staaldak;
4. Isolatie;
5. Dakbedekking;
6. Staalconstructie.

2.2.3. Mechanische belastingen

De mechanische belastingen die optreden tijdens een brand kunnen worden verdeeld in directe en indirecte belastingen. De belastingcombinatie waarmee gerekend dient te worden tijdens een brand is gegeven in NEN 6702 [5]. Hierin staat aangegeven dat met de representatieve waarde van het eigen gewicht samen met 20% van de extreme (representatieve) waarde van de windbelasting moet worden gerekend.

Naast de hierboven genoemde directe belastingen moet in beginsel rekening gehouden worden met indirecte mechanische belastingen. De indirecte mechanische belastingen worden veroorzaakt door verhinderde thermische uitzetting in de elementen. Als (tijdens een brand) de oplegging van de dakligger niet verplaatsbaar is in horizontale richting, zijn er extra spanningen in de constructie te verwachten door verhinderde thermische uitzetting van de ligger. Aangenomen wordt dat de dakligger in industriehallen ter plaatse van de aansluiting bij de kolommen zodanig kan verplaatsen, dat er geen extra mechanische belastingen door verhinderde thermische uitzetting in de ligger verwacht worden.

2.2.4. Mechanische response

Om de mechanische response van de constructie te berekenen zijn de mechanische eigenschappen van staal bij verhoogde temperatuur nodig. De belangrijkste zijn de sterkte (gerepresenteerd door de vloeigrens, $f_{y,\theta}$) en de stijfheid (gerepresenteerd door de elasticiteitsmodulus, $E_{a,\theta}$).

In tabellen uit de EN 1993-1-2 [4] is kwantitatief aangegeven hoeveel de elasticiteitsmodulus en de vloeigrens van staal reduceren bij een bepaalde temperatuur. De stalen ligger zal rekenkundig bezwijken indien de staaltemperatuur gelijk is aan de kritieke staaltemperatuur. De kritieke staaltemperatuur wordt bepaald aan de hand van de benuttinggraad.

De benuttinggraad is de ratio van de tijdens brand heersende mechanische belastingen en de weerstand van het profiel tijdens normale temperatuur.

De benuttinggraad kan worden bepaald volgens:

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

waarin:

$E_{fi,d}$ belastingen tijdens brand;

$R_{fi,d,0}$ weerstand bij 20 °C (t=0).

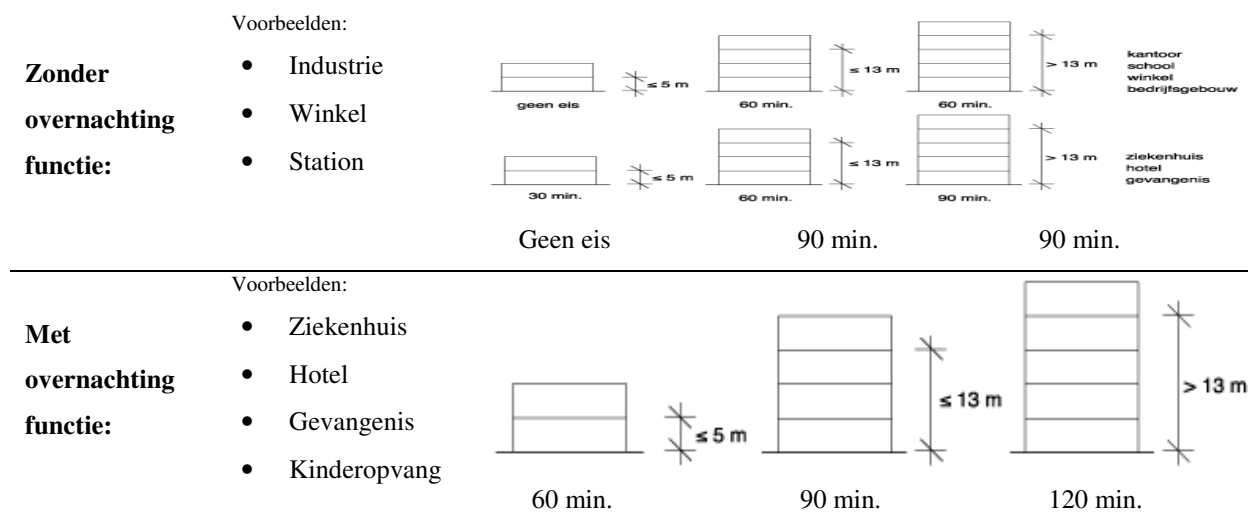
Bij een staaltemperatuur van 500 °C zal de vloeigrens van staal reduceren. De elasticiteitsmodulus zal echter al vanaf 200 °C reduceren. Bij het verliezen van de stijfheid is het mogelijk dat er stabiliteitsproblemen optreden. Door deze stabiliteitsproblemen kan het profiel bij een relatief lage temperatuur bezwijken.

2.2.5. Eisen Bouwbesluit

Brandwerendheid kan worden gedefinieerd als de tijd gedurende welke een constructie, een gedeelte of een element daarvan het vermogen bezit om de vereiste functies (dragend en/of scheidend) te vervullen bij een bepaald belastingsniveau en een bepaalde blootstelling aan brand. Hierna wordt ingegaan op de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie (dragende functie). De standaard-brandwerendheid is de brandwerendheid bepaald ten gevolge van een thermische belasting volgens de standaard-brandkromme.

In het Bouwbesluit [2] staan in afdeling 2.2 (sterkte bij brand) eisen gespecificeerd aan de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie in nieuwe gebouwen. De eisen zijn bedoeld om gebruikers in de gelegenheid te stellen bij brand het gebouw veilig te verlaten, en de brandweerlieden de tijd te geven om het gebouw te kunnen onderzoeken. Daartoe moet de draagconstructie een bepaalde tijd voldoende weerstand bieden aan de opgelegde belastingen (thermisch en mechanisch) om instorting te voorkomen. De benodigde brandwerendheid (in minuten) is afhankelijk van de gebouwfunctie en de hoogte van de vloer van het hoogst gelegen verblijfsgebied.

De eisen zijn opgedeeld in gebouwen met overnachtingfunctie en gebouwen zonder overnachtingfunctie. In figuur 9 zijn de verschillende eisen weergegeven voor niet tot bewoning bestemde gebouwen. Tevens zijn enkele voorbeelden van de gebouwfunctie die daaronder valt aangegeven.



Figuur 9 Eisen Bouwbesluit aan de hoofddraagconstructie voor nieuw te bouwen (niet tot bewoning bestemde) gebouwen ²

Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor constructiedelen waarbij bezwijken leidt tot het onbruikbaar worden van een rookvrije vluchtroute een minimale brandwerendheid van 30 minuten geldt. Tevens dient, in sommige gevallen, de constructie die een brandwerende scheiding in stand houdt een brandwerendheid te bezitten. Bij gebouwen met een lage permanente vuurbelasting (niet groter dan 500 MJ/m^2) kan de eis aan de hoofddraagconstructie worden bekort met 30 minuten.

Uit het overzicht blijkt dat voor industriehallen, waarbij de vloer van het hoogst gelegen verblijfsgebied lager ligt dan 5 meter boven meetniveau, vanuit het Bouwbesluit geen expliciete eis m.b.t. de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie geldt. De minimale brandwerendheid wordt niet expliciet aangeduid, omdat er wordt verwacht dat de brandwerendheid van dergelijke constructies voldoende is zodat de gebruikers voldoende tijd hebben om het gebouw te ontvluchten. Dit is in de meeste gevallen ook het geval, een warmgewalst profiel heeft namelijk een eigen brandwerendheid van ongeveer 10-15 minuten.

² De hoogte geeft het hoogst gelegen verblijfsgebied aan.

3. Industriebouwen

Dit onderzoek richt zich op stalen plaatliggers die worden geplaatst in industriebouwen. Hierna zal worden ingegaan op deze bouwfunctie. Daarnaast zullen mogelijke vormen van afwerking van gevels / dak worden behandeld, die in de praktijk gebruikelijk zijn voor industrie functies. Om een beeld te geven van het toepassingsgebied van stalen plaatliggers wordt een fictieve hal met een stalen draagconstructie berekend. Het gekozen profiel wordt vergeleken met een raatligger en vakwerkligger. In hoofdstuk 4 zal ingegaan worden op brandscenario's in industriebouwen.

3.1. Bouwfunctie

Stalen plaatliggers zijn geschikt voor de dakconstructie van gebouwen met een grote overspanning. Indien de overspanning klein is zal, vanuit economisch oogpunt, een walsprofiel eerder toegepast worden. Voorbeelden van gebouwen met een grote overspanning zijn fabriekshallen, opslagloodsen, overslagstations, luchthaventerminals, scheepsbouwloodsen, stationshallen, tentoonstellingsgebouwen, evenementenhallen en sporthallen [11].

In dit onderzoek wordt de brandveiligheid van stalen plaatliggers onderzocht voor hallen met een industrie functie. In het Bouwbesluit [2] wordt onderscheid gemaakt tussen een industrie functie en een lichte industrie functie. Onder de bouwfunctie "industrie" wordt verstaan: het bedrijfsmatig bewerken of opslaan van materialen en goederen, of met een agrarische bestemming. Een lichte industrie functie is een industrie functie waarin activiteiten plaatsvinden, waarbij het verblijven van mensen een ondergeschikte rol speelt. Hierna zal alleen ingegaan worden op de gebruiksfunctie "industrie".

Voor het bepalen van de benodigde vluchttijd is het van belang inzicht te hebben in het aantal mensen dat gelijktijdig het pand moet verlaten. Bij gebouwen waarbij het mogelijk is dat er grote groepen mensen samenkomen (stationshallen, evenementenhallen) wordt het vluchten belemmerd door opstoppen bij de vluchtmogelijkheden (bijv. de vluchtdeuren). De bezetting van een gebouw wordt uitgedrukt in de bezettingsgraad. De bezettingsgraad is het aantal m² vloeroppervlakte per persoon. Uit een inventarisatie van grote brandcompartimenten dat is uitgevoerd door PRC Bouwcentrum B.V. [12] blijkt dat industriebouwen doorgaans een zeer lage bezettingsgraad hebben. De bezettingsgraad wordt conform het Bouwbesluit uitgedrukt in 5 klassen. De meeste industriebouwen hebben een bezettingsgraad B5, dat wil zeggen dat er minimaal 20 m² vloeroppervlakte aan verblijfsgebied aanwezig is per persoon. In dit onderzoek wordt uitgegaan van

3.2. Materiaalgebruik vloer/ gevels en dak

Hierna zal ingegaan worden op het kenmerkende materiaalgebruik in industriebouwen. De vloer en gevelafwerking zullen worden behandeld voor het bepalen van de vuurbelasting in het gebouw. De vuurbelasting is de hoeveelheid warmte die vrijkomt per eenheid vloeroppervlakte bij volledige verbranding van alle in een ruimte/ gebouw aanwezige brandbare materialen. De dakafwerking is naast de vuurbelasting van belang voor de bijdrage aan de stabiliteit van de dakligger.

Vloer

Begane grond vloeren in industriehallen worden uitgevoerd als betonvloeren. Indien mogelijk wordt de vloer op zand gestort. Een houten vloer als begane grond vloer is niet gangbaar. In een klein gedeelte van een industriehal kan een verdiepingsvloer ten behoeve van opslag of kantoorruimte worden geplaatst. Hier is een houten balklaag mogelijk.

Gevels

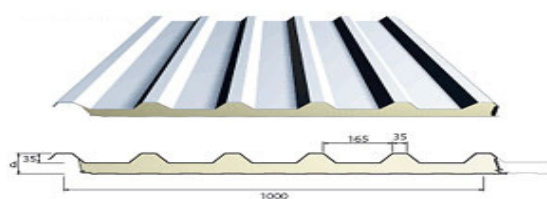
De gevelafwerking is mogelijk in de volgende vormen:

- metselwerk / beton (tevens toegepast als borstwering);
- staal;
 - profielplaten op binnendozen (eventueel gevuld met minerale wolisolatie);
 - sandwichpanelen (platen met PUR / PIR of minerale wol isolatie).
- houten regelwerk (eventueel met isolatie) en een houten afwerking.

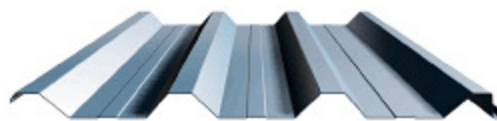
Voor de binnenwanden in industriehallen is het mogelijk dezelfde materialen te gebruiken. Kozijnen voor openingen zijn van kunststof, aluminium of hout.

Dak

De dakafwerking van industriehallen kenmerkt zich door het gebruik van materialen met een relatief laag eigen gewicht. Het dak kan afhankelijk van de vereiste thermische isolatie bedekt worden met sandwichpanelen of staalplaten. In figuur 10 zijn de verschillende platen weergegeven. Sandwichpanelen zijn opgebouwd uit een staalplaat met isolatie daarboven. Als afwerking aan de bovenkant zit een geprofileerde staalplaat. De dikte is (afhankelijk van de isolatie) 65-115 mm. Indien geen isolatie is gewenst, of indien de isolatie apart geplaatst wordt, kunnen stalen trapeziumvormige golfplaten op het dak worden gelegd. Hier bovenop wordt isolatie (met een harde persing) en dakbedekking aangebracht.



Sandwichpanelen



Staalplaten/ trapeziumvormige golfplaten

Figuur 10 Dak afwerking

Indien minerale wolisolatie wordt toegepast kan men er vanuit gaan dat er geen bijdrage wordt geleverd aan de vuurbelasting in het gebouw door de isolatie. Bij andere isolatie dan minerale wol hoeft dit niet zonder meer het geval te zijn. Er kan sprake zijn van gassen die vrijkomen bij verhitting van bijvoorbeeld PUR schuim. Indien deze gassen een bepaalde temperatuur krijgen kunnen ze tot ontbranding overgaan.

3.3. Constructie dak

Voor de dakligger van een gebouw met een grote overspanning is een warmgewalst profiel doorgaans niet meer toereikend. De liggerhoogte van warm gewalste profielen is beperkt tot ongeveer een meter hoog. Er zal gezocht moeten worden naar een andere constructievorm, waarbij de liggerhoogte kan toenemen. Mogelijke constructievormen zijn stalen plaatliggers, vakwerkliggers of raatliggers. Plaatliggers en vakwerkliggers kunnen tevens toegepast worden als draagconstructie van bruggen.

Een overzicht van de toepassingsgebieden van de verschillende stalen profielen staat in tabel 1.

Ligger type (staal)	Overspanning	Toepassingsgebied (gebruikelijk)
Koudgewalst	1-8	Gording
Warmgewalst profiel	1-20	Meest gebruikte liggers voor gebouwen. Bruggen met korte overspanning / tussenliggers.
Raatligger	6-40	Dak / vloerliggers gebouwen
Plaatligger	10-60	Bruggen, dakliggers hallen
Vakwerkligger	10-100	Bruggen, dakliggers hallen

Tabel 1 Overzicht van verschillende stalen liggerprofielen

In hoofdstuk 6 van dit verslag zal de brandwerendheid van stalen plaatliggers vergeleken worden met een raatligger en een vakwerkligger.

3.4. Bouwkundige integratie dakliggers

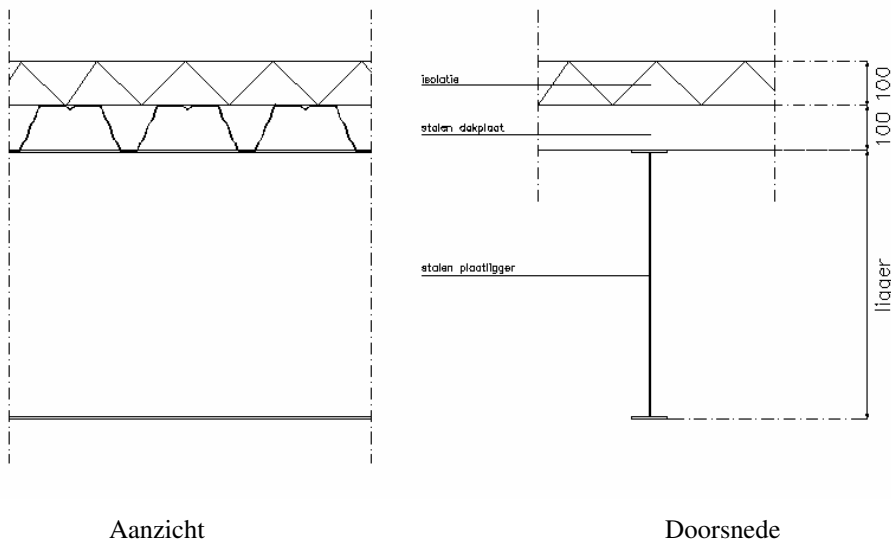
Indien stalen plaatliggers worden toegepast in industriegebouwen worden ze veelal geplaatst in de dakconstructie. Hierna wordt ingegaan op de toepassing van plaatliggers in de dakconstructie. De bouwkundige integratie van de dakliggers heeft invloed op het aan brand blootgestelde oppervlak van het stalen profiel. De positie van de dakbedekking en de eventueel aanwezige gordingen kan de afscherming van de liggers van de brand beïnvloeden.

Tevens heeft de bouwkundige integratie invloed op de eventuele bijdrage van de gordingen aan de stabiliteit van de liggers. Het is mogelijk om de gordingen bovenop de ligger aan te brengen of te bevestigen aan de onderflens.

Hierna zal een overzicht worden gegeven van de verschillende opties van de bouwkundige integratie. Bij elke optie zullen de consequenties worden besproken die de bouwkundige integratie heeft op de profielfactor (A_m/V) van de ligger en de bijdrage van de gordingen aan de stabiliteit van de ligger. Bij de beoordeling van de bijdrage aan stabiliteit van de ligger wordt rekening gehouden met een omlaag (bijv. eigen gewicht) en omhoog (windzuiging) gerichte belasting.

Optie 1:

- Trapeziumvormige stalen dakplaten boven op de ligger, zonder gordingen;
- Stalen dakplaten overspannen van ligger naar ligger.



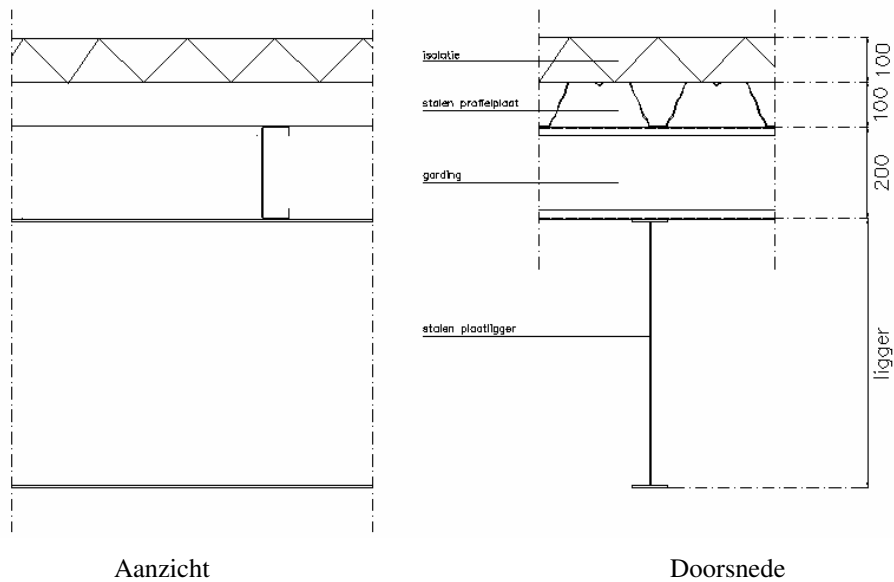
Figuur 11 Optie 1

Profielfactor / stabiliteit

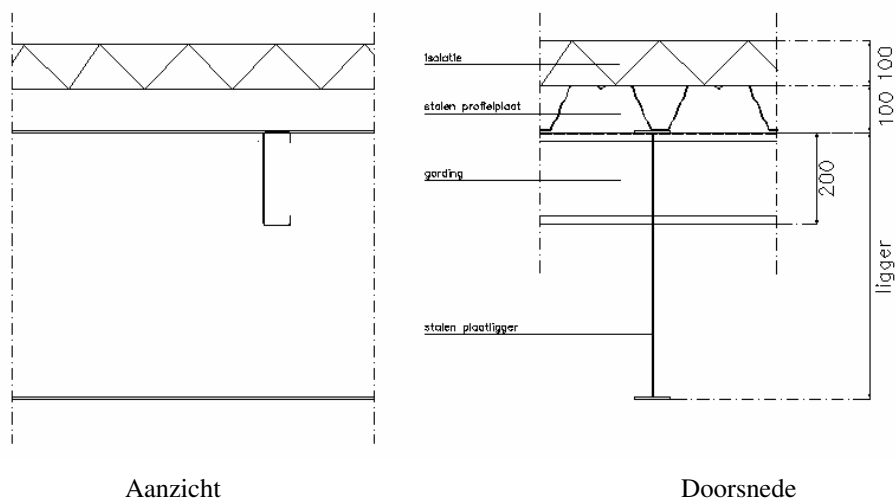
Bij plaatsing van de stalen dakplaten bovenop de ligger is niet te verwachten dat er enige vorm van reductie is op de profielfactor (A_m/V) van de ligger door de stalen dakplaten. De trapeziumvormige dakplaten leveren bij een omlaag gerichte belasting (bijv. eigen gewicht) bijdrage aan de kipstabiliteit van de ligger. Bij een omhoog gerichte belasting (windzuiging) is er geen bijdrage aan de kipstabiliteit van de ligger.

Optie 2 / 3:

- Stalen dakplaten bovenop de ligger, met gordingen;
- Stalen dakplaten hebben dezelfde overspanningrichting als de liggers;
- Gordingen bovenop (optie 2) of tussen (optie 3) de ligger.



Figuur 12 Optie 2



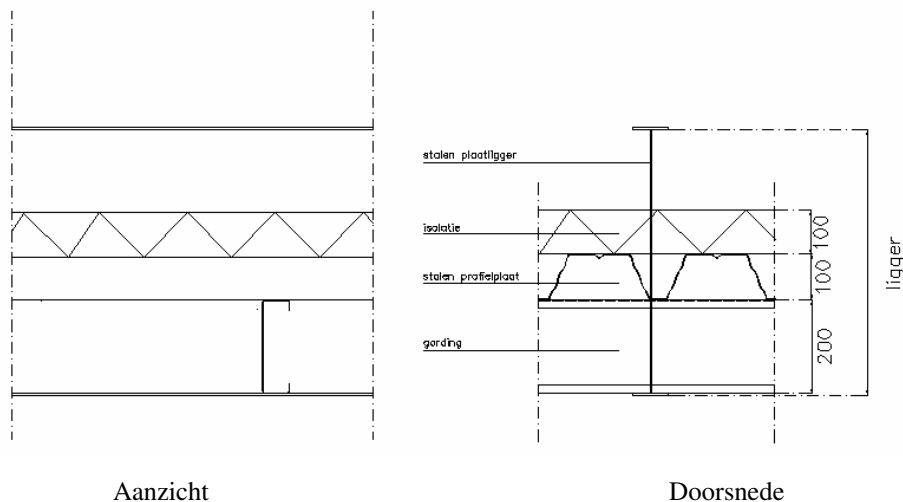
Figuur 13 Optie 3

Profielfactor / stabiliteit

De gording geeft geen bijdrage aan de afscherming van de ligger. De profielfactor (A_m/V) kan hierbij niet gereduceerd worden. Bij een omlaag gerichte belasting (bijv. eigen gewicht) kan de ligger wel enige stabiliteit ontleen aan de gording. De gording dient hierbij wel over voldoende stijfheid / sterkte te bezitten. Bij een omhoog gerichte belasting (windzuiging) is deze bijdrage niet aanwezig.

Optie 4:

- Stalen dakplaten op de onderste flens van de ligger, met gordingen;
- Stalen dakplaten hebben dezelfde overspanningrichting als de liggers.



Figuur 14 Optie 4

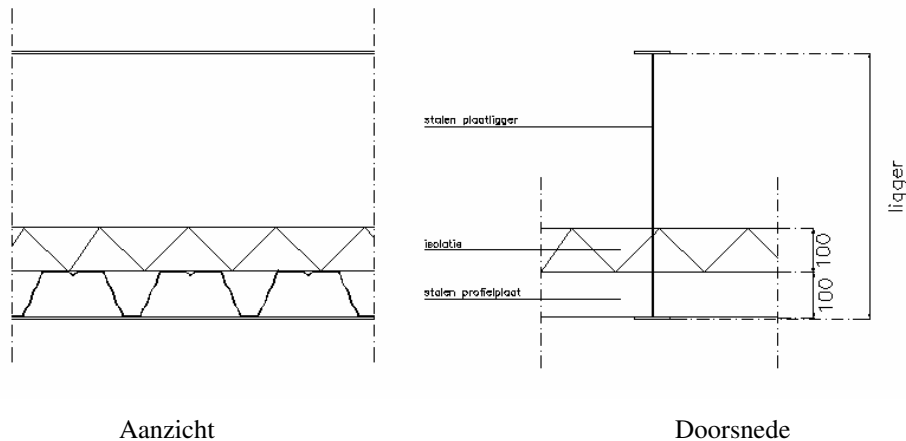
Profielfactor / stabiliteit

Indien isolatie aanwezig is zal het bovenste gedeelte van de ligger beschermd worden tegen een brandaanval aan de onderzijde van het dak. De isolatie dient dan wel voldoende weerstand te bieden tegen de brand. Het is ook mogelijk dat er sandwichpanelen met voldoende brandwerendheid worden geplaatst. De isolatie dient hecht verbonden te blijven met de gordingen tijdens verhitting. Tevens dienen de gordingen over voldoende brandwerendheid te beschikken om de isolatie te ondersteunen.

Bij een omhoog gerichte belasting (windzuiging) geven de gordingen, bij deze wijze van plaatsing, stabiliteit aan de ligger.

Optie 5:

- Stalen dakplaten op de onderste flens van de ligger, zonder gordingen;
- Stalen dakplaten hebben tegenovergestelde overspanningrichting dan de liggers.



Figuur 15 Optie 5

Profielfactor / stabiliteit

De bescherming van het staalprofiel is vergelijkbaar met optie 4. Echter wordt er geen steun gegeven aan de onderflens van de ligger vanwege het ontbreken van gordingen.

3.5. Praktijkvoorbeeld

Om een idee te krijgen van de brandwerendheid van stalen plaatliggers en profielen met ongeveer dezelfde draagcapaciteit is een vergelijking gemaakt tussen een plaatligger, raatligger en vakwerkligger. Om een reële vergelijking te krijgen is een gebouwonwerp gemaakt met verschillende profielen voor de dakliggers. Allereerst is er een berekening gemaakt van de constructie onder normale temperaturomstandigheden.

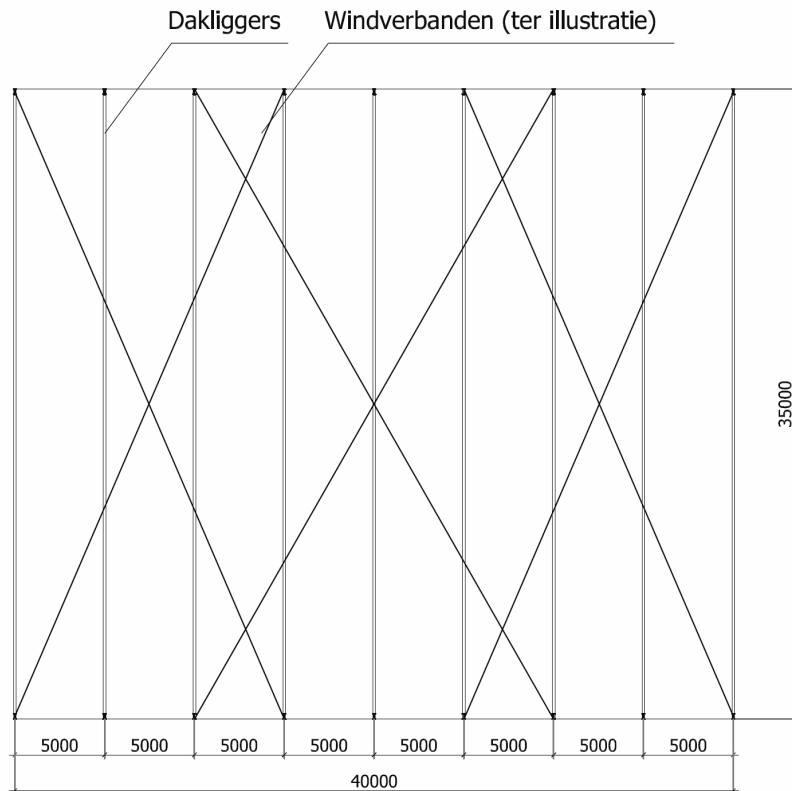
Het betreft een industrieel gebouw met een overspanning van 35 meter. Het ontwerp is getoetst conform de Nederlandse normen. De belastingen zijn bepaald conform NEN 6702 [5]. De toetsing van de staalconstructie is gedaan conform NEN 6770 [13] en NEN 6771 [14].

Uitgangspunten algemeen

Het betreft een hal voor de opslag van goederen. De functie van het gebouw is “lichte industrie”. De referentieperiode is 15 jaar. Het gebouw valt onder veiligheidsklasse 2.

Geometrie

Een overzicht van de dakconstructie met de belangrijkste maten is weergegeven in figuur 16.



Figuur 16 Schematische weergave dakoverzicht hal

Het betreft een constructie met een plat dak. De hoogte van het gebouw is 8 meter. De overspanning van de dakliggers is 35 meter. De spanten staan 5 meter h.o.h. De totale lengte van het gebouw is 40 meter. De h.o.h. afstand tussen de gordingen is 2 m. Er worden windverbanden aangebracht om de stabiliteit van het gebouw te verzorgen. De kolommen zijn van staal.

De onderregels zullen gesteund worden op uitknikken, door deze onderling te verbinden met een koppelstaaf. Deze koppelstaven zitten 10 meter h.o.h. De bovenregels worden in de zwakke richting gesteund door de dakplaten / gordingen. De bovenregel zal getoetst worden in de zwakke richting met de kniklengte gelijk aan 5,0 m. De onderregel zal getoetst worden in de zwakke richting met de kniklengte gelijk aan 10,0 m.

Belastingen

De belastingen waarmee gerekend is, zijn bepaald conform de NEN 6702 [5]. De belastingen voor het ontwerp bij normale temperatuur zijn: eigen gewicht, wind en sneeuw. De variabele belasting voor platte daken is voor een relatief kleine oppervlakte, zodat dit niet maatgevend voor het ontwerp van de dakliggers is. Hierna volgt een bespreking van de belastingen.

Eigen gewicht

Het eigen gewicht is van belang voor de minimale afmetingen van het profiel. Bij het bepalen van de brandwerendheid is het eigen gewicht belangrijk voor de benuttinggraad. Een hoog eigen gewicht zal in het algemeen resulteren in een hoge benuttinggraad. Dit betekent een lagere kritieke temperatuur (lagere

brandwerendheid). Voor profielen met hoge lijfslankheid (klasse 4) is dit echter niet van belang, omdat de kritieke temperatuur volgens de norm wordt vastgesteld op 350 °C [4] (indien geen hogere kritieke temperatuur wordt aangetoond).

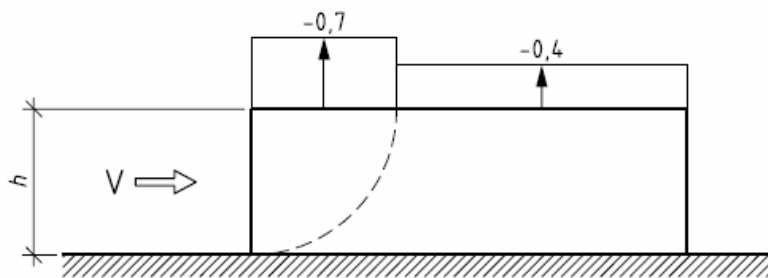
Er wordt gekozen voor sandwich dakplaten. Deze hebben een eigen gewicht van 0,15 kN/m². Verder dient er nog gewicht meegenomen te worden voor de gordingen en lichte installaties die aan het dak worden gehangen (zoals verlichting). Het totale eigen gewicht van de dakconstructie wordt aangenomen op 0,25 kN/m². Het eigen gewicht van de ligger is afhankelijk van het ontwerp.

Sneeuw

De sneeuwbelasting is afhankelijk van de dakhelling. In Nederland dient op platte daken gerekend te worden met 0,56 kN/m² sneeuwbelasting [5]. Indien er kans is op sneeuwophoping dient hier rekening mee te worden gehouden.

Windbelasting

Uitgegaan wordt van een hal in windgebied II, niet omgeven door gebouwen. De stuwdruk van wind (p_w) op het gebouw is conform NEN 6702 [5] gelijk aan 0,81 kN/m². De windvormfactoren waarmee gerekend dient te worden op een vlak dak zijn weergegeven in figuur 17.



Figuur 17 Windvormfactoren op een plat dak volgens NEN 6702 [5]

Op een strook bij het aangeblazen geveldeel wordt met een hogere belasting gerekend. De breedte van deze strook is gelijk aan de hoogte van het gebouw.

Daarnaast dient er rekening gehouden te worden met over- en onderdruk. Omdat er voor een dergelijk dakvlak zuiging aanwezig is, is overdruk in het gebouw maatgevend. Indien het gebouw niet wordt gezien als een open gebouw (geen grote openingen) is de factor voor overdruk 0,3. De totale windvormfactoren worden dan:

Strook: $C_{index} = C_{pe} + C_{pi} = -0,7 - 0,3 = -1,0$

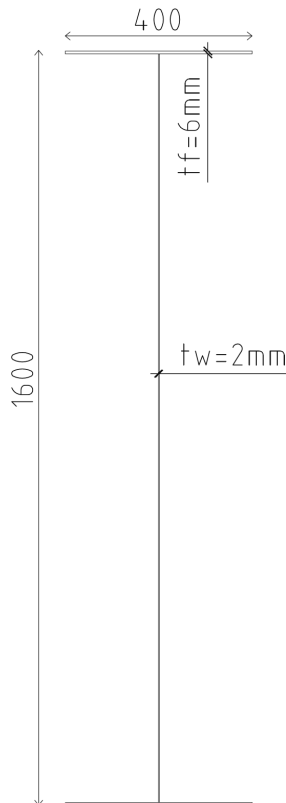
Overige gedeelte dakvlak: $C_{index} = C_{pe} + C_{pi} = -0,4 - 0,3 = -0,7$

Doordat het niet aannemelijk is dat de maatgevende stuwdruk over het gehele oppervlakte zal optreden, mag gereduceerd worden met een factor afhankelijk van de dimensies van het gebouw. De factor (C_{dim}) is in deze praktijksituatie gelijk aan 0,91 [5].

Hierna zullen de uitkomsten van de verschillende berekeningen weergegeven worden. De berekeningen zelf zijn te vinden in de bijlagen A, B en C.

3.5.1. Stalen plaatligger

Er is gekozen voor een stalen plaatligger met een maximale lijfslankheid. De maximale slankheid conform de formule van Basler is (voor staalsoort S235) $c_w / t_w = 800 \rightarrow t_{\min} = c_w / 800$. Voor een ligger met een hoogte van 1,6 m betekent dit een minimale plaatdikte van 2 mm.



Figuur 18 Stalen plaatligger

De berekening kan worden gevonden in bijlage A. De berekening van de krachten is uitgevoerd met behulp van het rekenprogramma Matrix Frame 4.3.

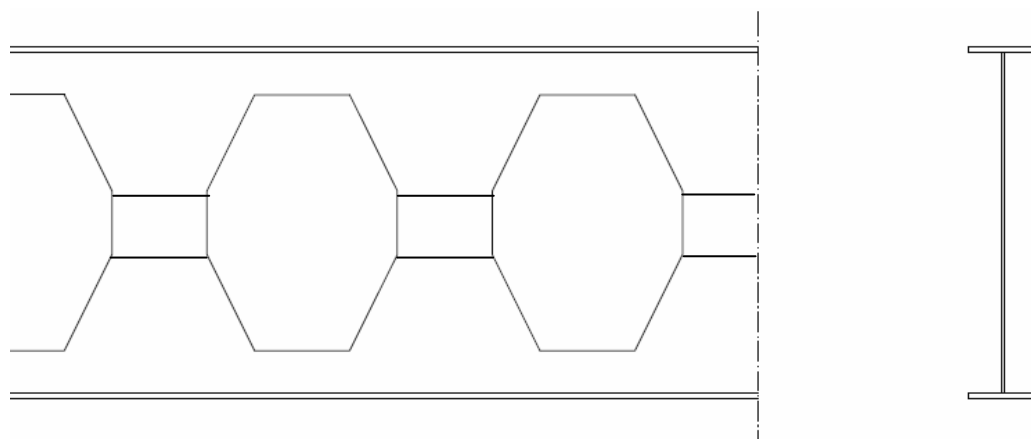
Het volgende profiel voldoet aan de eisen met betrekking tot sterkte, stijfheid en stabiliteit voor een berekening bij een normale temperatuur.

Profiel	=	lijfhoogte: 1.600 mm, dikte = 2 mm (S235)
		flenzen: 400-6 Voldoet hiermee aan het criterium $\frac{1}{2} \leq A_w / A_f \leq 2$
Doorsnede	=	8.000 mm ²
Gewicht	=	0,008 x 7.800 = 62,4 kg/m
Hoeveelheid staal=		62,4 kg/m x 35 m = 2.184 kg (voor een dakligger in 1 spant)

3.5.2. Raatligger

De berekeningen van het profiel zijn te vinden in bijlage B. De berekening van de krachten, en de toetsing van de sterkte is gedaan met Matrix Frame 4.3.

Het volgende profiel voldoet aan de eisen met betrekking tot sterkte, stijfheid en stabiliteit voor een berekening tijdens een normale temperatuur.



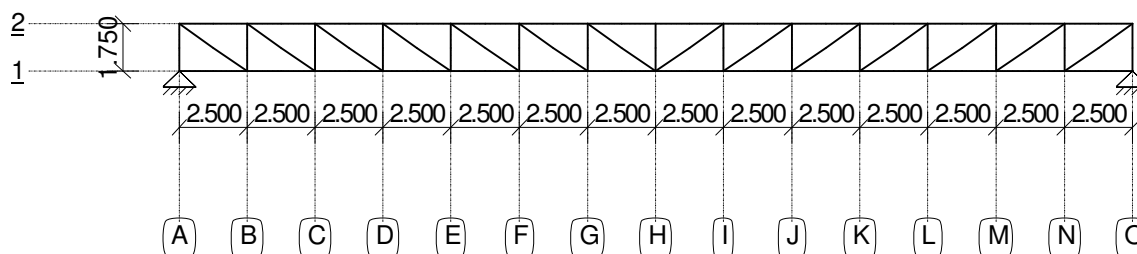
Figuur 19 Raatligger

Profiel = Raatligger IPE 600 met tussenschot van 200 mm, hoogte is 1.100 mm (S235)
Gewicht = 125 kg/m
Hoeveelheid staal = 125 kg/m x 35 m = 4.375 kg (voor een dakligger in 1 spant)

3.5.3. Vakwerkligger

De berekeningen van het profiel zijn te vinden in bijlage C. De berekening van de krachten, en de toetsingen van de sterkte en stabiliteit zijn uitgevoerd met Matrix Frame 4.3.

De volgende geometrie is aangehouden:



Figuur 20 Vakwerkligger

De volgende profielen voldoen aan de eisen:

Bovenregel

Profiel	=	HE160A (S235)
Doorsnede	=	3.877 mm ²
Gewicht	=	31,0 kg/m

Onderregel

Profiel	=	HE140A (S235)
Doorsnede	=	3.142 mm ²
Gewicht	=	25,1 kg/m

Diagonaal / verticaal

Profiel	=	CHS Ø 76,1 x 5 (S275)
Doorsnede	=	1.117 mm ²
Gewicht	=	8,7 kg/m

Hoeveelheid staal= 2.611 kg (voor een dakligger in 1 spant)

3.5.4. Vergelijking

De keuze voor een liggertype is afhankelijk van de esthetische waarde, de aanwezige constructiehoogte en de materiaal- en arbeidskosten. Een aannemer kan echter ook een beslissing nemen op basis van ervaring met bepaalde ligger types.

In tabel 2 is een vergelijking van verschillende profielen gegeven met het totaal benodigd staal voor elk profiel per dakligger. De fabricagekosten zijn kwantitatief bepaald.

Ligger type (staal)	Benodigd staal	Bespreking fabricage/ montage kosten
Raatligger	4.375 kg	Raatliggers worden in de fabriek gemaakt. Indien de liggers voor een dakconstructie worden gebruikt worden niet alle tanden volledig doorgelast. Een raatligger kan computergestuurd gesneden en gelast worden. Een enkele las per zijde is voldoende.
Stalen plaatligger	2.184 kg	Een stalen plaatligger wordt gelast in de fabriek. De fabricagekosten van een stalen plaatligger zijn hoger. Een stalen plaatligger vergt meer laswerk. Op de bouwplaats zal een stalen plaatligger ongeveer dezelfde montage-uren vergen als een raatligger.
Vakwerkligger	2.611 kg	Door de kostbare en arbeidsintensieve verbindingen zal een vakwerkligger meer fabricagekosten vergen dan een raatligger of stalen plaatligger. Omdat vakwerkliggers in segmenten op de bouwplaats kunnen worden gebracht zal het aantal arbeidsuren op de bouwplaats voor de montage nagenoeg gelijk zijn aan de overige liggers.

Tabel 2 Vergelijking profielen op basis van kosten

In hoofdstuk 6 zal een vergelijking van de profielen worden gemaakt ten opzichte van de brandwerendheid van de verschillende profielen.

4. Brand in industriegebouwen

Voor een realistische benadering van de brandwerendheid is inzicht in de temperatuursontwikkeling in industriehallen tijdens een brand noodzakelijk. Hiermee kan worden geconstateerd of de standaard-brandkromme een juiste benadering geeft van een brand in een industriehal. De standaard-brandkromme start namelijk bij vlamoverslag. Het kan mogelijk zijn dat vlamoverslag pas op zal treden na een lange vertraging, zodat de gebruikers van het gebouw voldoende tijd hebben om het gebouw te ontvluchten.

Om te bepalen of een constructie voldoende brandwerendheid bezit zal in hoofdstuk 5 in de vorm van een werkhypothese een tijd worden vastgesteld waarbinnen het aannemelijk is dat de gebruikers het gebouw kunnen ontvluchten.

Hierna zullen de gebouweigenschappen die van toepassing zijn op industriehallen afzonderlijk worden behandeld. Met behulp van het computer programma OZone zal de temperatuursontwikkeling in industriehallen worden benaderd.

4.1. Brandeigenschappen

Het verloop van een eenmaal ontstoken brand is afhankelijk van de volgende eigenschappen:

- Geometrie van het gebouw;
- Ventilatiecondities;
- Brandvermogensdichtheid;
- Totale vuurbelasting in het gebouw;
- De toename van de brandvermogensdichtheid gedurende de groeifase (branduitbreidingssnelheid).

Het effect van eventuele actieve maatregelen wordt buiten beschouwing gelaten. De maximale brandgrootte is gelijk aan het oppervlakte van het brandcompartiment.

Hierna zal ingegaan worden op de belangrijkste parameters voor het modelleren van een brand in industriehallen. De hal zal qua geometrie en afwerking dezelfde uitgangspunten bevatten als het gebouw in hoofdstuk 3.

4.1.1. Geometrie

Voor de parameterstudie is het noodzakelijk een aanname te doen voor de geometrie van het gebouw.

De volgende geometrie is aangehouden voor de modellering van het gebouw.

Hoogte: 8 m

Breedte: 35 m

Lengte: 40 m

4.1.2. Ventilatiecondities

Openingen in de gevels zijn van belang voor de ventilatiecondities. Door openingen in het gebouw kan zuurstof het gebouw intreden wat belangrijk is voor de ontwikkeling van de brand (indien de brand zuurstofbeheerst is). Anderzijds kan de opwarming worden vertraagd door het afvoeren van warmte en de aanvoer van koudere lucht. Voor het bepalen van de temperatuursontwikkeling zijn beide situaties (met en zonder openingen) bekeken. Industriegebouwen bevatten vaak grote overheaddeuren. Het gebouw in de parameterstudie bevat 2 overheaddeuren met een oppervlakte van $3 \times 4 = 12 \text{ m}^2$ per deur.

4.1.3. Brandvermogensdichtheid (Q)

De brandvermogensdichtheid (Q) is de warmteafgifte (in W) van de brand per m^2 . Deze parameter is belangrijk voor de mate van opwarming van de ruimte. De brandvermogensdichtheid is afhankelijk van de (opgeslagen) materialen in het gebouw. Indien materialen aanwezig zijn met een hoge warmteafgifte is de kans op het eerder optreden van vlamoverslag groter. In de parameterstudie zal uitgegaan worden van de volgende scenario's:

- een gebouw met gestapelde houten pallets, hoogte 0,5 m : $Q = 1.250 \text{ kW/m}^2$;
- een gebouw met plastic flessen in kartonnen dozen met een stapelhoogte van 4,6 m : $Q = 4.320 \text{ kW/m}^2$;
- een gebouw met gestapelde houten pallets, hoogte 3,0 m : $Q = 6.000 \text{ kW/m}^2$.

4.1.4. Vuurbelasting

De totale vuurbelasting in het gebouw is de hoeveelheid warmte die vrijkomt per eenheid vloeroppervlakte bij volledige verbranding van alle in een ruimte aanwezige brandbare materialen. De totale vuurbelasting is opgebouwd uit de permanente vuurbelasting en de variabele vuurbelasting. De permanente vuurbelasting is de vuurbelasting van alle vergunningplichtige brandbare bouwdelen, inclusief de omhullende constructies [9]. Plafonds, leidingen, installaties en stopcontacten bijvoorbeeld die aanwezig zijn om te voldoen aan een eis in het Bouwbesluit moeten dus worden meegerekend. De variabele vuurbelasting zijn alle overige materialen in het gebouw.

In bijlage D is een overzicht gegeven van enkele kengetallen van vuurbelastingen voor verschillende gebouwfuncties [15]. Om een indicatie te geven van de totale vuurbelasting in industriegebouwen is hierna een overzicht weergegeven van ruimten zoals ingedeeld in het brandveiligheidsconcept “industriegebouwen” [16]. Kengetallen van verschillende gebouwen zijn tevens ontleend uit de uitgave “vuurbelasting in industriegebouwen” van het Nederlands instituut fysieke veiligheid [17].

1. $Q < 95 \text{ MJ/m}^2$

- Bepaalde productie/ opslagruimten van producten zoals steenachtige materialen of materialen met een hoog vochtgehalte (groenten, melk, etc.);
- Machinefabriek, metaalbewerking, constructiewerkplaatsen met alleen dagvoorraden olie;
- Modern opgezette textielwarenfabriek.

2. $95 \text{ MJ/m}^2 < Q < 570 \text{ MJ/m}^2$

- Bepaalde opslagruimten van producten zoals metaal, waarbij houten stellingen / pallets en verpakkingsmateriaal aanwezig is.

3. $570 \text{ MJ/m}^2 < Q < 1.340 \text{ MJ/m}^2$

- Magazijnen;
- Productiehal voor het snijden van isolatieschuim (PS);
- Bepaalde productiehallen van producten zoals hout, papier, katoen, wol, suikerwaren en snoepgoed.

4. $1.340 \text{ MJ/m}^2 < Q < 2.680 \text{ MJ/m}^2$

- Productiehal voor het verwerken van isolatieschuim (PS);
- Bepaalde productie/ opslagruimten van producten zoals kunststoffen.

5. $Q > 2.680 \text{ MJ/m}^2$

- Opslaghallen van brandbare materialen;
- Opslagruimte brandbare vloeistoffen;
- Bepaalde productie/ opslagruimten van bijvoorbeeld aardolieproducten.

In de figuren 21 en 22 zijn voorbeelden te zien van een industriehal met een hoge en lage vuurbelasting. De hal afgebeeld in figuur 21 is een opslaghal van suikerwaren en de hal van figuur 22 is een hal voor metaalbewerkingen.



Figuur 21 Voorbeeld van een gebouw met een vuurbelasting $> 2.680 \text{ MJ/m}^2$, op de foto een opslaghal van suikerwaren



Figuur 22 Voorbeeld van een gebouw met een vuurbelasting $< 95 \text{ MJ/m}^2$, op de foto een productiehal van (stalen) kraanbanen

De totale vuurbelasting is belangrijk om te bepalen of er voldoende brandstof aanwezig is om een bepaalde temperatuur in de ruimte voor vlamoverslag te krijgen. Tevens is de totale vuurbelasting van belang voor het bepalen van de brandduur.

Hierna zal ingegaan worden op een mogelijke afwerking ten behoeve van de vuurbelasting in het gebouw van de parameterstudie.

Vloer: Betonvloer met een dikte van 20 cm, massa 2400 kg/m^3 , thermische geleiding = 1,6 W/mK, specifieke warmte = 1000 J/kgK , emissiefactor = 0,8 (warme en koude oppervlakken).

Draagconstructie: De constructie is van staal. Staal levert geen bijdrage aan de vuurbelasting. Enige bijdrage aan de permanente vuurbelasting van de draagconstructie kan mogelijk zijn van de gordingen en houten regels in de wanden.

Gevels: De gevels van industriegebouwen bestaan doorgaans uit sandwichpanelen, staalplaten of binnendozen. Indien de hal verwarmd wordt zal er isolatie aangebracht worden. De verbrandingswaarde van het isolatiepakket is afhankelijk van de soort (bijv. PU of minerale wol).

De volgende eigenschappen zijn gehanteerd voor staal: massa = 7850 kg/m^3 , thermische geleiding = 45 W/mK, specifieke warmte = 600 J/kgK , emissiefactor = 0,8 (warme en koude oppervlaktes).

Voor isolatie is uitgegaan van de volgende eigenschappen 60 kg/m^3 , thermische geleiding = 0,037 W/mK, specifieke warmte = 1030 J/kgK , emissiefactor = 0,8 (warme en koude oppervlakken). Uitgangspunt is het plaatsen van minerale wol isolatie (steenwol of glaswol).

4.1.5. Branduitbreidingssnelheid

Als een brand zich snel uitbreidt kan de temperatuur van het compartiment snel stijgen (bij het voldoen aan de overige voorwaarden, zoals ventilatiecondities, voldoende vuurbelasting, etc.). Afhankelijk van de in het gebouw aanwezige materialen is de snelheid van de branduitbreiding te bepalen.

In de groeifase van de brand is de brandvermogensdichtheid (Q) afhankelijk van de tijdconstante (t_a). De tijdconstante wordt aangegeven als de tijd waarin de oppervlakte van de brand gegroeid is tot een oppervlakte met een effectieve hoeveelheid warmte afgifte van 1 MW.

$$Q = \left(\frac{t}{t_a} \right)^2$$

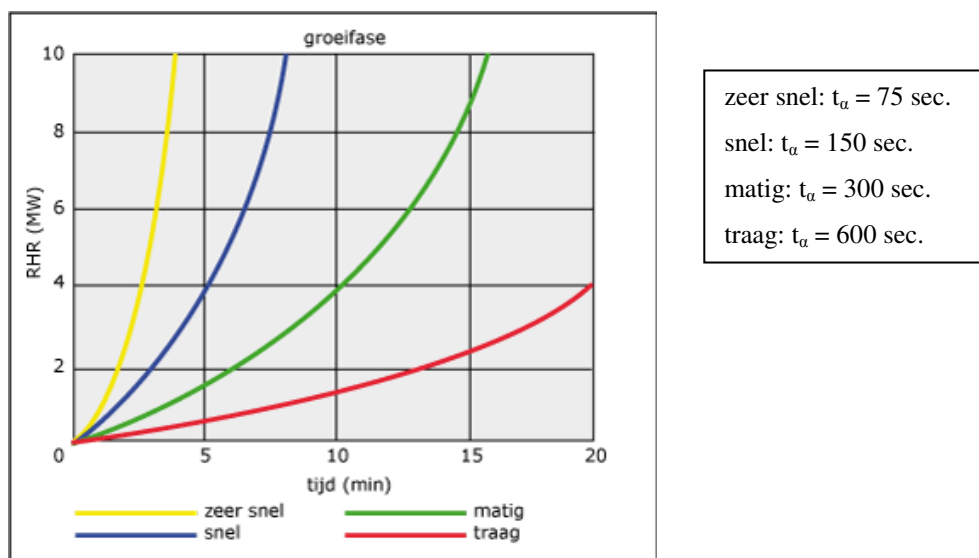
waarin:

Q = brandvermogensdichtheid (W);

t = tijd (seconden);

t_a = de tijd die nodig is om de brandvermogensdichtheid van 1 MW te bereiken (seconden).

Voor veel gebruiksfuncties kan voor een compartiment een typische brand worden gekoppeld en een waarde van de tijdconstante. In industrie functies is de tijdconstante echter sterk afhankelijk van de aard van de aanwezige materialen en opgeslagen goederen. Voor het bepalen van de tijdconstante van de brand zal er (voornamelijk bij industrie functies) gekeken moeten worden naar het gebruik van het gebouw. De tijdconstante kan voor industrie functies volgens de publicatie “Doelstellingen brandveiligheid grote brandcompartimenten” van het ministerie van VROM (5) variëren tussen 150 – 600 seconden. In figuur 23 worden vier ontwikkelingssnelheden van branden onderscheiden: traag ($t_a = 600$ sec.), matig ($t_a = 300$ sec.), snel ($t_a = 150$ sec.) en ultrasnel ($t_a = 75$ sec.). Het verloop van de brandvermogensdichtheid (aangegeven met de term RHR) is voor de 4 branden weergegeven.



Figuur 23 Verloop van de brandvermogensdichtheid tijdens de groeifase voor 4 verschillende branduitbreidingssnelheden

In tabel 3 wordt een overzicht gegeven van 4 verschillende tijdconstanten met mogelijke functies van het gebouw.

Branduitbreidingssnelheid	Omstandigheden	t_{α}	Gebruik
Traag	Plaatselijke vuurbelasting	600 s	Museum
Matig	Katoen / polyester	300 s	Woning Kantoor Hotel
Snel	Volle postzakken Kunststofschuim Gestapeld hout Paletten	150 s	Winkel
Ultra-snel	Methyl alcohol Vloeistof brand, faster Gestoffeerde meubelen	75 s	Chemische fabriek

Tabel 3 Voorbeelden van gebouwen met verschillende branduitbreidingssnelheden.

4.2. Parameterstudie

Het is mogelijk om met zonemodellen de ontwikkeling van de temperatuur in een gebouw tijdens een brand te simuleren. Er wordt onderscheid gemaakt in een eenzonemodel en een tweezonemodel. Bij een tweezonemodel wordt het compartiment in de hoogte opgedeeld in twee zones. Een hete zone boven en een koude zone onder. Binnen een zone houdt het model één temperatuur, dichtheid, massa, etc. De warme zone wordt gedurende de brand steeds dikker en warmer. Na het optreden van vlamoverslag zal met één zone worden gerekend.

Een rekenprogramma dat natuurlijke branden kan simuleren is OZone. Dit programma is ontwikkeld door de universiteit van Luik. De laatste versie die uitgebracht is op moment van schrijven is versie 2.2.6.

4.2.1. OZone

Met behulp van OZone zijn diverse simulaties gemaakt om de temperatuursontwikkeling in een denkbeeldig gebouw te onderzoeken. Hierbij zijn de totale vuurbelasting, de mate van warmteafgifte en de tijdconstante telkens anders aangenomen.

Met een massa- en energiebalans, wordt de temperatuursverandering in een ruimte bepaald. Een beschrijving van de achterliggende formules is te vinden in bijlage E.

Het is in OZone alleen mogelijk om met één vuurbron te rekenen. Deze genoemde beperking biedt geen belemmering voor het gebruik van OZone voor de modelering van een natuurlijke brand in het kader van dit onderzoek. Er is geen informatie bekend over de beperkingen met de maximale brandcompartimentgrootte. In de documentatie van het programma wordt hier geen informatie over gegeven. Tevens worden in EN 1991-1-2 geen extra beperkingen gesteld aan het gebruik van geavanceerde brandmodellen.

Voordat vlamoverslag op zal treden is het mogelijk dat de temperatuur in de bovenste laag op een bepaald punt in de ruimte tijdelijk hoog is. Indien de temperatuur lokaal boven de kritieke temperatuur van de ligger komt kan de ligger bezwijken voordat vlamoverslag is opgetreden. In het rekenprogramma is het mogelijk de maximale waarde van de temperatuur te kiezen van een lokale brand of de temperatuur van de bovenste laag. Voor deze optie is gekozen omdat het instorten van één enkele ligger ter plaatse van een lokale brand voldoende is om te spreken van onvoldoende brandwerendheid van de ligger als draagconstructie van het gebouw.

4.2.2. Brandscenario's

In tabel 4 een overzicht van de verschillende brandscenario's. De gevolgen van het veranderen van de volgende variabelen worden onderzocht:

- de mate van warmteafgifte (brandvermogensdichtheid);
- totale vuurbelasting;
- de tijdconstante.

Eerst wordt een extreme situatie gemodelleerd. Daarna zal worden gekeken naar de invloed van het verlagen van de brandvermogensdichtheid, de vuurbelasting en de uitbreidingssnelheid.

Brandscenario	Brandvermogensdichtheid [kW/m ²]	Vuurbelasting [MJ/m ²]	Uitbreidings- snelheid	Tijdconstante [seconden]
1	6.000	16.000	Ultra snel	75
2	6.000	1.000	Ultra snel	75
3	1.250	16.000	Ultra snel	75
4	6.000	16.000	Traag	600
5	6.000	16.000	Matig	300

Tabel 4 Brandscenario's t.b.v. parameterstudie

Er zal onderzocht worden wat de temperatuursontwikkeling van de verschillende brandscenario's in het gebouw is. In hoofdstuk 6 zal de brandwerendheid van een plaatligger (en vergelijkbare liggers) toegepast als draagconstructie van het dak worden bepaald bij de brandscenario's.

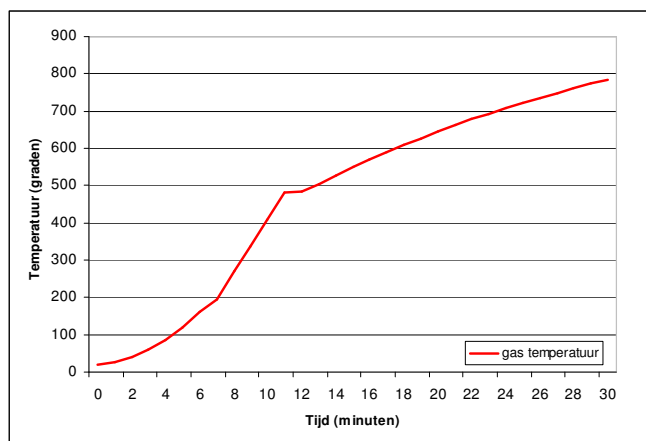
4.2.3. Resultaten parameterstudie

Hierna een weergave van de temperatuursontwikkeling voor alle brandscenario's.

Brandscenario 1: Extreem

Voor de eerste test is gekeken naar een extreem hoge brandvermogensdichtheid, vuurbelasting en ultra snelle uitbreidingssnelheid. De volgende parameters zijn aangehouden:

Brandvermogensdichtheid = 6.000 kW/m²;
 Vuurbelasting = 16.000 MJ/m²;
 Uitbreidingssnelheid = ultra snel ($t_a = 75$ s.)



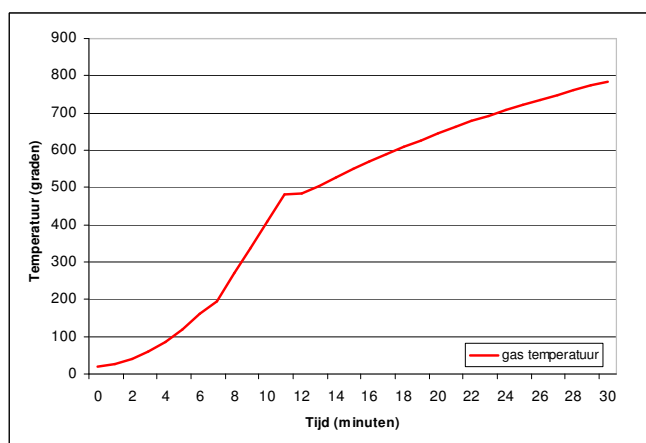
Figuur 24 Extreem brandscenario

Na 10 minuten is de temperatuur in het compartiment ongeveer 400 °C. Daarna neemt de temperatuur toe tot ongeveer 800 °C op 30 minuten na ontsteking.

Brandscenario 2: Lage vuurbelasting

Om de invloed van de totale vuurbelasting te beoordelen is een test gemaakt met een, voor een industriehal, lage vuurbelasting. De volgende parameters zijn aangehouden:

Brandvermogensdichtheid = 6.000 kW/m²;
 Vuurbelasting = 1.000 MJ/m²;
 Uitbreidingssnelheid = ultra snel ($t_a = 75$ s.)



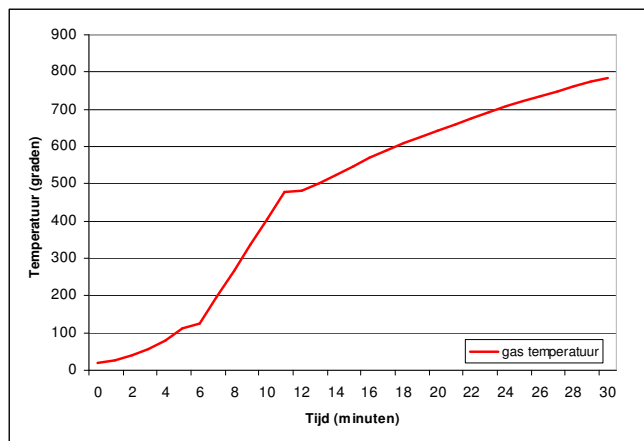
Figuur 25 Lage vuurbelasting

Het verloop van de temperatuur is nagenoeg gelijk aan brandscenario 1. Er is na 10 minuten een temperatuur van ongeveer 400 °C in het brandcompartiment.

Brandscenario 3: Lagere brandvermogensdichtheid

Om de invloed van de brandvermogensdichtheid te beoordelen is een test gemaakt met een, voor een industriehal, lage brandvermogensdichtheid. De totale vuurbelasting is hoog en de branduitbreidingssnelheid is ultrasnel. De volgende parameters zijn aangehouden:

Brandvermogensdichtheid = 1.250 kW/m^2 ;
Vuurbelasting = 16.000 MJ/m^2 ;
Uitbreidingssnelheid = ultra snel ($t_a = 75 \text{ s.}$)



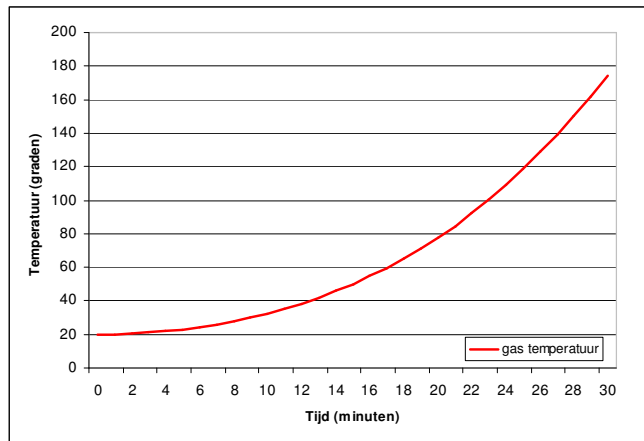
Figuur 26 Lagere brandvermogensdichtheid

Het verloop van de temperatuur is nagenoeg gelijk aan brandscenario 1 en 2. Er is na 10 minuten een temperatuur van ongeveer $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in het brandcompartiment.

Brandscenario 4: Lagere uitbreidingssnelheid

Om de invloed van de uitbreidingssnelheid te beoordelen is een test gemaakt met een lage uitbreidingssnelheid. De totale vuurbelasting en brandvermogensdichtheid zijn hoog. De volgende parameters zijn aangehouden:

Brandvermogensdichtheid = 6.000 kW/m^2 ;
Vuurbelasting = 16.000 MJ/m^2 ;
Uitbreidingssnelheid = traag ($t_a = 600 \text{ s.}$)



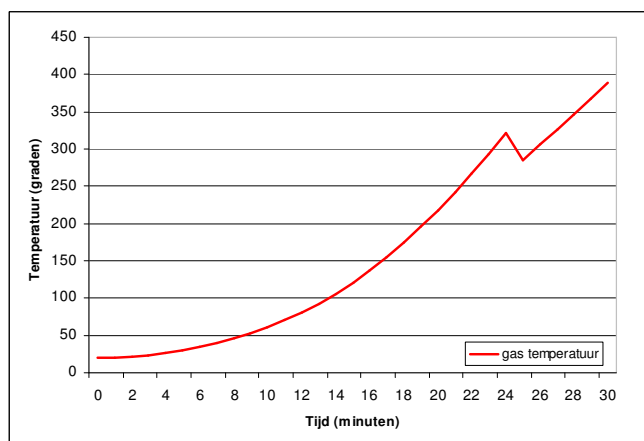
Figuur 27 Lage uitbreidingssnelheid

Bij een lage uitbreidingssnelheid lijkt het erop dat er binnen 30 minuten geen vlamoverslag op zal treden. Doordat de brand traag uitbreidt en het grote volume dat opgewarmd moet worden is de temperatuursontwikkeling langzamer dan de overige brandscenario's. Na 30 minuten is de temperatuur in het compartiment ongeveer 170 °C.

Brandscenario 5: Matige uitbreidingssnelheid

Om de invloed van de uitbreidingssnelheid te beoordelen is een test gemaakt met een matige uitbreidingssnelheid. De volgende parameters zijn aangehouden:

Brandvermogensdichtheid = 6.000 kW/m²;
 Vuurbelasting = 16.000 MJ/m²;
 Uitbreidingssnelheid = matig ($t_q = 300$ s.)



Figuur 28 Matige uitbreidingssnelheid

Bij een matige uitbreidingssnelheid lijkt het er eveneens op dat er binnen 30 minuten geen vlamoverslag op zal treden. Wel stijgt de temperatuur sneller dan bij een trage uitbreidingssnelheid. Na 28 minuten is de temperatuur ongeveer 350 °C.

4.2.4. Conclusie

Uit de verschillende testen blijkt dat in dit specifieke (fictieve) gebouw, een langzame brandgroei zal leiden tot een lange tijd tussen het begin van de brand en het bereiken van een temperatuur van 350 °C. Ook blijkt dat de warmteafgifte en de vuurbelasting minder invloed hebben op de snelheid waarmee een hoge temperatuur wordt bereikt.

5. Benodigde brandwerendheid hoofddraagconstructie in industriehallen

De functionele eis die in het Bouwbesluit gesteld wordt aan de draagconstructie van een gebouw houdt in dat het gebouw bij brand gedurende een redelijke tijd kan worden verlaten en doorzocht, zonder dat het instort. Zie afdeling 2.2. van het Bouwbesluit. Voor de verschillende gebruiksfuncties worden prestatie-eisen gespecificeerd, alle in de vorm van standaard-brandwerendheidseisen (d.w.z. uitgaande van de standaardbrand). Indien aan deze prestatie-eisen wordt voldaan, mag aangenomen worden dat ook aan de achterliggende functionele eis wordt voldaan. Indien de prestatie-eisen ontbreken of indien deze niet interpreteerbaar zijn, moet op basis van gelijkwaardigheid plausibel worden gemaakt dat aan de functionele eis wordt voldaan.

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de minimale prestatie-eisen die zouden moeten gelden voor de hoofddraagconstructie van een industriehal als behandeld in dit rapport. Daarbij zal worden aangesloten bij de gedachtegang zoals aangegeven in hoofdstuk 2. D.w.z.: het gedrag bij brand van de hoofddraagconstructie wordt beoordeeld uitgaande van zowel de standaardbrand als op basis van blootstelling aan natuurlijke branden. Omdat beoordeling op basis van natuurlijke branden vanuit functioneel oogpunt de voorkeur verdient, zal hiermee begonnen worden.

Beschouwing op basis van natuurlijke branden

Een complicatie bij het formuleren van een prestatie-eis op basis van natuurlijke branden is dat – zoals hierboven al werd opgemerkt - in het Bouwbesluit exclusief wordt uitgegaan van de standaardbrand. De aldus gedefinieerde standaard-brandwerendheid kan niet zomaar “vertaald” worden naar natuurlijke brandomstandigheden. Daarom wordt gebruik gemaakt van het gelijkwaardigheidprincipe. Uitgangspunt hierbij is de zogenaamde “opkomsttijd”. Deze volgt uit de som van de volgende tijden:

- verwerkingstijd van de melding;
- uitruktijd: tijd tussen het alarmeren door de meldkamer en tijdstip dat het eerste voertuig de kazerne verlaat;
- aanrijdtijd: tijd die het eerste voertuig nodig heeft om van de kazerne naar de plaats van de brand te gaan.

In Nederland wordt voor de opkomsttijd een streeftijd gehanteerd van 8 minuten die – in 2006 – overigens slechts in 30 % van de gevallen werd gehaald.

In dit rapport zal worden uitgegaan van een opkomsttijd van ca. 10 minuten. Uitgaande van een prestatie-eis van 20 minuten voor de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie bij natuurlijke branden in combinatie met een hele snelle brandmelding³ blijft dus ca. 10 minuten over voor de brandweer om, na aankomst bij de brand,

³ Hierbij moet gedacht worden aan automatische detectie in combinatie met doormelding naar de brandweer.

het gebouw te inspecteren. Dit lijkt voor eenvoudige hallen als hier aan de orde niet onredelijk. De hiermee samenhangende prestatie-eis van 20 minuten moet overigens wel als een minimum worden gezien⁴.

Met behulp van natuurlijke brandmodellen, zoals beschreven in hoofdstuk 4, is op grond van een thermische responsberekening na te gaan of aan de gestelde eis wordt voldaan, indien de kritieke temperatuurcondities van de plaatligger bekend zijn.

Beschouwing op basis van de standaardbrand.

Op grond van het Bouwbesluit [2] geldt voor niet tot bewoning bestemde gebouwen zonder slaapfunctie, waarvan de vloer van het hoogst gelegen verblijfsgebied lager ligt dan 5 meter boven meetniveau, geen expliciete eis voor de brandwerendheid van de hoofddraagconstructie. De in dit rapport beschouwde situatie voldoet aan deze criteria. Formeel geldt er dus geen brandwerendheidseis. Traditionele constructies zullen echter altijd een zekere brandwerendheid bezitten. Zo hebben zelfs onbeklede warmgewalste stalen liggers onder praktische omstandigheden een standaard-brandwerendheid van zo'n 10 á 15 minuten. Kennelijk wordt een dergelijk brandwerendheidsniveau in de huidige brandbeveiligingspraktijk voldoende geacht om aan de eerder genoemde functionele eis van het Bouwbesluit te voldoen. Op grond hiervan wordt voorgesteld ook bij toepassing van stalen plaatliggers uit te gaan van een brandwerendheidseis van 10 minuten.

Met behulp van de standaardbrand (zie hoofdstuk 4) is middels een thermische responsberekening na te gaan of aan de gestelde eis wordt voldaan, indien de kritieke temperatuurcondities van de plaatligger bekend zijn.

Slotopmerking

Doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is de uiterste grenzen op te zoeken waarbij – vanuit het oogpunt van de brandveiligheid – (slanke) stalen plaatliggers in industriehallen nog kunnen worden toegepast. Daarom is gezocht naar prestatie-eisen die minimaal zouden kunnen worden gesteld. De gemaakte keuzen moeten worden gezien als werkhypotheses om tot kwantificeerbare conclusies te komen. Zie de volgende hoofdstukken. Voor alternatieve prestatie-eisen kunnen de conclusies eenvoudig worden aangepast. Het is geenszins de bedoeling een voorstel voor (toekomstige) regelgeving te formuleren.

⁴ Opgemerkt wordt dat de eis van 20 minuten ruim voldoende lijkt om een eenvoudige hal als in rapport behandeld, te ontvluchten. Mocht dit niet mogelijk zijn, bijvoorbeeld als gevolg van zeer snelle rookverspreiding, dan is het gedrag van de (hoofd)draagconstructie niet de beslissende factor.

6. Brandwerendheid stalen plaatliggers

De brandwerendheid van stalen plaatliggers met grote lijfslankheid zal in dit hoofdstuk worden besproken. Allereerst zal worden gekeken of de kritieke staaltemperatuur voor doorsnedeklasse 4 profielen van 350 °C [4] reëel is. Het is mogelijk om met behulp van EN 1993-1-2 [4] een benadering te maken van de kritieke staaltemperatuur. In 6.2. zal de brandwerendheid worden bepaald van enkele stalen plaatliggers met grote lijfslankheid uitgaande van de standaard-brandkromme. Daarna zal in 6.3. de brandwerendheid worden bepaald gerekend met de brandscenario's uit hoofdstuk 4.

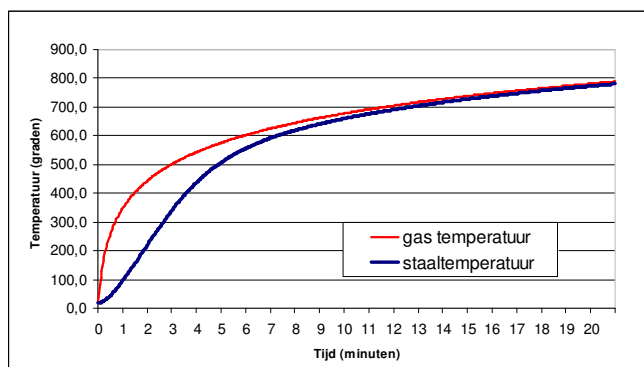
6.1. Kritieke temperatuur

De kritieke temperatuur van stalen liggers met doorsnedeklasse 4 is 350 °C conform EN 1993-1-2 [4]. Deze grens is gekozen als veilige benadering van de kritieke staaltemperatuur. Bijlage E van EN 1993-1-2 [4] biedt de mogelijkheid door middel van een analytische methode een meer nauwkeurige schatting van de kritieke staaltemperatuur te maken. Voor het in hoofdstuk 3 gekozen staalprofiel is de kritieke staaltemperatuur volgens bijlage E van EN 1993-1-2 [4] berekend. De berekening is te vinden in bijlage F. De kritieke staaltemperatuur volgens deze berekening is 557 °C.

Het is aannemelijk dat deze temperatuur een goed beeld geeft voor de werkelijke kritieke staaltemperatuur voor dakliggers in industriehallen.

6.2. Brandwerendheid bepaald met standaard-brandkromme

In figuur 29 is het verloop van de staaltemperatuur van de stalen plaatligger (lijf: 1600 x 2, flenzen 400 x 6) weergegeven. Hierbij is het verloop van de temperatuur van de brand volgens de standaardbrand-kromme.



Figuur 29 Verloop staaltemperatuur plaatligger (lijf: 1600 x 2 flenzen: 400 x 6) onderworpen aan een standaardbrand

De brandwerendheid van de stalen plaatligger uit het voorbeeld in dit onderzoek is, gerekend met een kritieke staaltemperatuur van 350 °C, gelijk aan 3 minuten.

De brandwerendheid van de stalen plaatligger uit het voorbeeld in dit onderzoek is, gerekend met een kritieke staaltemperatuur van 557 °C, gelijk aan 6 minuten. Een brandwerendheid van 6 minuten is volgens de gestelde

werkhypothese in hoofdstuk 5 voldoende om de gebruikers van het gebouw de tijd te geven het gebouw te ontvluchten.

Er is dus een groot verschil in de benadering van de kritieke staaltemperatuur volgens bijlage E van EN 1993-1-2 [4] en de brandwerendheid gerekend met de kritieke staaltemperatuur van 350 °C [4]. Het is echter niet mogelijk hier een algemeen geldende conclusie uit te trekken.

6.3. Brandwerendheid bepaald met natuurlijk brandconcept

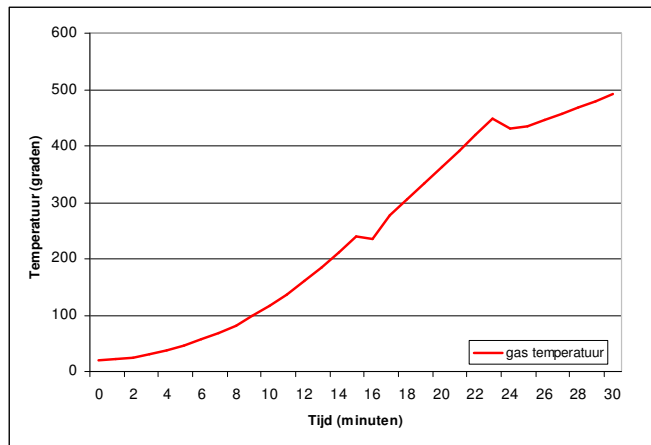
Er zijn in hoofdstuk 4 verschillende brandscenario's onderzocht. Uit de verschillende simulaties is gebleken dat in een compartiment met dergelijke afmetingen en materialen, een lage brandgroeisnelheid altijd zal leiden tot een ruime tijd tussen de ontsteking van de brand en het bereiken van temperaturen hoger dan 350 °C. De tijd die nodig is voor het bereiken van deze temperatuur is vooral afhankelijk van de branduitbreidingssnelheid, en nagenoeg onafhankelijk van de totale vuurbelasting of de mate van warmteafgifte.

De brandwerendheid van een stalen plaatligger met een grote lijfslankheid zal worden bepaald voor de verschillende brandscenario's. Hierbij dient het volgende te worden opgemerkt:

- Er wordt aangenomen dat de temperatuur van het staal gelijk is aan de omgevingstemperatuur;
- Om een veilige (en algemeen geldende) benadering te geven is uitgegaan van een kritieke staaltemperatuur van 350 °C [4];
- Als vorm van werkhypothese zal worden aangenomen dat een brandwerendheid van de hoofddraagconstructie van 20 minuten na ontsteking voldoende is. In hoofdstuk 5 is dit nader onderbouwd.

Bij een ultra snelle branduitbreiding ($t_d=75$ seconden) is de brandwerendheid ongeveer 15 minuten, en dus onvoldoende. Bij een trage branduitbreiding (tijdconstante groter dan 600 seconden) is de brandwerendheid langer dan 30 minuten. Er zal gezocht moeten worden naar een branduitbreidingssnelheid waarbij de kritieke staaltemperatuur (350 °C) na 20 minuten nog niet is bereikt. Na het uitvoeren van verschillende brandmodellen is gebleken dat bij een tijdconstante groter dan 160 seconden de kritieke staaltemperatuur na 20 minuten nog niet is bereikt. Ook met een lagere brandvermogensdichtheid of vuurbelasting blijft de ondergrens van 160 seconden gehandhaafd.

Het verloop van de staaltemperatuur van een plaatligger onderworpen aan een natuurlijke brand met een tijdconstante van 160 seconden is weergegeven in figuur 30.



Figuur 30 Verloop staaltemperatuur plaatligger (lijf: 1600 x 2 flenzen: 400 x 6) onderworpen aan een natuurlijke brand

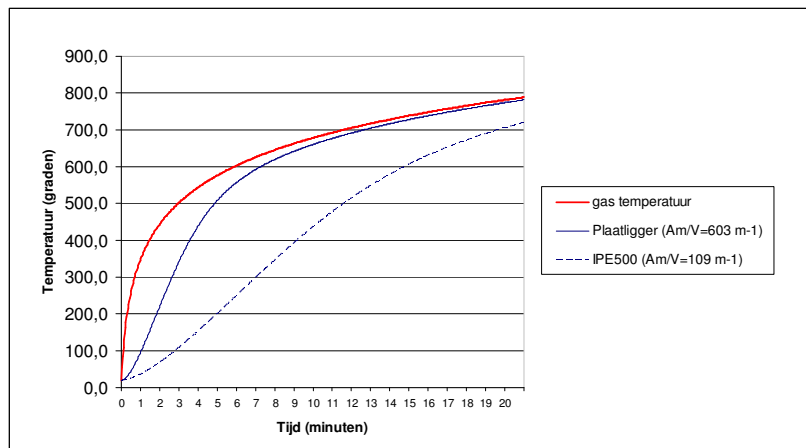
In de grafiek in figuur 30 valt af te lezen dat, indien de tijdconstante 160 seconden is, de brandwerendheid gerekend vanaf het punt van vlamoverslag circa 20 minuten is.

Omdat de eerste 20 minuten de temperatuur onder de kritieke staaltemperatuur blijft kan ervan worden uitgegaan dat de constructie de eerste 20 minuten na het ontstaan van de brand niet zal bezwijken. De gebruikers van het gebouw hebben bij een $t_a \geq 160$ seconden voldoende tijd het gebouw veilig te ontluchten.

6.4. Bespreking thermische response slanke stalen plaatliggers (onder standaard-brandomstandigheden)

Vanwege de hoge profielfactor (A_m/V) van stalen plaatliggers met grote lijfslankheid zal de opwarming van het staal nagenoeg gelijk zijn aan de omgevingstemperatuur. Dit komt omdat de aan de hitte blootgestelde oppervlakte relatief groot is ten opzichte van het volume. Om het verschil in opwarming met een IPE profiel te verduidelijken is de ontwikkeling van de staaltemperatuur onder dezelfde brandomstandigheden in één grafiek geplaatst.

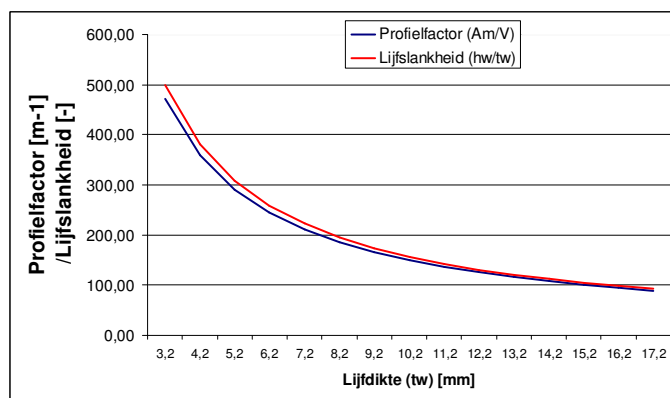
In figuur 31 is de ontwikkeling van de staaltemperatuur tijdens een standaardbrand voor een IPE 500 en een plaatligger (lijf = 1600 x 2; flenzen: 400 x 6) weergegeven.



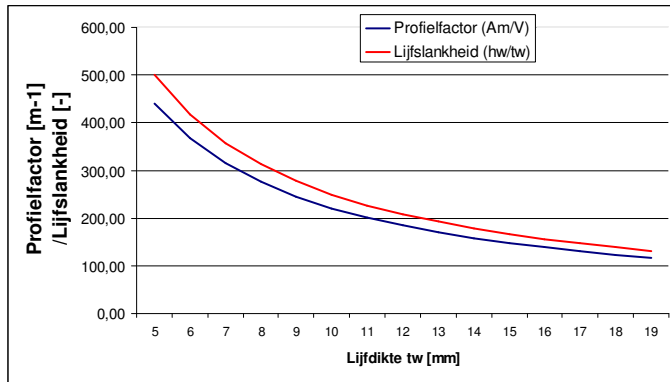
Figuur 31 Ontwikkeling van de staaltemperatuur van een stalen plaatligger met hoge lijfslankheid (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) en een IPE 500 profiel, onderworpen aan een standaardbrand

Duidelijk is te zien dat de ontwikkeling van de staaltemperatuur van de plaatligger nagenoeg gelijk verloopt als de ontwikkeling van de omgevingstemperatuur. De opwarming van het IPE profiel is trager. Om de ontwikkeling van de staaltemperatuur van plaatliggers met zeer grote lijfslankheid te onderzoeken zal een verband worden gezocht tussen de lijfslankheid en de profielfactor. Daarna zal de brandwerendheid afhankelijk van de profielfactor worden onderzocht.

Om de relatie tussen de lijfslankheid en de profielfactor te onderzoeken zijn deze twee parameters uitgezet in een grafiek als functie van de lijfdikte. Dit is voor een profielhoogte van 1,6 meter en 2,5 meter onderzocht. De resultaten zijn weergegeven in figuur 32 en figuur 33. De breedte van de flenzen voor alle onderzochte profielen in grafiek 32 is 400 mm, de breedte van de flenzen van de profielen in grafiek 33 is 750 mm. De dikte van de flenzen is zo gekozen zodat $A_f = \frac{1}{2}A_w$.



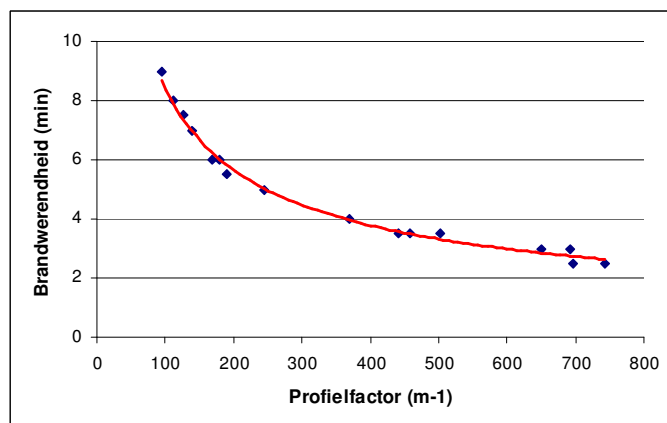
Figuur 32 Verloop profielfactor en lijfslankheid bij een toenemende lijfdikte (vaste lijfhoogte van 1600 mm)



Figuur 33 Verloop profielfactor en lijfslankheid bij een toenemende lijfdikte (vaste lijfhoogte van 2500 mm)

Uit de grafieken 32 en 33 valt af te lezen dat voor een plaatligger met zeer hoge lijfslankheid (400-500) gerekend moet worden op een profielfactor tussen de 350 m^{-1} – 500 m^{-1} .

Om een indruk te krijgen van de invloed van de profielfactor op de brandwerendheid van stalen plaatliggers, is de standaard-brandwerendheid van verschillende stalen plaatliggers uitgerekend en uitgezet in een grafiek (figuur 34). De kritieke staaltemperatuur is hierbij aangehouden op 350°C voor klasse 4 profielen [4].

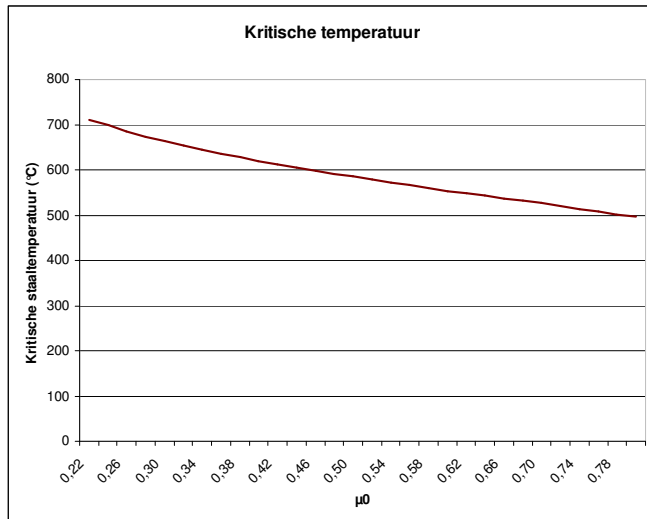


Figuur 34 Standaard-brandwerendheid afhankelijk van de profielfactor (kritieke temperatuur = 350°C)

Duidelijk waarneembaar is dat een hogere profielfactor zal leiden tot een lagere brandwerendheid. Zoals op de vorige pagina is aangegeven zal de profielfactor voor plaatliggers met zeer hoge lijfslankheid tussen de 350 m^{-1} en 500 m^{-1} liggen. De standaard-brandwerendheid van dergelijke liggers is volgens figuur 34 tussen de 3 en 4 minuten.

6.5. Bespreking mechanische response slanke stalen plaatliggers

De kritieke staaltemperatuur is (indien afgeweken wordt van de defaultwaarde van de kritieke staaltemperatuur van 350°C [4]) afhankelijk van de benuttinggraad. Als de benuttinggraad bekend is kan de kritieke staaltemperatuur worden verkregen door deze af te lezen in de tabellen uit EN 1993-1-2 [4]. Figuur 35 geeft de kritieke staaltemperatuur weer, afhankelijk van de benuttinggraad.



Figuur 35 Kritieke staaltemperatuur afhankelijk van de benuttinggraad

De unity check is gedefinieerd als: de belasting op de constructie, gedeeld door de weerstand die de constructie kan bieden. De unity check moet kleiner zijn dan 1. In formulevorm:

$$u.c. = \frac{E_d}{R_{fi,d,o}}$$

waarin:

E_d belasting bij normale temperatuur

De belasting bij normale temperatuur is gelijk aan 1,2 G (permanente belastingen) opgeteld met $\Psi_t \times 1,3 Q$ (variabele belastingen). Deze belastingfactoren zijn van toepassing voor industriefuncties (rekening gehouden met Ψ_t vanwege een kortere referentieperiode van 15 jaar). Voor sneeuw is de Ψ_t gelijk aan 0,87.

Vanwege de grote liggerhoogte van stalen plaatliggers is de sterkte eerder maatgevend dan de stijfheid. De unity check van de sterkte zal de 1,0 benaderen. Indien de doorbuiging maatgevend is, zal de unity check van de sterkte verder van 1,0 afwijken.

Verband tussen de unity check en de benuttinggraad

De rekenwaarde van de weerstand van een constructie bij een normale temperatuur kan worden beschreven als de belastingen die werken op de constructie gedeeld door de unity check van de sterkte van een constructieonderdeel.

$$R_{fi,d,o} = \frac{E_d}{u.c.}$$

Door het combineren van beide formules kan de benuttinggraad worden omschreven als:

$$\mu_0 = \frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,o}} = \frac{E_{f_i,d}}{E_d \cdot (u.c.)^{-1}} = u.c. \cdot \frac{E_{f_i,d}}{E_d} = u.c. \cdot \frac{G + 0,2Q}{1,2G + 1,13G}$$

Bij deze formule is rekening gehouden met belastingen conform de NEN 6702 [5]. De belastingcoëfficiënten wijken af van die van de Eurocodes.

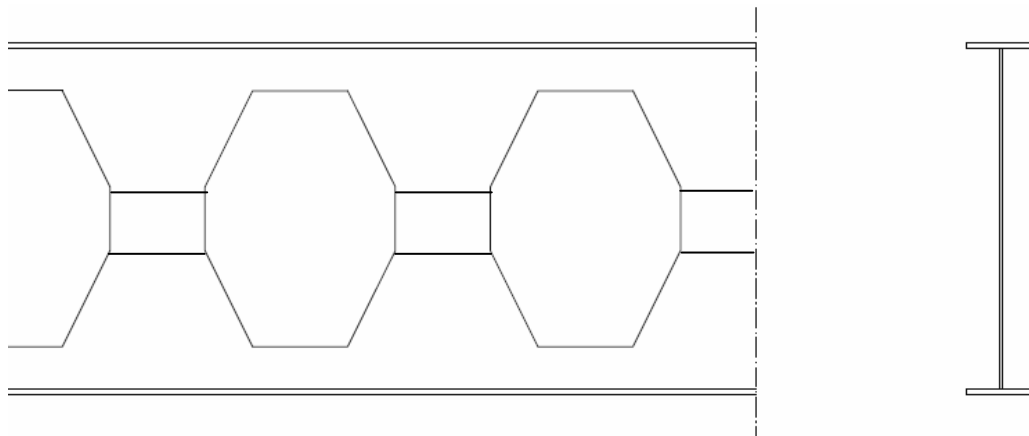
Eerder is aangegeven dat de u.c. van stalen plaatliggers 1,0 kan benaderen. Uit de omschreven formule van de benuttinggraad is af te leiden dat de benuttinggraad van stalen plaatliggers hierdoor relatief hoog zal zijn.

6.6. Vergelijking brandwerendheid van liggers met alternatieve profielen

In deze paragraaf zal de brandwerendheid van stalen plaatliggers vergeleken worden met de brandwerendheid van een raatligger en een vakwerkligger. Hierbij worden de liggers getoetst aan de standaard-brandkromme.

6.6.1. Raatligger

De profielfactor is bepaald door de aangestraalde oppervlakte per strekkende meter te delen door het volume van één strekkende meter raatligger (figuur 36).



Figuur 36 Raatligger

Gegevens IPE 600 met tussenschot $h = 200\text{mm}$

$t_f = 19\text{ mm}$ $t_w = 12\text{ mm}$ a (breedte raat) $= 150$

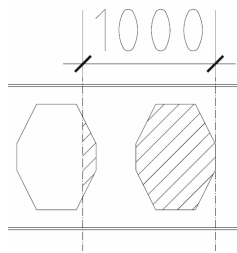
Gewicht $= 125 + 0,2 \times 0,012 \times 7800 = 144\text{ kg/m}$

Volume per strekkende meter profiel:

$$G = 144\text{ kg / m}^1 \rightarrow V = G / \rho = 144\text{ kg.m}^{-1} / 7800\text{ kg.m}^{-3} = 0,018\text{ m}^3 / \text{m}^1$$

Aangestraalde oppervlakte per strekkende meter profiel:

Het aantal m^2 aan openingen aanwezig per m^1 moet afgetrokken worden van de totale oppervlakte. Het niet aanwezige staal is gearceerd in figuur 37.



Figuur 37 Aftrek niet aanwezige staal per meter raatligger

$$A_{\text{opening}} = 0,43 \text{ m}^2 \text{ per m}^1$$

$$A_m = 2 \times (A_{\text{lijf}} - A_{\text{raat}}) + 4 \times A_{\text{flens}} = 2 \times (1,062 \text{ m}^1 \times 1,0 \text{ m}^1 - 0,43 \text{ m}^2) + 4 \times 0,22 \text{ m}^2 = 2,144 \text{ m}^2$$

Dus wordt de profielfactor:

$$P = \frac{A_m}{V} = \frac{2,144}{0,018} = 119 \text{ m}^{-1}$$

De kritieke staaltemperatuur volgt uit de benuttinggraad.

Rekenwaarde van het maximaal op te nemen moment bij kamertemperatuur:

$$M_{r;d} = W_y \cdot f_y = 6867 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 = 1614 \text{ kNm}$$

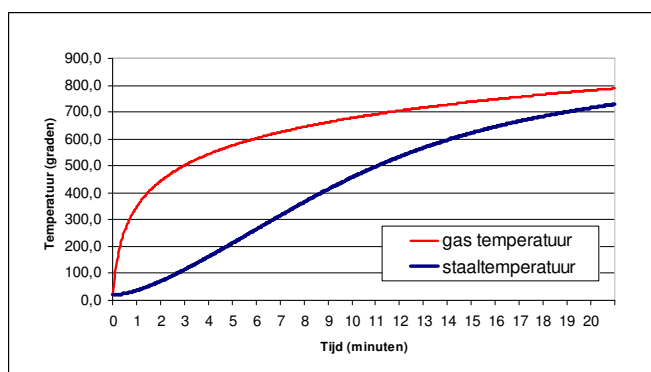
Rekenwaarde van de belasting bij brand: $q_d = 1 \times (0,25 \times 5 + 0,6) = 1,85 \text{ kN/m}$

Rekenwaarde van het moment bij brand: $M_{s;d} = 1/8 \times 1,85 \text{ kN/m} \times 35^2 = 283 \text{ kNm}$

Met behulp van de benuttinggraad is conform de EN 1993-1-2 [4] de kritieke staaltemperatuur te bepalen.

$$\mu_0 = \frac{M_{s;d}}{M_{r;d}} = \frac{283 \text{ kNm}}{1614 \text{ kNm}} = 0,18 \Rightarrow \theta_{a;cri} = 711^\circ\text{C}$$

Het verloop van de staaltemperatuur tijdens een brand volgens de standaardbrand is hieronder weergegeven.



Figuur 38 Verloop staaltemperatuur raatligger; $A_m/V = 119 \text{ m}^{-1}$ uitgaande van een standaardbrand

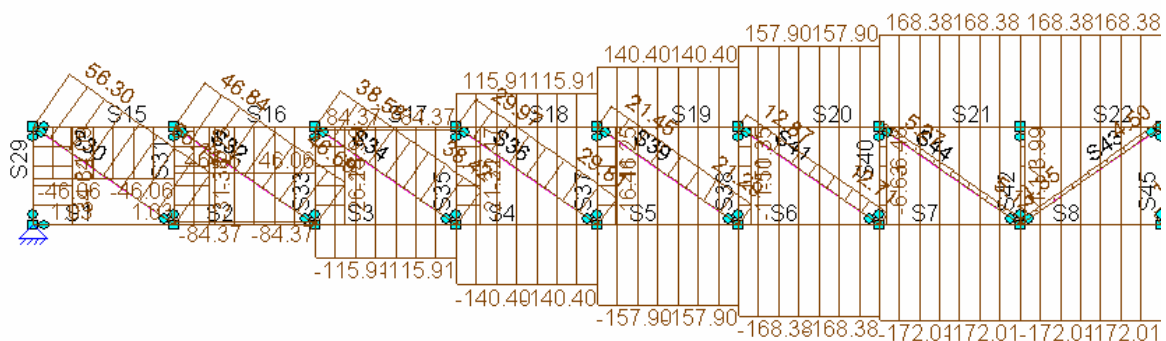
De standaard-brandwerendheid van de raatligger (met een kritieke staaltemperatuur van 711°C) is circa 20 minuten. De raatligger in dit voorbeeld heeft dus volgens de gestelde werkhypothese in hoofdstuk 5 voldoende brandwerendheid.

6.6.2. Vakwerkligger

De vakwerkligger is opgebouwd uit HE160A profielen voor de bovenregels en HE140A voor de onderregels. De diagonalen bestaan uit buis profielen (CHS 76,1 x 5). De bovenregel zal op druk worden belast.

De berekening van de krachten in de vakwerkligger is uitgevoerd met Matrix Frame 4.3. De berekening is te vinden in bijlage G. Hierin zijn alle bijzondere belastingcombinaties uitgerekend. Omdat windzuiging positief werkt t.o.v. het eigen gewicht is de belasting van het eigen gewicht (representatief) maatgevend. De maatgevende krachten in de 3 profielen is:

Bovenregel:	HE160A	172 kN Druk (kniklengte zwakke richting = 5 meter)
Diagonalen:	CHS 76,1 x 5	56 kN Trek
Onderregel:	HE140A	168 kN Trek



Figuur 39 Normalkrachten in staven (helft vakwerkligger) bij belastingen in rekening te brengen bij brandomstandigheden

De berekening van de standaard-brandwerendheid van de verschillende staven is uitgevoerd met Brawesta. De resultaten van deze berekening zijn eveneens te vinden in bijlage G. Hierna een overzicht van de brandwerendheid van de verschillende profielen:

Bovenregel:	HE160A	10 minuten
Diagonalen:	CHS 76,1 x 5	24 minuten
Onderregel:	HE140A	16 minuten

De bovenregel zal rekenkundig bezwijken na 10 minuten. Na het bezwijken van de bovenregel zal de totale vakwerkconstructie geen voldoende draagkracht meer hebben. De brandwerendheid van de vakwerkligger is circa 10 minuten.

7. Optimalisatie brandwerendheid stalen plaatliggers

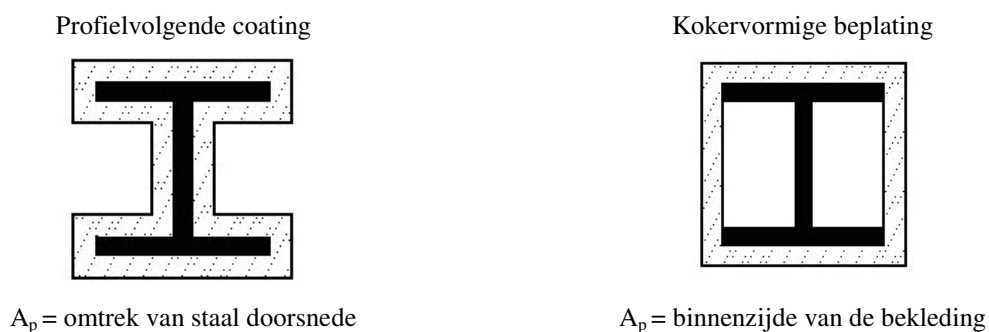
Indien er geen restricties gedaan kunnen worden aan de brandgroeisnelheid zal de brandwerendheid van de ligger verhoogd moeten worden. In dit hoofdstuk zal gezocht worden naar een optimalisatie van de thermische of mechanische response van stalen plaatliggers. Er wordt hierbij uitgegaan van de thermische response onder standaard-brandomstandigheden. Om een algemeen geldende beschouwing te geven wordt uitgegaan van een kritieke staaltemperatuur van 350 °C [4].

7.1. Effect ligger geometrie

De profielfactor voor plaatliggers met zeer hoge lijfslankheid ligt ongeveer tussen de 400 en 500 m¹. De standaard-brandwerendheid is lager dan 5 minuten. Door het verhogen van de plaatdikte zal een hogere profielfactor worden verkregen. Het doel van dit onderzoek is echter de gevolgen van de mogelijkheden van het verhogen van de maximale lijfslankheid te onderzoeken. De gevolgen van het dikker maken van het profiel zal dus niet worden onderzocht.

7.2. Effect isolatie

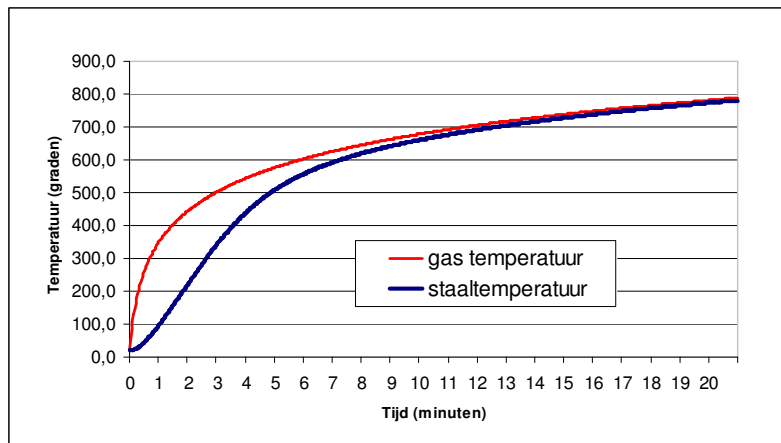
Met isolatie kan de ontwikkeling van de staaltemperatuur worden vertraagd. Stalen plaatliggers kunnen worden beschermd met coating of platen [18]. De mogelijkheden van bekleden worden weergegeven in figuur 40.



Figuur 40 Mogelijkheden m.b.t. de bekleding van het staal oppervlak

Het effect van de isolatie op de thermische response van het staalprofiel zal worden onderzocht. Voor de verschillende opties zal een stalen plaatligger aangenomen worden met de volgende afmetingen: lijf: 1600x2; flenzen: 400x6. De profielfactor (A_m/V) voor het onbeklede profiel is 603 m¹.

De ontwikkeling van de staaltemperatuur van het onbeklede profiel zal, indien onderworpen aan een standaardbrand, verlopen volgens figuur 41.



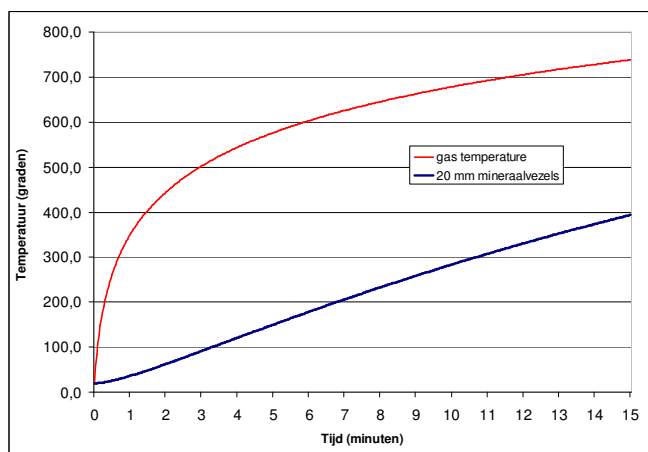
Figuur 41 Ontwikkeling staaltemperatuur onbekleed stalen plaatligger (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) onderworpen aan een standaardbrand

7.2.1. Profielvolgende bekleding

Profielvolgende bekleding is mogelijk door platen direct tegen het staalprofiel te bevestigen of een coating aan te brengen op het staaloppervlak. Een voorbeeld van brandwerende bekleding is steenwol beplating. Door een materiaal aan te brengen met een lage thermische geleiding kan de opwarming van de staaltemperatuur worden vertraagd.

Er moet echter opgemerkt worden dat in de praktijk verlies in de beschermende capaciteit van de bekleding op kan treden. Dit is mogelijk door schade die tijdens een brand aan de bekleding kan optreden zoals: scheuren, onthechten of vochttransport.

De ontwikkeling van de staaltemperatuur van een stalen plaatligger bekleed met 20 mm mineraalvezelplaten is in figuur 42 weergegeven.



Figuur 42 Staaltemperatuur stalen plaatligger (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) met 20 mm mineraalvezel beplating onder standaardbrandomstandigheden

Het effect van bekleding is zeer goed zichtbaar. Met minimaal 20 mm mineraalvezelplaten is de standaard-brandwerendheid minimaal 12 minuten. Deze brandwerendheid is genoeg om, uitgaande van de werkhypothese, voldoende tijd te garanderen om het gebouw te ontvluchten.

Profielvolgende bescherming tegen brand is tevens mogelijk met coating. Voorbeelden hiervan zijn spuitlagen of opschuimende verven.

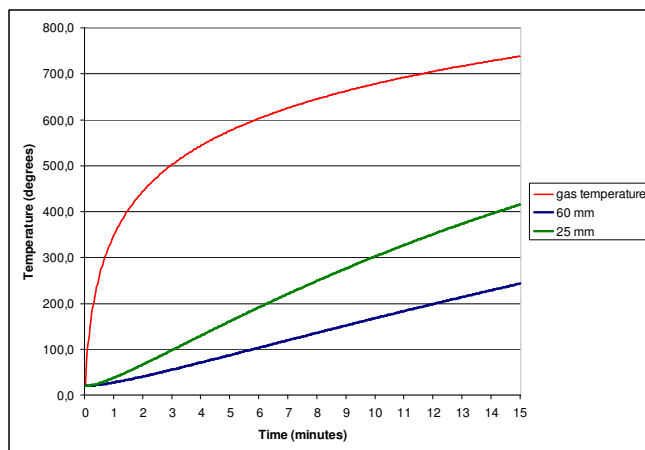
7.2.2. Kokervormige beplating

Het aanbrengen van profielvolgende beplating is een arbeidsintensief proces. Er kan ook worden gekozen om de beplating kokervormig om het profiel aan te brengen. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld steenwol platen gebruikt worden.

Hierna zal de ontwikkeling van de staaltemperatuur van een plaatligger bekleed met 25 en 60 mm steenwol isolatie onderzocht worden. De profielfactor kan hierbij gereduceerd worden, omdat de binnenzijde van het profiel afgeschermd wordt. De nieuwe profielfactor wordt hiermee:

$$A_p = 2 \times 1,6 + 2 \times 0,4 = 4; V = 0,008 \text{ m}^3 \rightarrow A_p/V = 500 \text{ m}^{-1}$$

In figuur 43 is de ontwikkeling van de staaltemperatuur van de stalen plaatligger met 25 of 60 mm steenwol platen weergegeven.



Figuur 43 Staaltemperatuur stalen plaatligger (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6) met 25 of 60 mm steenwol platen onder standaard-brandomstandigheden

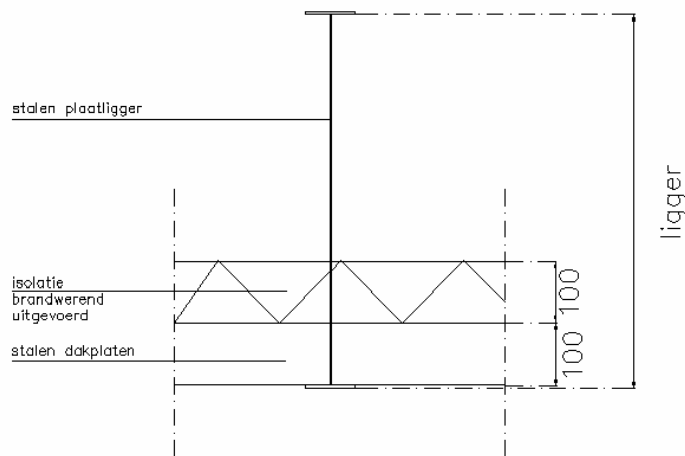
Met een bekleding van 25 mm steenwol platen wordt een brandwerendheid gerealiseerd van 11 minuten. Deze brandwerendheid zal, uitgaande van de werkhypothese, voldoende zijn.

7.3. Effect bouwkundige integratie

Door het plaatsen van een gedeelte van de steelconstructie buiten het gebouw (in de buitenlucht, buiten de brandruimte) kan het grootste gedeelte van de steelconstructie worden afgeschermd van de brand. Bijvoorbeeld

optie 4 of 5 zoals besproken is in hoofdstuk 3. Als het dak wordt gebruikt voor bescherming van de plaatligger, zal het dak een hogere brandwerendheid moeten hebben dan de constructie zelf.

In figuur 44 is een voorbeeld gegeven van de mogelijke plaatsing van het dak ten opzichte van de constructie. Hierbij wordt het grootste gedeelte van de constructie buiten de brandruimte geplaatst.

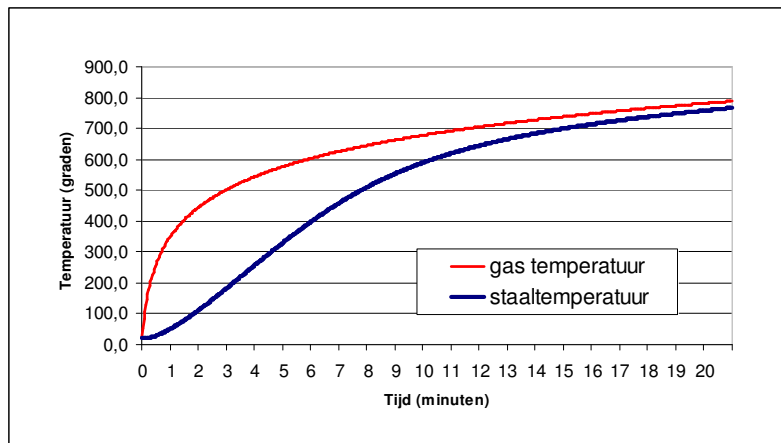


Figuur 44 Stalen plaatligger met het grootste gedeelte boven het dak (in een niet besloten ruimte)

Er zijn geen eenvoudige rekenmodellen beschikbaar om de temperatuursontwikkeling van de ligger te onderzoeken waarbij alleen het onderste gedeelte van de ligger wordt blootgesteld aan vlammen en het bovenste gedeelte afgekoeld wordt door de buitenlucht. Hierbij is namelijk sprake van een ongelijkmatige verdeling van de staaltemperatuur over de doorsnede van de ligger. Er zijn geavanceerde computerprogramma's (zoals DIANA) beschikbaar om de exacte temperatuursontwikkeling in het profiel te modelleren.

Voor een veilige benadering zal echter het volume van de ligger waarover de warmte wordt verspreid worden gereduceerd tot alleen de onderste flens. De plaatligger die getoetst is heeft de volgende afmetingen: lijf: 1600 x 2, flenzen: 400 x 6. De aan brand blootgestelde omtrek wordt hiermee 812 mm, het volume van de onderflens is $2400 \text{ mm}^3/\text{mm}^1$, zodat de profielfactor (A_m/V) 338 m^{-1} zal zijn.

In figuur 45 is de ontwikkeling van de staaltemperatuur weergegeven waarbij een gedeelte van de ligger boven het dak uitsteekt.



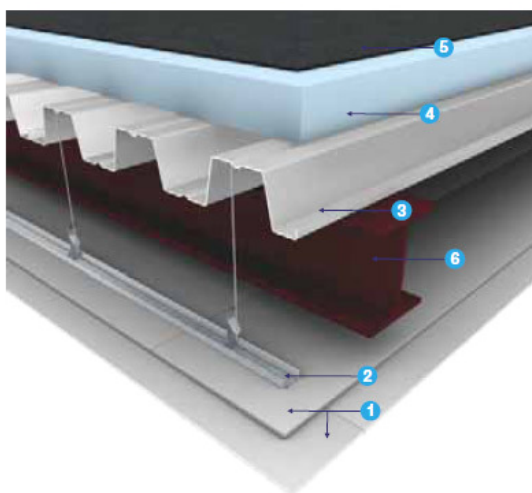
Figuur 45 Staaltemperatuur stalen plaatligger met gedeelte buiten dak ($A_m/V = 338 \text{ m}^{-1}$)

De standaard-brandwerendheid van de ligger is (bij een kritieke temperatuur van 350°C) 5 minuten, dus onvoldoende om zonder verdere optimalisatie toegepast te kunnen worden. Tevens zal door het plaatsen van de constructie boven de dakbedekking het maken van een waterdichte aansluiting onnodig lastig worden.

7.4. Effect bescherming door een hittescherm

Door het plaatsen van een (verlaagd) plafond onder de constructie door zal de temperatuur in de ruimte tussen het plafond en het dak langzamer opwarmen dan de temperatuur onder het plafond. In kantoorgebouwen is het gebruikelijk om een verlaagd plafond toe te passen voor het wegwerken van constructiedelen en installaties. In (industrie) hallen is het zeldzaam om van een verlaagd plafond uit te gaan.

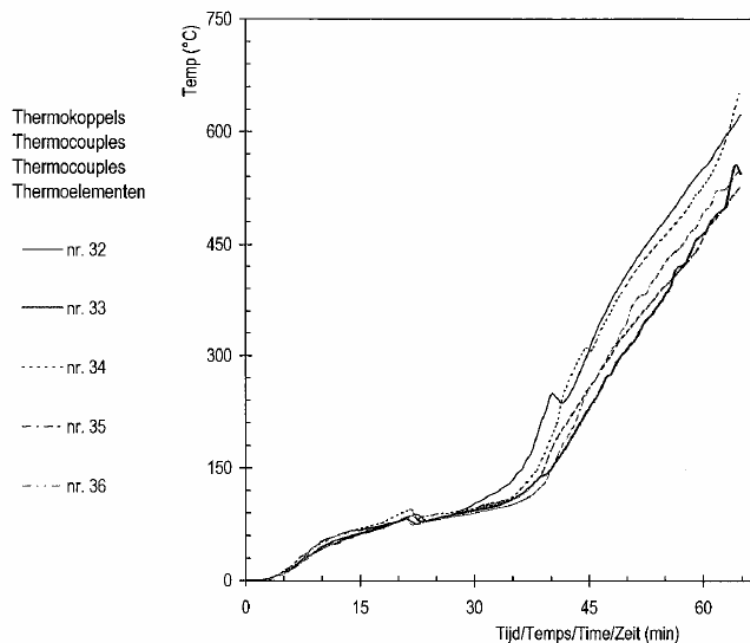
Er zal in het kader van dit onderzoek toch gekeken worden naar de temperatuursontwikkeling in het staal indien er een plafond onder de liggers wordt aangebracht. Een voorbeeld van een verlaagd plafond is gegeven in figuur 46.



Figuur 46 Voorbeeld verlaagd plafond met brandwerende beplating [10]

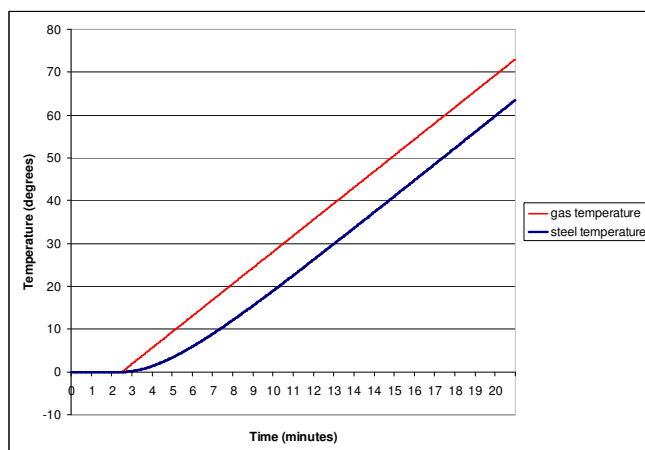
De berekening van de ontwikkeling van de staaltemperatuur is gelijk aan de berekening van een onbekleed staalprofiel, waarbij voor de omgevingstemperatuur de temperatuur van de ruimte boven het plafond kan worden aangehouden. De temperatuur boven het plafond wordt opgegeven door de fabrikant. Deze worden in opdracht van de fabrikant getest door een onafhankelijke partij die de ontwikkeling van de temperatuur van een proefopstelling meten bij blootstelling aan de standaard-brandkromme.

Voor dit onderzoek is een rapport van TNO gebruikt (rapport 2000-CVB R01506 [19]) waarbij de temperatuur wordt opgegeven bij een test volgens een bepaalde proefopstelling.



Figuur 47 Temperatuurontwikkeling van de spouw tijdens een proefopstelling

Met deze omgevingstemperatuur kan een berekening worden gemaakt van de ontwikkeling van de staaltemperatuur. In figuur 48 is de staaltemperatuur weergegeven op basis van de temperatuurontwikkeling in de spouw.



Figuur 48 Stalen plaatligger met brandwerend plafond (lijf = 1600x2; flenzen: 400x6)

Na het plaatsen van het brandwerend plafond zal de brandwerendheid meer dan 20 minuten bedragen. Na 20 minuten blootstelling aan de standaard-brand zal de staaltemperatuur nog geen 70 °C bedragen. De kritieke staaltemperatuur van 350 °C wordt, zelfs na 45 minuten nog niet in de spouw tussen het plafond en de dakplaten gemeten.



Figuur 49 Detail van de aansluiting van de brandwerende platen

Hierbij dient het plafond echter in de praktijk goed aangebracht te worden. Afwijking in de uitvoering kan resulteren in onvoldoende brandwerendheid. Figuur 46 laat een detail zien van de vereiste aansluiting van de brandwerende platen in het plafond.

Vanwege de hoge kosten voor het aanbrengen van een verlaagd plafond onder de constructie, zal deze oplossing niet realistisch zijn.

7.5. Veranderen staalsoort (verhogen sterkte)

Indien de sterkte-eis maatgevend is, kan het efficiënt zijn te ontwerpen met een hogere staalsoort. Door hogere toelaatbare spanningen is het mogelijk minder staal te gebruiken in de doorsnede. Dit onderzoek richt zich op stalen plaatliggers waarbij een hogere lijfslankheid wordt toegestaan. Bij het veranderen van de staalsoort zal hierbij alleen gekeken worden naar een situatie waarbij de slankheid groter kan zijn dan met de huidige normen mogelijk is.

Het veranderen van de staalsoort zal geen effect hebben op de totale sterkte van het profiel, als de ligger optimaal gedimensioneerd is zal de unity check rond de 1 liggen, en de benuttinggraad van het profiel niet veranderen. Het zal dus theoretisch mogelijk zijn dat door het veranderen van de staalsoort de lijfslankheid van de ligger vergroot kan worden. Door het lagere staalvolume (en een hogere profielfactor) zal het staal - bij brandomstandigheden - sneller opwarmen dan een meer gedrongen profiel.

Daarnaast zal bij een staaltemperatuur van ongeveer 700 °C de mechanische eigenschappen van staal met 80% afnemen. Het is aannemelijk dat het profiel de belastingen waarmee gerekend moet worden voor een toetsing

tijdens brandomstandigheden niet voldoende capaciteit bezit om voldoende weerstand te bieden bij deze temperatuur. Ook liggers met een hogere staalsoort zullen bij deze temperaturen bezwijken (na ongeveer 10 minuten volgens de standaard-brandkromme).

7.6. Conclusie optimalisatie brandwerendheid stalen plaatliggers

Het effect van het veranderen van de geometrie van de liggers is niet doeltreffend. De keuze van dikkere staalplaten zal niet direct een voldoende brandwerendheid tot gevolg hebben. Het plaatsen van de ligger boven een brandwerend dak kan de brandwerendheid van de ligger niet vergroten tot een acceptabel niveau.

Een manier om een voldoende brandwerendheid te verkrijgen is het brandwerend isoleren van het profiel. Verschillende mogelijkheden om de ligger te isoleren zijn besproken in dit hoofdstuk. Door het plaatsen van beschermende materialen dicht bij het profiel (kokervormig of profielvolgend) kan een brandwerendheid worden bereikt van ongeveer 12 minuten. Door het plaatsen van een verlaagd plafond kan de brandwerendheid van het profiel worden verhoogd tot meer dan 20 minuten.

8. Conclusies en aanbevelingen

Het verhogen van de maximale lijfslankheid van stalen plaatliggers heeft direct gevolgen voor de brandwerendheid van de ligger. Door het dunner maken van het lijf, zal de profielfactor van de stalen plaatligger worden verhoogd, en zal het staal tijdens een brand sneller opwarmen. Door een snellere verhoging van de staaltemperatuur zal de kritieke staaltemperatuur eerder worden bereikt en de ligger bezwijken.

De standaard-brandwerendheid van stalen plaatliggers met een hoge profielfactor ($A_m/V > 250$) is minder dan 5 minuten. Dit is volgens de werkhypothese - geformuleerd in dit rapport - onvoldoende om de gebruikers voldoende tijd te geven om uit het gebouw te vluchten, en brandweerlieden tijd hebben het gebouw te doorzoeken.

Er is in dit onderzoek een parameterstudie gedaan voor verschillende brandscenario's in een fictieve industriehal. Uit deze parameterstudie is geconcludeerd dat de tijd tussen het begin van de brand en het bereiken van de kritieke staaltemperatuur van 350 °C sterk afhankelijk is van de branduitbreidingssnelheid. De branduitbreidingssnelheid kan worden gekwantificeerd met de tijdconstante (t_a). De tijdconstante wordt aangegeven als de tijd waarin de oppervlakte van de brand gegroeid is tot een oppervlakte met een effectieve hoeveelheid warmteafgifte van 1 MW.

Voorbeelden van hallen met een langzame branduitbreidingssnelheid zijn opslag van staal / steen. Een hoge branduitbreidingssnelheid is te verwachten in industriehallen met veel hout / papieropslag. Bijvoorbeeld postzakken of gestapeld hout. Een ultrasnelle branduitbreiding is te verwachten in een chemische fabriek of een opslag met gestoffeerde meubelen. E.e.a. is weergegeven in tabel 5.

Branduitbreidingssnelheid	Omstandigheden	t_a
Traag	Plaatselijke vuurbelasting	600 s
Matig	Katoen / polyester	300 s
Snel	Volle postzakken Kunststofschuim Gestapeld hout Paletten	150 s
Ultra-snel	Methyl alcohol Vloeistof brand, faster Gestoffeerde meubelen	75 s

Tabel 5 Voorbeelden van gebouwen met verschillende branduitbreidingssnelheden

Er is in dit onderzoek gezocht naar een grenswaarde van de tijdconstante waarbij aangenomen kan worden dat de gebruikers voldoende tijd hebben de industriehal te verlaten en de brandweer het gebouw kan doorzoeken.

Bij wijze van werkhypothese is in dit onderzoek ondersteld dat voor industriehallen een brandwerendheid van 20 minuten, gerekend vanaf het begin van de brand, voldoende is. Voor het specifieke brandcompartiment en de stalen plaatligger in dit onderzoek is gebleken dat bij een minimale tijdconstante van 160 seconden de kritieke staaltemperatuur van 350 °C wordt bereikt na 20 minuten. Indien een brand zich uitbreidt met een snelheid die behoort bij een tijdconstante van 160 seconden of groter hebben de gebruikers dus voldoende tijd, dat wil zeggen minimaal 20 minuten gerekend vanaf het begin van de brand, om uit het gebouw te vluchten. Tevens kan de brandweer binnen deze tijd het gebouw doorzoeken.⁵

Aanbevolen wordt om stalen plaatliggers met grote lijfslankheid toegepast als dakligger in industriegebouwen te accepteren met inachtneming van het volgende. Voor bouwaanvragen van industriehallen waar een tijdconstante (t_a) korter dan 160 seconden verwacht wordt, dient de ontwerper aan te tonen dat de constructie een minimale brandwerendheid bezit van 5 minuten (berekend met de standaard brand-kromme). Indien de tijdconstante (t_a) langer is dan 160 seconden kan de industriehal gebouwd worden zonder een extra eis te stellen aan de brandwerendheid van de plaatligger. Wel dient gecontroleerd te worden of er een snelle inzet van de brandweer mogelijk is.

Indien er een snelle branduitbreiding kan worden verwacht, is het mogelijk de branduitbreidingssnelheid in een industriehal te verlagen. Bijvoorbeeld door het beperken van het branduitbreidingsgebied. Verschillende oplossingen hiervoor zijn gegeven in de methode BvB 2007 [15].

Bij het niet mogelijk zijn van het verlagen van de branduitbreidingssnelheid en de ligger onvoldoende brandwerendheid bezit, zal er gekozen moeten worden voor het verhogen van de brandwerendheid. Aanbevolen wordt om brandwerende isolatie te plaatsen, om de opwarming van het staal te vertragen. Hierbij zal de economische winst van het verhogen van de maximale lijfslankheid vergeleken moeten worden met de kosten van het verhogen van de brandwerendheid door middel van isolatie. Het verhogen van de brandwerendheid kan natuurlijk ook door het verlagen van de maximale lijfslankheid van de stalen plaatliggers.

Overige oplossingen om de brandwerendheid te vergroten zijn - in industriehallen - niet praktisch of simpelweg te duur, zodat de economische winst van het verhogen van de maximale lijfslankheid wordt tenietgedaan.

Als vervolgonderzoek kan een document worden opgesteld van industriehallen met verschillende functies en groottes. Voor al deze verschillende hallen kan onderzocht worden wat de branduitbreidingssnelheid voor het specifieke geval is. Met behulp van de branduitbreidingssnelheid van een bepaalde hal is het mogelijk om de vergunningtoetsers een beslissing te laten nemen of het noodzakelijk is dat de brandwerendheid van het staalprofiel aangetoond wordt.

⁵ Hierbij is snelle melding van de brand noodzakelijk (bijvoorbeeld in de vorm van automatische detectie in combinatie met doormelding naar de brandweer).

Tevens kan worden onderzocht of het zinvol is om in het Bouwbesluit een minimale (expliciete) eis aan de hoofddraagconstructie te zetten. Hiermee is het mogelijk om bij innovatieve constructieprincipes de brandveiligheid van gebouwen te waarborgen.

Literatuurlijst

- [1] Eurocode 3, Design of steel structures. *Part 1.5 Plated structural elements* EN 1993-1-5, 2006
- [2] *Bouwbesluit 2003*, inclusief wijzigingen 1 januari 2011
- [3] Basler, K. Yen, *Results of an investigation of plate girders*, Fritz Engineering Laboratory Report No 251.25, 1962
- [4] Eurocode 3, Design of steel structures. *Part 1.2 Structural fire design* EN 1993-1-2, 2006
- [5] TGB 1990, Technische grondslagen voor bouwconstructies. *NEN 6702 Belastingen en vervormingen*, 2007
- [6] Bouwen met staal, *Overspannend staal deel 2 Construeren A (3^e druk)*, 2001
- [7] Eurocode 1, Actions on structures. *Part 1.2 Actions on structures exposed to fire* EN 1991-1-2, 2002
- [8] Cajot, L.G., Haller, M., Pierre, M., *Thermische en mechanische belastingen*, Difisek
- [9] Bouwen met staal, *Brand informatie systeem*, Geraadpleegd 23 maart 2011 via <http://www.brandveiligmetstaal.nl>
- [10] Promat, *Handboek Bouwkundige Brandpreventie*, 2009
- [11] Vambersky, Walraven, v.d. Kuilen, Raadschelders, Abspoel, Tomà., *Bundel hallenbouw*
- [12] PRC Bouwcentrum, *Vluchten bij brand uit grote compartimenten. Bepalingsmethode voor veilig vluchten*, 1997
- [13] TGB 1990, Technische grondslagen voor bouwconstructies, *NEN 6770 Staalconstructies – Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies*, 1997
- [14] TGB 1990, Technische grondslagen voor bouwconstructies, *NEN 6771 Staalconstructies – Stabiliteit*, 2001
- [15] Save, *Beheersbaarheid van Brand 2007 Deel 2: Toepassingsinstructie BvB*, 2007
- [16] Ministerie van binnenlandse zaken, directie brandweer en rampenbedstrijding, *Brandbeveiligingsconcept industriegebouwen*, 1995
- [17] NIBRA, *Vuurbelasting in industriegebouwen*, 1997
- [18] Hamerlinck, A.F., Twilt, L., *BmS cursus Toetsing van staalconstructies (deel gebouwen)*
- [19] Haar, P.W. van de, *Bepaling van de brandwerendheid volgens NEN 6069: 1997 van een houten vloer / plafond constructie met afgehangen houten plafonddragende regels met aan de onderzijde Promatect-100 platen*, 2001

Bijlage A

Constructief ontwerp van stalen plaatliggers bij normale temperatuur

Controle van de sterkte van de gekozen plaatligger

Afmetingen: Ijff: 1600 x 2 flenzen: 400 x 6

Slankheid $c / t = 800$

Profielklasse: Klasse 4 (slank)

Rekenmodel: eerste order elastisch

Berekening bij 20 °C

Ontwerp op sterkte met behulp van de doorsnede reductie methode:

Belastingen: permanent en sneeuw

Eigen gewicht dak: 0,25 kN/m²

Eigen gewicht ligger 0,6 kN/m¹

H.o.h. afstand spanten 5 m

Sneeuwbelasting 0,56 kN/m²

Rekenwaarde van de belasting: $q_d = 1,2 \times (0,25 \times 5 + 0,6) + 1,13 \times 0,56 \times 5 = 5,4 \text{ kN/m}$

$M_d = 1/8 \times 5,4 \text{ kN/m} \times 35^2 = 827 \text{ kNm}$

Berekening van de effectieve doorsnede voor het traagheidsmoment en het weerstandsmoment.

Buiging $\rightarrow \Psi_x = -1,00$

$k_{\sigma x} = 23,9$

$$\sigma_{i,k;x} = k_{\sigma x} \frac{\pi^2 E_d}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} = 23,9 \frac{\pi^2 21 \cdot 10^5}{12(1-0,3^2) \left(\frac{1600}{2}\right)^2} = 7,1 \text{ N/mm}^2$$

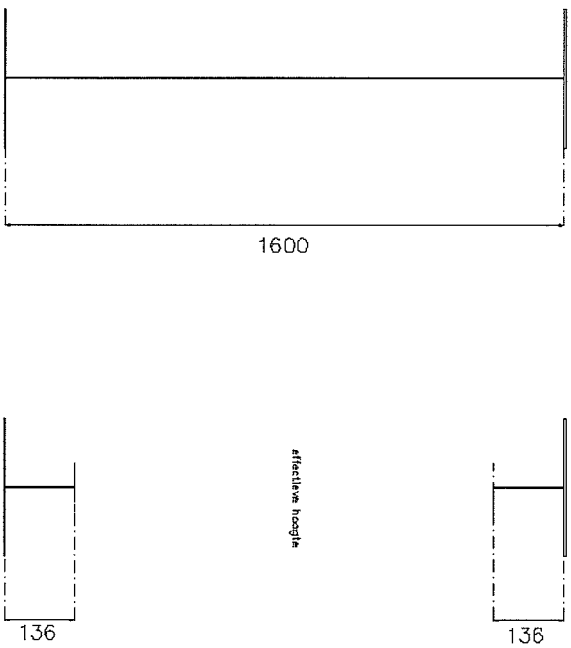
$$\lambda_{p,rel} = \sqrt{\frac{f_{y,d}}{\sigma_{i,k;x}}} = \sqrt{\frac{235}{7,1}} = 5,8$$

$$\rho = \frac{\lambda_{p,rel} - 0,22}{\lambda_{p,rel}^2} = \frac{5,8 - 0,22}{5,8^2} = 0,17$$

$$b_e = \rho b_c = \frac{\rho b}{1 - \psi_1} = \frac{0,17 \cdot 1600}{1 + 1} = 136$$

$b_{e1} = 0,4 \times b_e = 0,4 \times 136 = 54 \text{ mm}$

$b_{e2} = 0,6 \times b_e = 0,6 \times 136 = 82 \text{ mm}$



$$I_{y,e} = 2 \cdot 400 \cdot 6 \cdot 800^2 + \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot 1600^3 - \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot 1328^3 = 336433 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Deze benadering is zeer conservatief. Een hogere moment capaciteit van de ligger is zeer aannemelijk.

$$\sigma_{x;d} = \frac{M_{x;d} \cdot z_{y,e}}{I_{y,e}} = \frac{827 \cdot 10^6 \cdot 800}{336433 \cdot 10^4} = 197 \text{ N / mm}^2$$

$$u.c. = \frac{197}{235} = 0,84$$

De ligger voldoet.

Bijlage B

Constructief ontwerp van een raatligger bij normale temperatuur

Rinse Wiersum			
Projectnaam		Projectnummer	
Omschrijving		Constructeur	
Opdrachtgever		Eenheden	m, kN, kNm
Bestand	F:\Afstuderen\berekeningen\vaalijger.mxf		



Afb. Geometrie 1

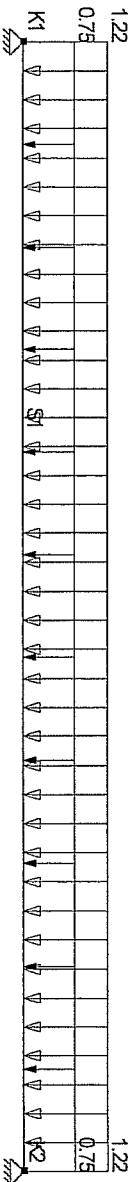
BEREKENING RAARLEGER
COMBINATIE EIGEN GEWICHT + SNEEUW

Staven										
Staaf	Knoop	Scharnier		Knoop	Profiel	X-B	Z-B	X-E	Z-E	Lengte
	B	B	E	E						
S1	K1	NVM	NVM	K2	P1	0,000	0,000	35,000	0,000	35,000
	-	-	-	-	-	m	m	m	m	m

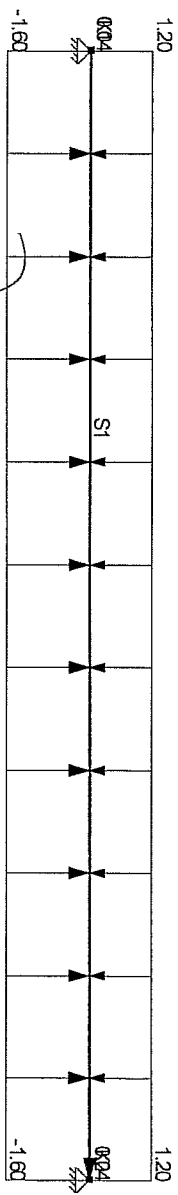
Opleggingen	Knoop	X	Z	Yr	HoekYr
O1	K1	vast	vast	vrj	0
O2	K2	vast	vast	vrj	0
		kN/m	kN/m	kN/mrad	°

Gewichtsberekening

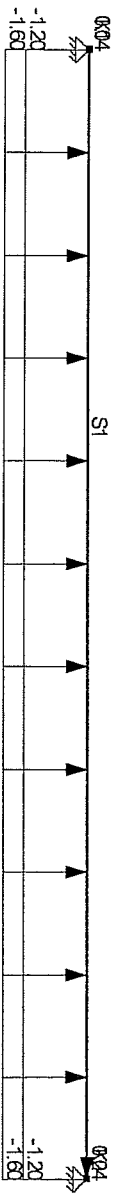
Index	Staven	Belastingen en vervormingen	Berekening	y/z Eenheden
C1	LR1	Systeemmaat	NEN6702	5,00
C2		Permanente Belasting Factor eigengewicht	NEN6702#7	1,00
Pp1	q1	Dak	0,15	0,15 [kN/m²]
LR2		Gegalv-golpl + gordingen Permanente Belasting	Pp1*C1	0,75 [kN/m]
Cq1		Wind van Links	NEN6702#8,6	1,00
Cd1		Cdlim t.b.v. Wind	NEN6702#8,6.5(0)	0,98
Pw1		Voor gedeelte < Gem. Breedte Gavel Druk/Zuiging	NEN6702#8,6.2(8,00, 2, ONBEROUWD)	0,81 [kN/m²]
Ce1	q2	Platdak	NEN6702#8,6.4.2.Fig.A.6(>n)	-0,40
		Cpe t.b.v. Plat dak achter	Cd1*Ce1*Pw1*Cq1*C1	-1,60 [kN/m]
Ci1	q3	T.b.v. Platdak achter	NEN6702#8,6.4.4(+,FALSE,TRUE)	0,30
Ci2	q4	Cpi t.b.v. Overdruk	Cd1*Ci1*Pw1*Cq1*C1*(-1)	-1,20 [kN/m]
		Overdruk	NEN6702#8,6.4.4(-,FALSE,TRUE)	-0,30
Cf1	q5	Cpi t.b.v. Onderdruk	Cd1*Ci2*Pw1*Cq1*C1*(-1)	1,20 [kN/m]
LR3		Onderdruk		
		Plat Dak, Wrijving	NEN6702#8,6.4.5(0)	0,01
		Plat Dak, Wrijving	Cd1*Cf1*Pw1*Cq1*C1	0,04 [kN/m]
		T.b.v. Platdak, Wrijving met		
		Sneeuwbelasting	NEN6702#8,7.2	
Cs1	q6	Platdak	NEN6702#8,7.2.1.B(a,c1)	0,80
Pt1		Platdak	NEN6702#8,7.2.1(Cs1)	0,56 [kN/m²]
q6		Prep voor Sneeuw	Pt1*C1	2,80 [kN/m]
		Platdak		



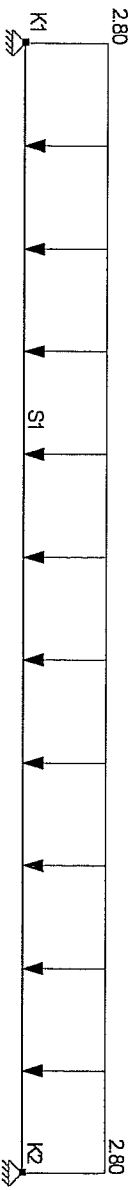
Afb. Lasten B.G.1 Permanente Belasting



Atb. Lasten B.G.2 Wind links + onderdruk



Atb. Lasten B.G.3 Wind links + overdruk



Atb. Lasten B.G.4 Sneeuwbelasting 1

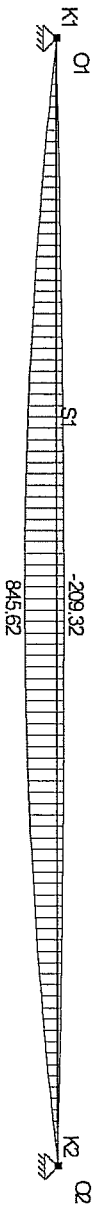
Belastingsgevallen

Type	Beginnwaarde	Eindwaarde	Beginnstand	Eindstand	Richting Staat of knoop
B.G.1: Permanente Belasting					
qG	1,22 (1.00x)	1,22 (1.00x)	0,000	35,000(L)	Z" S1
q	0,75 (q1)	0,75 (q1)	0,000	35,000(L)	Z" S1
Som lasten					
B.G.2: Wind links + onderdruk	X:	0,00 kN Z:	69,11 kN		
q	-1,60 (q2)	-1,60 (q2)	0,000	35,000(L)	Z' S1
q	1,20 (q4)	1,20 (q4)	0,000	35,000(L)	Z' S1
q	0,04 (q5)	0,04 (q5)	0,000	35,000(L)	X' S1
Som lasten					
B.G.3: Wind links + overdruk	X:	1,40 kN Z:	-13,96 kN		
q	-1,60 (q2)	-1,60 (q2)	0,000	35,000(L)	Z' S1
q	-1,20 (q3)	-1,20 (q3)	0,000	35,000(L)	Z' S1
q	0,04 (q5)	0,04 (q5)	0,000	35,000(L)	X' S1
Som lasten					
B.G.4: Sneeuwbelasting 1	X:	1,40 kN Z:	-97,72 kN		
q	2,80 (q6)	2,80 (q6)	0,000	35,000(L)	Z S1
Som lasten	X:	0,00 kN Z:	98,00 kN	m	--

Fundamenteel Belastingscombinaties

B.G.	Omschrijving	Fu.G.1	Fu.G.2	Fu.G.3	Fu.G.4
B.G.1	Permanente Belasting	1,20	0,90	1,20	1,35
B.G.2	Wind links + onderdruk	1,13	-	-	-
B.G.3	Wind links + overdruk	-	1,13	-	-
B.G.4	Sneeuwbelasting 1	-	-	1,13	-

1.13
46 = 0,87



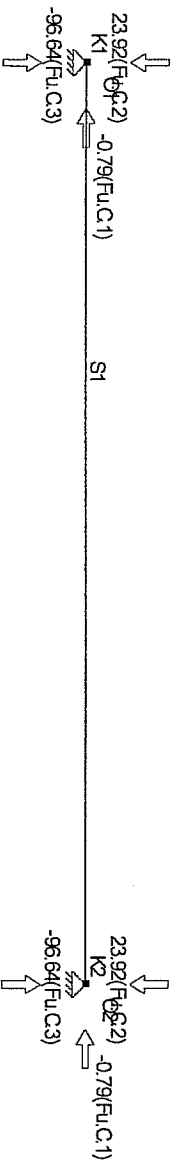
Afb. Fu.C. Momenten (My) Omhullende



Afb. Fu.C. Dwarskracht (Vz) Omhullende

Fu.C. Extreme staafkrachten

Staaf	B.C.	Mb	Mmax	x Mmax	Me	x-M0	x-M0 T/D	Nmax	Vb	Vmax	Ve
S1	Fu.C.1	0.00	294.04	17.500	0.00	0.000	0.000 T	0.79	33.60	-33.60	-33.60
S1	Fu.C.2	0.00	-209.32	17.500	0.00	0.000	0.000 T	0.79	-23.92	-23.92	23.92
S1	Fu.C.3	0.00	845.62	17.500	0.00	0.000	0.000	0.00	96.64	96.64	-96.64
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



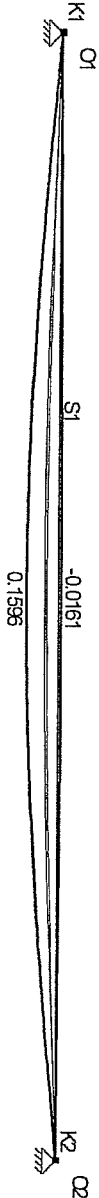
Afb. Fu.C. Oplegreacties Omhullende

Fu.C. Extreme oplegreacties

Oplegging	Knoop	B.C.	Xmax	Z	My B.C.	X	Zmax	My B.C.	X	Z	My	Mymax
O1	K1	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00Fu.C.2	-0.79	23.92	0.00	-	-	-	-
O1	K1	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00Fu.C.3	0.00	-96.64	0.00	-	-	-	-
O2	K2	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00Fu.C.2	-0.79	23.92	0.00	-	-	-	-
O2	K2	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00Fu.C.3	0.00	-96.64	0.00	-	-	-	-
Globale extreme waarden												
O2	K2	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00	-	-	-	-	-	-	-
O2	K2	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00Fu.C.2	-0.79	23.92	0.00	-	-	-	-
O2	K2	Fu.C.1	-0.79	-33.60	0.00Fu.C.3	0.00	-96.64	0.00	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Incidenteel Belastingscombinaties

B.G.	Omschrijving	In.C.0n	In.C.1	In.C.2	In.C.3
B.G.1	Permanente Belasting	1.00	1.00	1.00	1.00
B.G.2	Wind links + onderdruk	-	0.87	-	-
B.G.3	Wind links + overdruk	-	-	0.87	-
B.G.4	Sneeuwbelasting 1	-	-	-	0.87



Afb. In.C. Verplaatsingen Omluillende

In.C. Extreme doorbuigingen

Staat	B.C.	Knoop Begln		Staat		Knoop Eind	
		X	Z	Z'afst	Z'	X	Z
S1	In.C.2	0,000	0,000	17,500	-0.0161	0,000	0,000
S1	In.C.3	0,000	0,000	17,500	0.1596	0,000	0,000
-	-	m	m	m	m	m	m

Momentaan Belastingcombinaties

B.G.	Omschrijving	Mo.C.1
B.G.1	Permanente Belasting	1.00
B.G.2	Wind links + onderdruk	-
B.G.3	Wind links + overdruk	-
B.G.4	Sneeuwbelasting 1	-

Unity Check

Staalcontrole volgens NEN6770/6771

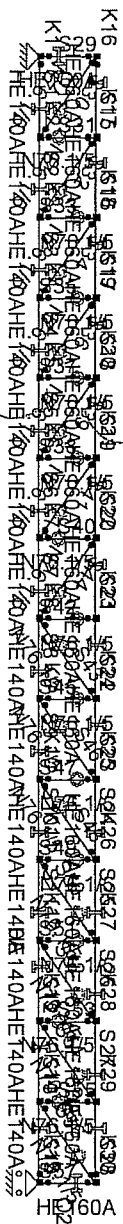
Veld	Toetsing	Combinatie	Formule	Max Unity Check
C1-V1 (0.000-35.000)	Doorsnede	Fu.C.3	Controle 2c: Dwarskracht om de zwakke as	0,94

Bijlage C

Constructief ontwerp van een vakwerkligger bij normale temperatuur

Rinse Wiersum			
Projectnaam			
Omschrijving		Projectnummer	
Opdrachtgever		Constructeur	
Bestand	F:\studeren\berekeningen\vakwerk.mxf	Eenheden	m, kN, kNm

KNIJPLENGTE 2 RICHTING = 5m'



Afb. Geometrie 1

Staven		Knoop		Scharnier	Knoop		Profiel	X-B	Z-B	X-E	Z-E	Lengte
Staat	B	B	E	E								

S1	K1	NV-	NVM	K2	P3	0,000	7,750	2,500	7,750	2,500	2,500	
S2	K2	NVM	NVM	K3	P3	2,500	7,750	5,000	7,750	7,750	2,500	
S3	K3	NVM	NVM	K4	P3	5,000	7,750	7,500	7,750	7,750	2,500	
S4	K4	NVM	NVM	K5	P3	7,500	7,750	10,000	7,750	7,750	2,500	
S5	K5	NVM	NVM	K6	P3	10,000	7,750	12,500	7,750	7,750	2,500	
S6	K6	NVM	NVM	K7	P3	12,500	7,750	15,000	7,750	7,750	2,500	
S7	K7	NVM	NVM	K8	P3	15,000	7,750	17,500	7,750	7,750	2,500	
S8	K8	NVM	NVM	K9	P3	17,500	7,750	20,000	7,750	7,750	2,500	
S9	K9	NVM	NVM	K10	P3	20,000	7,750	22,500	7,750	7,750	2,500	
S10	K10	NVM	NVM	K11	P3	22,500	7,750	25,000	7,750	7,750	2,500	
S11	K11	NVM	NVM	K12	P3	25,000	7,750	27,500	7,750	7,750	2,500	
S12	K12	NVM	NVM	K13	P3	30,000	7,750	32,500	7,750	7,750	2,500	
S13	K13	NVM	NVM	K14	P3	32,500	7,750	35,000	7,750	7,750	2,500	
S14	K14	NV-	NVM	K15	P3	35,000	7,750	32,500	7,750	7,750	2,500	
S15	K15	NVM	NV-	K16	P2	2,500	6,000	0,000	6,000	6,000	2,500	
S16	K16	NVM	NVM	K17	P2	5,000	6,000	2,500	6,000	6,000	2,500	
S17	K17	NVM	NVM	K18	P2	7,500	6,000	5,000	6,000	6,000	2,500	
S18	K18	NVM	NVM	K19	P2	10,000	6,000	7,500	6,000	6,000	2,500	
S19	K19	NVM	NVM	K20	P2	12,500	6,000	10,000	6,000	6,000	2,500	
S20	K20	NVM	NVM	K21	P2	15,000	6,000	12,500	6,000	6,000	2,500	
S21	K21	NVM	NVM	K22	P2	17,500	6,000	15,000	6,000	6,000	2,500	
S22	K22	NVM	NVM	K23	P2	20,000	6,000	17,500	6,000	6,000	2,500	
S23	K23	NVM	NVM	K24	P2	22,500	6,000	20,000	6,000	6,000	2,500	
S24	K24	NVM	NVM	K25	P2	25,000	6,000	22,500	6,000	6,000	2,500	
S25	K25	NVM	NVM	K26	P2	27,500	6,000	25,000	6,000	6,000	2,500	
S26	K26	NVM	NVM	K27	P2	30,000	6,000	32,500	6,000	6,000	2,500	
S27	K27	NVM	NVM	K28	P2	32,500	6,000	35,000	6,000	6,000	2,500	
S28	K28	NV-	NVM	K29	P2	35,000	6,000	32,500	6,000	6,000	2,500	
S29	K29	NV-	NVM	K30	P2	0,000	6,000	0,000	6,000	7,750	1,750	
S30	K30	NV-	NV-	K1	P1	0,000	6,000	2,500	7,750	7,750	3,052	
S31	K16	NV-	NV-	K2	P1	2,500	6,000	2,500	7,750	7,750	3,052	
S32	K17	NV-	NV-	K3	P1	5,000	6,000	5,000	7,750	7,750	3,052	
S33	K3	NV-	NV-	K18	P1	7,500	6,000	7,500	7,750	7,750	3,052	
S34	K18	NV-	NV-	K4	P1	10,000	6,000	10,000	7,750	7,750	3,052	
S35	K4	NV-	NV-	K19	P1	12,500	6,000	12,500	7,750	7,750	3,052	
S36	K19	NV-	NV-	K5	P1	15,000	6,000	15,000	7,750	7,750	3,052	
S37	K5	NV-	NV-	K20	P1	17,500	6,000	17,500	7,750	7,750	3,052	
S38	K6	NV-	NV-	K21	P1	20,000	6,000	20,000	7,750	7,750	3,052	
S39	K20	NV-	NV-	K6	P1	22,500	6,000	22,500	7,750	7,750	3,052	
S40	K22	NV-	NV-	K7	P1	25,000	6,000	25,000	7,750	7,750	3,052	
S41	K21	NV-	NV-	K7	P1	27,500	6,000	27,500	7,750	7,750	3,052	
S42	K8	NV-	NV-	K23	P1	30,000	6,000	30,000	7,750	7,750	3,052	
S43	K24	NV-	NV-	K8	P1	32,500	6,000	32,500	7,750	7,750	3,052	
S44	K22	NV-	NV-	K8	P1	35,000	6,000	35,000	7,750	7,750	3,052	
S45	K9	NV-	NV-	K24	P1	0,000	6,000	0,000	6,000	6,000	1,750	
S46	K25	NV-	NV-	K9	P1	2,500	6,000	2,500	7,750	7,750	3,052	
S47	K10	NV-	NV-	K25	P1	5,000	6,000	5,000	7,750	7,750	3,052	
S48	K26	NV-	NV-	K10	P1	7,500	6,000	7,500	7,750	7,750	3,052	
S49	K11	NV-	NV-	K26	P1	10,000	6,000	10,000	7,750	7,750	3,052	
S50	K12	NV-	NV-	K27	P1	12,500	6,000	12,500	7,750	7,750	3,052	
S51	K11	NV-	NV-	K27	P1	15,000	6,000	15,000	7,750	7,750	3,052	
S52	K12	NV-	NV-	K28	P1	17,500	6,000	17,500	7,750	7,750	3,052	
S53	K28	NV-	NV-	K13	P1	20,000	6,000	20,000	7,750	7,750	3,052	
S54	K13	NV-	NV-	K29	P1	22,500	6,000	22,500	7,750	7,750	3,052	
S55	K29	NV-	NV-	K14	P1	25,000	6,000	25,000	7,750	7,750	3,052	
S56	K14	NV-	NV-	K30	P1	27,500	6,000	27,500	7,750	7,750	3,052	
S57	K15	NV-	NV-	K30	P2	30,000	6,000	30,000	7,750	7,750	3,052	

--	--	--

- - - - - m m m m m

Profielen

Profiel	Profielnaam	Oppervlakte	Iy Materiaal	Hoek
P1	N76.1/6	1.1200e-03	7.0900e-07 S276	0
P2	HE160A	3.8771e-03	1.6730e-06 S236	0
P3	HE140A	3.1416e-03	1.0331e-06 S236	0
-	-	m2	m4 -	°

Materialen

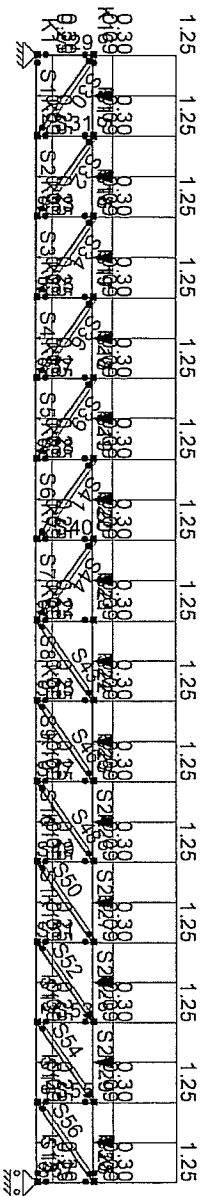
Materiaalnaam	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoeff
S235	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
S275	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
-	kN/m3	kN/m2	C°m

Opleggingen

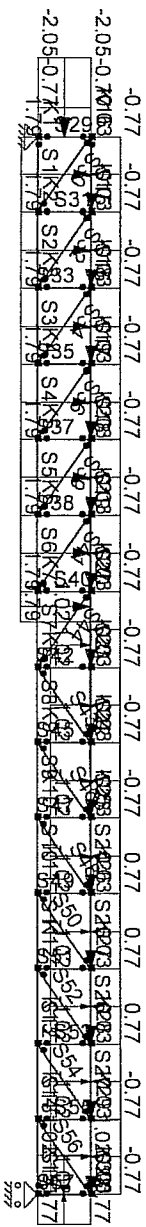
Oplegging	Knoop	X	Z	Yr	HoekYr
O1	K1	vast vrij	vast vrij	vrij	0
O2	K15	kN/m	kN/m	kNmrad	0
-	-	kN/m	kN/m	kNmrad	°

Gewichtsberekening

Index	Staven	Berekening	y/z Eenheden
C1	Belastingen en vervormingen	NEN6702	5.00
LR1	Systeemmaat	5.00	
C2	Permanente Belasting	NEN6702#7	1.00
q1	Factor eigengewicht	1.00	
Pp1	Dak	C2	
q2	Eigen gewicht	0.25	
LR2	Permanente Belasting	Pp1°C1	
Cq1	Wind van Links	NEN6702#8.6	1.00
Cd1	Ceq	NEN6702#8.6.5()	0.96
Pw1	Cd1m t.b.v. Wind	NEN6702#8.6.3(16.00,5.00)	0.54 [kN/m²]
Ce1	Voor gedeelte < Gem. Breedte	NEN6702#8.6.2(2.00,2,ONBEBOUWD)	
q3	Gewel Druk/Zuiging	NEN6702#8.6.4.1.Fig.A.4(+)	0.80
Ce2	Gewel Druk	Cd1°Ce1°Pw1°Cq1°C1	2.05 [kN/m]
q4	Gewel Zuiging	NEN6702#8.6.4.1.Fig.A.4(-)	-0.40
Ce3	Platdak	Cd1°Ce2°Pw1°Cq1°C1	-1.02 [kN/m]
Ce4	Cpe t.b.v. Plat dak voor	NEN6702#8.6.4.2.Fig.A.6(<n)	-0.70
q5	Cpe t.b.v. Plat dak achter	NEN6702#8.6.4.2.Fig.A.6(>n)	-0.40
q6	T.b.v. Platdak voor	Cd1°Ce3°Pw1°Cq1°C1	-1.79 [kN/m]
C11	Cpe t.b.v. Plat dak achter	Cd1°Ce4°Pw1°Cq1°C1	-1.02 [kN/m]
q7	Cp1 t.b.v. Overdruk	NEN6702#8.6.4.4(+,FALSE,TRUE)	0.30
C12	Cp1 t.b.v. Overdruk	Cd1°C11°Pw1°Cq1°C1°(-1)	-0.77 [kN/m]
q8	Onderdruk	NEN6702#8.6.4.4(-,FALSE,TRUE)	-0.30
Cf1	Plat Dak, Wrijving	Cd1°C12°Pw1°Cq1°C1°(-1)	0.77 [kN/m]
q9	Plat Dak, Wrijving met	NEN6702#8.6.4.5(0)	0.01
LR3	T.b.v. Platdak, Wrijving met	Cd1°Cf1°Pw1°Cq1°C1	0.03 [kN/m]
Cs1	Sneeuwbelasting	NEN6702#8.7.2	
Pt1	Platdak	NEN6702#8.7.2.1.B(a,c1)	0.80
q10	Platdak	NEN6702#8.7.2.1.(Cs1)	0.56 [kN/m²]
	Platdak	Pt1°C1	2.80 [kN/m]



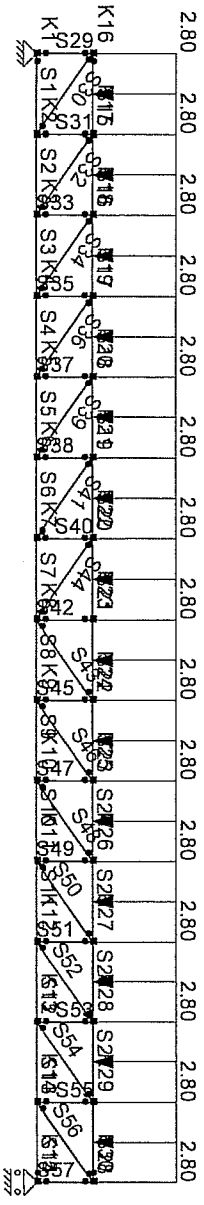
AfB. Lasten B.G.1 Permanente Belasting



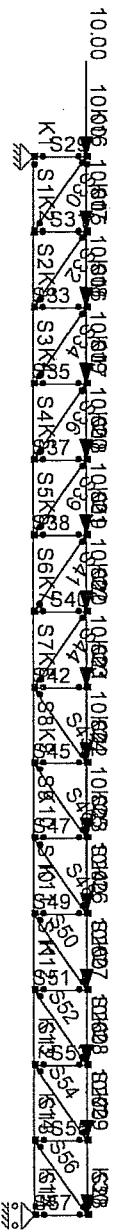
AfB. Lasten B.G.2 Wind links + onderdruk



AfB. Lasten B.G.3 Wind links + overdruk



AfB. Lasten B.G.4 Sneeuwbelasting 1



AfB. Lasten B.G.5 Kniklengte

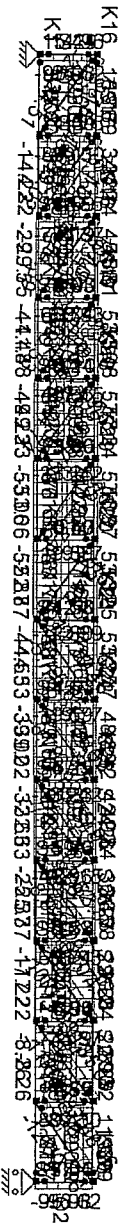
--	--	--

Belastingsgevallen

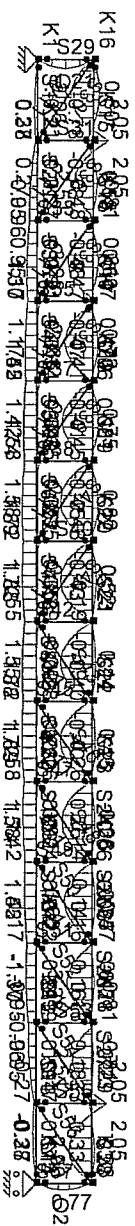
Type	Beginwaarde	Eindwaarde	Beginafstand	Eindafstand	Richting	Staat of knoep	
B.G.1: Permanente Belasting							
qG	0,30 (1.00x)	0,30 (1.00x)	0,000	2,500(L)	Z"	S15-S29,S57	
q	1,25 (q2)	1,25 (q2)	0,000	2,500(L)	Z"	S15-S28	
qG	0,25 (1.00x)	0,25 (1.00x)	0,000	2,500(L)	Z"	S1-S14	
qG	0,09 (1.00x)	0,09 (1.00x)	0,000	1,750(L)	Z"	S30-S56	
Som lasten							
B.G.2: Wind links + onderdruk	X:	0,00	kN	Z:	69,86	kN	
q	-2,05 (-q3)	-2,05 (-q3)	0,000	1,750(L)	Z	S29	
q	1,02 (-q4)	1,02 (-q4)	0,000	1,750(L)	Z'	S22-S23,S28,S57	
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	0,000	2,500(L)	Z'	S15-S20	
q	1,02 (-q6)	1,02 (-q6)	0,000	1,500	Z'	S21	
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	1,500	2,500(L)	Z'	S21	
q	-1,02 (q6)	-1,02 (q6)	0,000	2,500(L)	Z'	S24-S27	
q	-0,77 (-q6)	-0,77 (-q6)	0,000	1,750(L)	Z'	S15-S23,S28-S29,S57	
q	0,77 (q6)	0,77 (q6)	0,000	2,500(L)	Z'	S24-S27	
q	-0,03 (-q9)	-0,03 (-q9)	0,000	2,500(L)	X'	S15-S23,S28	
q	0,03 (q9)	0,03 (q9)	0,000	2,500(L)	X'	S24-S27	
Som lasten							
B.G.3: Wind links + overdruk	X:	6,27	kN	Z:	-21,25	kN	
q	-2,05 (-q3)	-2,05 (-q3)	0,000	1,750(L)	Z	S29	
q	1,02 (-q4)	1,02 (-q4)	0,000	1,750(L)	Z'	S22-S23,S28,S57	
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	0,000	2,500(L)	Z'	S15-S20	
q	1,02 (-q6)	1,02 (-q6)	0,000	1,500	Z'	S21	
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	1,500	2,500(L)	Z'	S21	
q	-1,02 (q6)	-1,02 (q6)	0,000	2,500(L)	Z'	S24-S27	
q	0,77 (-q7)	0,77 (-q7)	0,000	1,750(L)	Z'	S15-S23,S28-S29,S57	
q	-0,77 (q7)	-0,77 (q7)	0,000	2,500(L)	Z'	S24-S27	
q	-0,03 (-q9)	-0,03 (-q9)	0,000	2,500(L)	X'	S15-S23,S28	
q	0,03 (q9)	0,03 (q9)	0,000	2,500(L)	X'	S24-S27	
Som lasten							
B.G.4: Sneeuwbelasting 1	X:	6,27	kN	Z:	-75,03	kN	
q	2,80 (q10)	2,80 (q10)	0,000	2,500(L)	Z	S15-S28	
Som lasten							
B.G.5: Kriklengte	X:	0,00	kN	Z:	98,00	kN	
N	10,00	X:	150,00	kN	Z:	0,00	kN
				m		m	
					-	-	
					X	K16-K30	

Fundamenteel Belastingscombinaties

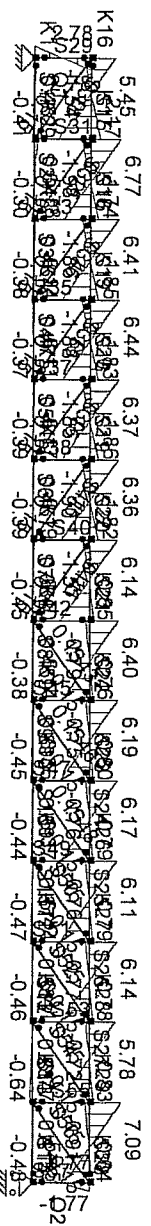
B.G.	Omschrijving	Fu.C.1	Fu.C.2	Fu.C.3	Fu.C.4
B.G.1	Permanente Belasting	1.20	0.90	1.20	1.35
B.G.2	Wind links + onderdruk	1.13	-	-	-
B.G.3	Wind links + overdruk	-	1.13	-	-
B.G.4	Sneeuwbelasting 1	-	-	1.13	-
B.G.5	Kriklengte	-	-	-	-



Afb. Fu.C. Normalkracht (kN) Omhullende



Afb. Fu.C. Momenten (My) Omhullende

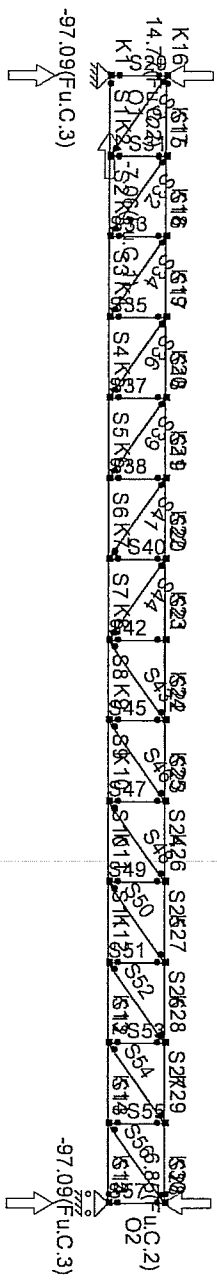


Afb. Fu.C. Dwarskracht (Vz) Omhullende

Fu.C. Extreme staafkrachten

Staaf	B.C.	Mb	Nmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0 T/D	Nmax	Vb	Vmax	Ve
S1	Fu.C.2	0.00	0.08	0.867	-0.21	1.732	0.000 T	5.80	0.19	-0.36	-0.36
S1	Fu.C.3	0.00	0.38	1.611	0.27	0.000	0.000 T	0.00	0.48	0.48	-0.26
S2	Fu.C.2	-0.21	-0.07	0.938	-0.27	0.000	0.000	-14.22	0.25	-0.30	-0.30
S2	Fu.C.3	0.27	0.96	2.168	0.95	0.000	0.000 T	129.09	0.64	0.64	-0.10
S3	Fu.C.2	-0.27	-0.12	0.938	-0.31	0.000	0.000	-29.75	0.28	-0.29	-0.28
S3	Fu.C.3	0.95	1.30	1.552	1.17	0.000	0.000 T	236.36	0.46	0.46	-0.28
S4	Fu.C.2	-0.31	-0.16	0.938	-0.34	0.000	0.000	-41.48	0.27	-0.29	-0.29
S4	Fu.C.3	1.17	1.55	1.594	1.42	0.000	0.000 T	324.70	0.47	0.47	-0.27
S5	Fu.C.2	-0.34	-0.18	0.938	-0.35	0.000	0.000	-49.23	0.27	-0.28	-0.28
S5	Fu.C.3	1.42	1.74	1.454	1.58	0.000	0.000 T	393.28	0.43	0.43	-0.31
S5	Fu.C.4	0.59	0.89	1.337	0.66	0.000	0.000 T	189.53	0.44	0.44	-0.39
S6	Fu.C.2	-0.35	-0.19	0.938	-0.35	0.000	0.000	-53.06	0.28	-0.28	-0.28
S6	Fu.C.3	1.58	1.89	1.450	1.72	0.000	0.000 T	442.31	0.43	0.43	-0.31
S6	Fu.C.4	0.66	0.96	1.337	0.73	0.000	0.000 T	213.17	0.45	0.45	-0.39
S7	Fu.C.2	-0.35	-0.15	1.563	-0.29	0.000	0.000	-52.87	0.30	0.30	-0.25
S7	Fu.C.3	1.72	1.88	1.019	1.55	0.000	0.000 T	471.66	0.30	-0.44	-0.44
S7	Fu.C.4	0.73	0.95	1.143	0.64	0.000	0.000 T	227.31	0.38	-0.45	-0.45
S8	Fu.C.2	-0.29	-0.12	1.563	-0.28	0.000	0.000	-44.53	0.28	0.28	-0.27
S8	Fu.C.3	1.55	1.88	1.481	1.72	0.000	0.000 T	471.66	0.44	0.44	-0.30
S8	Fu.C.4	0.64	0.95	1.357	0.73	0.000	0.000 T	227.31	0.45	0.45	-0.38
S9	Fu.C.2	-0.28	-0.11	1.563	-0.26	0.000	0.000	-39.02	0.29	0.29	-0.27
S9	Fu.C.3	1.72	1.89	1.050	1.58	0.000	0.000 T	442.31	0.31	-0.43	-0.43
S9	Fu.C.4	0.73	0.96	1.163	0.66	0.000	0.000 T	213.17	0.39	-0.45	-0.45
S10	Fu.C.2	-0.26	-0.09	1.563	-0.24	0.000	0.000 T	-32.63	0.29	0.29	-0.27
S10	Fu.C.3	1.58	1.74	1.046	1.42	0.000	0.000 T	393.28	0.31	-0.43	-0.43
S10	Fu.C.4	0.66	0.89	1.163	0.59	0.000	0.000 T	189.53	0.39	-0.44	-0.44
S11	Fu.C.2	-0.24	-0.07	1.563	-0.22	0.000	0.000	-25.37	0.29	0.29	-0.27
S11	Fu.C.3	1.42	1.55	0.906	1.17	0.000	0.000 T	324.70	0.27	-0.47	-0.47
S12	Fu.C.2	0.19	0.04	0.938	0.22	0.000	0.000	-17.22	-0.26	0.29	0.29
S12	Fu.C.3	-0.95	-1.30	1.552	-1.17	0.000	0.000 T	236.36	-0.46	-0.46	0.28
S13	Fu.C.2	0.17	0.01	0.938	0.19	0.000	0.000	-8.26	-0.27	0.28	0.28
S13	Fu.C.3	-0.27	-0.96	2.168	-0.95	0.000	0.000 T	129.09	-0.64	-0.64	0.10
S14	Fu.C.2	0.00	-0.10	0.944	0.17	1.887	0.000 T	1.77	-0.21	0.35	0.35
S14	Fu.C.3	0.00	-0.38	1.611	-0.27	0.000	0.000 T	0.00	-0.48	-0.48	0.26
S15	Fu.C.3	2.05	-2.96	1.413	0.00	0.327	0.000	-129.09	-7.09	-7.09	5.45
S16	Fu.C.3	0.81	-2.51	1.151	2.05	0.160	2.153	-236.36	-5.78	6.77	6.77
S17	Fu.C.3	0.47	-3.28	1.223	0.81	0.079	2.366	-324.70	-6.14	6.41	6.41
S18	Fu.C.2	-0.41	0.72	1.234	-0.47	0.248	2.219 T	53.56	1.83	-1.88	-1.88
S18	Fu.C.3	0.06	-3.66	1.217	0.47	0.010	2.423	-393.28	-6.11	6.44	6.44

Staaf	B.C.	Mb	Mmax	xMlmax	Me	x-M0	x-M0 T/D	Nmax	Vb	Vmax	Ve
S19	Fu.C.2	-0.41	0.75	1.252	-0.41	0.248	2.256 T	57.31	1.86	1.86	-1.85
S19	Fu.C.3	-0.19	-3.99	1.230	0.06	2.490	0.000	-442.31	-6.17	6.37	6.37
S20	Fu.C.2	-0.31	0.80	1.223	-0.41	0.188	2.258 T	57.05	1.82	-1.90	-1.90
S20	Fu.C.3	-0.40	-4.22	1.234	-0.19	0.000	0.000	-471.66	-6.19	6.36	6.36
S21	Fu.C.2	-0.06	0.52	1.365	-0.31	0.073	2.274 T	53.32	0.85	-1.57	-1.57
S21	Fu.C.3	-0.08	-4.16	1.276	-0.40	0.000	0.000	-481.79	-6.40	-6.40	6.14
S22	Fu.C.2	-0.03	0.44	1.228	-0.06	0.035	2.419 T	53.25	0.76	-0.79	-0.79
S22	Fu.C.3	-0.40	-4.16	1.224	-0.08	0.000	0.000	-481.79	-6.14	6.40	6.40
S23	Fu.C.2	-0.09	0.43	1.289	-0.03	0.115	2.463 T	48.49	0.80	0.80	-0.75
S23	Fu.C.3	-0.19	-4.22	1.266	-0.40	0.000	0.000	-471.66	-6.36	-6.36	6.19
S24	Fu.C.2	0.09	-0.38	1.233	0.11	0.121	2.345 T	42.92	-0.76	0.79	0.79
S24	Fu.C.3	0.19	3.99	1.230	-0.06	2.490	0.000	-442.31	6.17	-6.37	-6.37
S25	Fu.C.3	-0.06	3.66	1.217	-0.47	0.010	2.423	-393.28	6.11	-6.44	-6.44
S26	Fu.C.3	-0.47	3.28	1.223	-0.81	0.079	2.366	-324.70	6.14	-6.41	-6.41
S27	Fu.C.3	-0.81	2.51	1.151	-2.05	0.150	2.153	-236.36	5.78	-6.77	-6.77
S28	Fu.C.3	0.00	-2.96	1.087	2.05	2.173	0.000	-129.09	-5.45	7.09	7.09
S29	Fu.C.1	0.00	-1.21	0.875	0.00	0.000	0.000	-25.65	-2.78	-2.78	2.78
S29	Fu.C.2	0.00	-0.55	0.875	0.00	0.000	0.000 T	15.44	-1.26	-1.26	1.26
S29	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-96.62	0.00	0.00	0.00
S30	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	157.66	0.13	0.13	-0.13
S30	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	76.00	0.15	0.15	-0.15
S31	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-89.30	0.00	0.00	0.00
S32	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	131.03	0.13	0.13	-0.13
S32	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	63.24	0.15	0.15	-0.15
S33	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-74.37	0.00	0.00	0.00
S34	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	107.93	0.13	0.13	-0.13
S34	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	52.08	0.15	0.15	-0.15
S35	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-50.93	0.00	0.00	0.00
S36	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	83.80	0.13	0.13	-0.13
S36	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	40.46	0.15	0.15	-0.15
S37	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-47.15	0.00	0.00	0.00
S38	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-33.42	0.00	0.00	0.00
S39	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	59.94	0.13	0.13	-0.13
S39	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	28.95	0.15	0.15	-0.15
S40	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-19.77	0.00	0.00	0.00
S41	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	35.92	0.13	0.13	-0.13
S41	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	17.37	0.15	0.15	-0.15
S42	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-12.99	0.00	0.00	0.00
S43	Fu.C.3	0.00	-0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	12.46	-0.13	-0.13	0.13
S43	Fu.C.4	0.00	-0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	6.08	-0.15	-0.15	0.15
S44	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	12.46	0.13	0.13	-0.13
S44	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	6.08	0.15	0.15	-0.15
S45	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-19.77	0.00	0.00	0.00
S46	Fu.C.3	0.00	-0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	35.92	-0.13	-0.13	0.13
S46	Fu.C.4	0.00	-0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	17.37	-0.15	-0.15	0.15
S47	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-33.42	0.00	0.00	0.00
S48	Fu.C.3	0.00	-0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	59.94	-0.13	-0.13	0.13
S48	Fu.C.4	0.00	-0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	28.95	-0.15	-0.15	0.15
S49	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-47.15	0.00	0.00	0.00
S50	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	83.80	0.13	0.13	-0.13
S50	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	40.46	0.15	0.15	-0.15
S51	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-50.93	0.00	0.00	0.00
S52	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	107.93	0.13	0.13	-0.13
S52	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	52.08	0.15	0.15	-0.15
S53	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-74.37	0.00	0.00	0.00
S54	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	131.03	0.13	0.13	-0.13
S54	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	63.24	0.15	0.15	-0.15
S55	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-89.30	0.00	0.00	0.00
S56	Fu.C.3	0.00	0.10	1.526	0.00	0.000	0.000 T	157.66	0.13	0.13	-0.13
S56	Fu.C.4	0.00	0.11	1.526	0.00	0.000	0.000 T	76.00	0.15	0.15	-0.15
S57	Fu.C.2	0.00	0.77	0.875	0.00	0.000	0.000 T	7.54	1.77	1.77	-1.77
S57	Fu.C.3	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-96.62	0.00	0.00	0.00
-	-	-	-	m	kNm	m	m	kN	kN	kN	kN

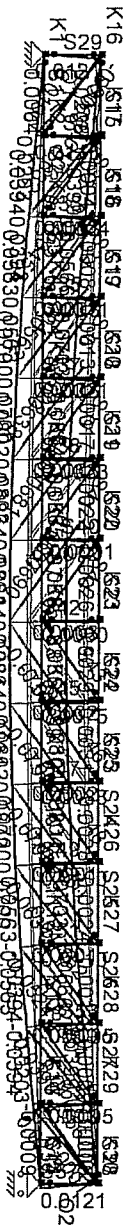


Afb. Fu.C. Oplegreacties Omtuillende

Fu.C. Extreme oplegreacties														
Oplegging	Knoop	B.C.	Xmax	Z	My	B.C.	X	Zmax	My	B.C.	X	Z	My	max
O1	K1					Fu.C.2	-7.06	14.77	0.00					
O1	K1	Fu.C.1	-7.06	-25.99	0.00	Fu.C.3	0.00	-97.09	0.00					
O2	K15					Fu.C.2	0.00	6.85	0.00					
O2	K15					Fu.C.3	0.00	-97.09	0.00					
Globale extreme waarden														
O1	K1	Fu.C.1	-7.06	-25.99	0.00									
O1	K1					Fu.C.2	-7.06	14.77	0.00					
O2	K15					Fu.C.3	0.00	-97.09	0.00					
	-	-	kN	kN	kNm	-	kN	kN	kNm		kN	kN	kNm	

Incidenteel Belastingscombinaties

B.G.	Omschrijving	In.C.con	In.C.1	In.C.2	In.C.3
B.G.1	Permanente Belasting	1.00	1.00	1.00	1.00
B.G.2	Wind links + onderdruk	-	0.87	-	-
B.G.3	Wind links + overdruk	-	-	0.87	-
B.G.4	Sneeuwbelasting 1	-	-	-	0.87
B.G.5	Kniklengte	-	-	-	-



Afb. In.C. Verplaatsingen Omtuillende

In.C. Extreme doorbuigingen

Staaf	B.C.	Knoop Begijn	X	Z	Zafst	Z'	X	Z
S1	In.C.3		0,000	0,000	1,263	0,0001	0,000	0,020
S2	In.C.3		0,000	0,020	1,250	0,0002	0,000	0,039
S3	In.C.3		0,000	0,039	1,250	0,0004	0,001	0,056
S4	In.C.3		0,001	0,056	1,250	0,0004	0,002	0,070
S5	In.C.3		0,002	0,070	1,250	0,0005	0,003	0,080
S6	In.C.3		0,003	0,080	1,250	0,0005	0,005	0,086
S7	In.C.3		0,005	0,086	1,250	0,0005	0,006	0,088
S8	In.C.3		0,006	0,088	1,250	0,0005	0,007	0,086
S9	In.C.3		0,007	0,086	1,250	0,0005	0,009	0,080
S10	In.C.3		0,009	0,080	1,250	0,0005	0,010	0,070
S11	In.C.3		0,010	0,070	1,250	0,0004	0,011	0,056
S12	In.C.3		0,012	0,039	1,250	-0,0004	0,011	0,056
S13	In.C.3		0,012	0,020	1,260	-0,0002	0,012	0,039
S14	In.C.3		0,012	0,000	1,263	-0,0001	0,012	0,020
S15	In.C.2		0,000	0,000	1,250	0,0000	0,000	0,000

Staat	B.C.	Knoop Begin		Staat		Knoop Eind			
		X	Z	Ztstf	Z'	X	Z		
S15	In.C.3	0,012	0,021	1,250	-0,0004	0,012	0,000		
S16	In.C.2	0,000	0,001	1,250	0,0000	0,000	0,000		
S16	In.C.3	0,011	0,040	1,250	-0,0003	0,012	0,021		
S17	In.C.2	0,000	0,001	1,250	0,0000	0,000	0,001		
S17	In.C.3	0,010	0,057	1,250	-0,0005	0,011	0,040		
S18	In.C.2	0,000	0,002	1,250	0,0000	0,000	0,001		
S18	In.C.3	0,009	0,070	1,250	-0,0005	0,010	0,057		
S19	In.C.2	0,000	0,002	1,250	0,0000	0,000	0,002		
S19	In.C.3	0,008	0,080	1,250	-0,0006	0,009	0,070		
S20	In.C.2	0,000	0,003	1,250	0,0000	0,000	0,002		
S20	In.C.3	0,007	0,087	1,250	-0,0006	0,008	0,080		
S21	In.C.3	0,006	0,088	1,250	-0,0006	0,007	0,087		
S22	In.C.3	0,005	0,087	1,250	-0,0006	0,006	0,088		
S23	In.C.3	0,004	0,080	1,250	-0,0006	0,005	0,087		
S24	In.C.3	0,004	0,080	1,250	0,0006	0,003	0,070		
S25	In.C.3	0,003	0,070	1,250	0,0005	0,002	0,057		
S26	In.C.3	0,002	0,057	1,250	0,0005	0,001	0,040		
S27	In.C.3	0,001	0,040	1,250	0,0003	0,000	0,021		
S28	In.C.3	0,000	0,000	1,263	-0,0004	0,000	0,021		
S29	In.C.1	0,004	0,000	0,864	-0,0001	0,000	0,000		
S30	In.C.on	0,005	0,000	1,541	0,0005	0,000	0,009		
S30	In.C.1	0,004	0,000	1,541	0,0005	0,000	0,007		
S30	In.C.2	0,000	0,000	1,541	0,0005	0,000	0,000		
S30	In.C.3	0,012	0,000	1,541	0,0005	0,000	0,020		
S32	In.C.on	0,005	0,009	1,541	0,0005	0,000	0,018		
S32	In.C.1	0,004	0,007	1,541	0,0005	0,000	0,013		
S32	In.C.2	0,000	0,000	1,541	0,0005	0,000	0,001		
S32	In.C.3	0,012	0,021	1,541	0,0005	0,000	0,039		
S34	In.C.on	0,005	0,018	1,541	0,0005	0,000	0,025		
S34	In.C.1	0,004	0,013	1,541	0,0005	0,000	0,018		
S34	In.C.2	0,000	0,001	1,541	0,0005	0,000	0,001		
S34	In.C.3	0,011	0,040	1,541	0,0005	0,001	0,056		
S36	In.C.on	0,005	0,025	1,541	0,0005	0,001	0,031		
S36	In.C.1	0,003	0,018	1,541	0,0005	0,001	0,023		
S36	In.C.2	0,000	0,001	1,541	0,0005	0,000	0,002		
S36	In.C.3	0,010	0,057	1,541	0,0005	0,002	0,070		
S39	In.C.on	0,004	0,031	1,541	0,0005	0,001	0,036		
S39	In.C.1	0,003	0,023	1,541	0,0005	0,001	0,026		
S39	In.C.2	0,000	0,002	1,541	0,0005	0,000	0,002		
S39	In.C.3	0,009	0,070	1,541	0,0005	0,003	0,080		
S41	In.C.on	0,004	0,036	1,541	0,0005	0,002	0,039		
S41	In.C.1	0,003	0,027	1,541	0,0005	0,001	0,029		
S41	In.C.2	0,000	0,002	1,541	0,0005	0,000	0,003		
S41	In.C.3	0,008	0,080	1,541	0,0005	0,005	0,086		
S43	In.C.on	0,002	0,039	1,541	-0,0005	0,003	0,040		
S43	In.C.1	0,002	0,029	1,541	-0,0005	0,002	0,030		
S43	In.C.2	0,000	0,003	1,541	-0,0005	0,000	0,003		
S43	In.C.3	0,005	0,087	1,541	-0,0005	0,006	0,088		
S44	In.C.on	0,003	0,039	1,541	0,0005	0,003	0,040		
S44	In.C.1	0,002	0,029	1,541	0,0005	0,002	0,030		
S44	In.C.2	0,000	0,003	1,541	0,0005	0,000	0,003		
S44	In.C.3	0,007	0,087	1,541	0,0005	0,006	0,088		
S46	In.C.on	0,002	0,036	1,541	-0,0005	0,003	0,039		
S46	In.C.1	0,001	0,027	1,541	-0,0005	0,002	0,029		
S46	In.C.2	0,000	0,003	1,541	-0,0005	0,000	0,003		
S46	In.C.3	0,004	0,080	1,541	-0,0005	0,007	0,086		
S48	In.C.on	0,001	0,031	1,541	-0,0005	0,004	0,036		
S48	In.C.1	0,001	0,024	1,541	-0,0005	0,003	0,027		
S48	In.C.2	0,000	0,003	1,541	-0,0005	0,000	0,003		
S48	In.C.3	0,003	0,070	1,541	-0,0005	0,009	0,080		
S60	In.C.on	0,004	0,031	1,541	0,0005	0,001	0,025		
S60	In.C.1	0,003	0,024	1,541	0,0005	0,001	0,020		
S60	In.C.2	0,000	0,003	1,541	0,0005	0,000	0,002		
S60	In.C.3	0,010	0,070	1,541	0,0005	0,002	0,057		

--	--	--

Staaf	B.C.	Knoop Begin		Staaf		Knoop Eind	
		X	Z	Zafst	Z	X	Z
S62	In.C.on	0,005	0,025	1,541	0,0005	0,000	0,018
S62	In.C.1	0,004	0,019	1,541	0,0005	0,000	0,014
S62	In.C.2	0,000	0,002	1,541	0,0005	0,000	0,002
S62	In.C.3	0,011	0,056	1,541	0,0005	0,001	0,040
S64	In.C.on	0,005	0,018	1,541	0,0005	0,000	0,009
S64	In.C.1	0,004	0,014	1,541	0,0005	0,000	0,007
S64	In.C.2	0,000	0,002	1,541	0,0005	0,000	0,001
S64	In.C.3	0,012	0,039	1,541	0,0005	0,000	0,021
S66	In.C.on	0,005	0,009	1,541	0,0005	0,000	0,000
S66	In.C.1	0,004	0,007	1,541	0,0005	0,000	0,000
S66	In.C.2	0,000	0,001	1,541	0,0005	0,000	0,000
S66	In.C.3	0,012	0,020	1,541	0,0005	0,000	0,000
S67	In.C.2	0,000	0,000	0,884	0,0001	0,000	0,000
-	-	m	m	m	m	m	m

Momentaan Belastingscombinaties

B.G.	Omschrijving	Mo.C.1
B.G.1	Permanente Belasting	1,00
B.G.2	Wind links + onderdruk	-
B.G.3	Wind links + overdruk	-
B.G.4	Sneeuwbelasting 1	-
B.G.5	Kniklengte	-

Kniklengtegegevens

Staaf	Profiel	Lokale Y-as		Lokale Z-as	
		Lsys	methode	Lbuc	Lbuc/Lsys
C2 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C3 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C4 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C5 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C6 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C7 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C8 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C9 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C10 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C11 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C12 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C13 - V1 (0.000-2.500)	P3	2,50	Handmatige Invoer	10,00	4,00 Cons. gesch. M/phi
C15 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C16 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C17 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C18 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C19 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C20 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C21 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C22 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C23 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C24 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi
C25 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00 Cons. gesch. M/phi

--	--	--

Staat	Profiel	Lokale Y-as				Lokale Z-as			
		Lsys	methode	Lbuc	Lbuc/Lsys	methode	Lbuc	Lbuc/Lsys	
C26 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00	Cons. gesch. M/phi	2,50	1,00	
C27 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00	Cons. gesch. M/phi	2,50	1,00	
C28 - V1 (0.000-2.500)	P2	2,50	Handmatige Invoer	5,00	2,00	Cons. gesch. M/phi	2,50	1,00	
C29 - V1 (0.000-1.750)	P2	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C30 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C31 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C32 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C33 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C34 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C35 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C36 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C37 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C38 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C39 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C40 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C42 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C43 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C45 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C46 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C47 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C48 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C49 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C50 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C51 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C52 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C53 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C54 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C55 - V1 (0.000-1.750)	P1	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
C56 - V1 (0.000-3.052)	P1	3,05	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	Cons. gesch. M/phi	3,05	1,00	
C57 - V1 (0.000-1.750)	P2	1,75	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	Cons. gesch. M/phi	1,75	1,00	
-	-	m	-	m	-	-	m	-	

Kipsteunengegevens

Staat	Profiel	Begin:	Eind:	Kipsteunen boven		Kipsteunen onder		Aangrijphoogte
C1 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C2 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C3 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C4 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C5 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C6 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C7 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C8 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as
C9 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel					Neutrale as

--	--	--

Staaf	Profiel	Begin:	Eind:	Kipsteunen boven	Kipsteunen onder	Aangrijphoogte
C10 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C11 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C12 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C13 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C14 - V1 (0.000-2.500)	P3	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C15 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C16 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C17 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C18 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C19 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C20 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C21 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C22 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C23 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C24 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C25 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C26 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C27 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C28 - V1 (0.000-2.500)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C29 - V1 (0.000-1.750)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C30 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C31 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C32 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C33 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C34 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C35 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C36 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C37 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C38 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C39 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C40 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C41 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C42 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C43 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C44 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C45 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C46 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C47 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C48 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C49 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C50 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C51 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C52 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C53 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C54 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C55 - V1 (0.000-1.750)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C56 - V1 (0.000-3.052)	P1	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
C57 - V1 (0.000-1.750)	P2	Gaffel	Gaffel			Neutrale as
-	-	-	-	m	m	-

Unity Check

Staalcontrole volgens NEN6770/6771					
Veld	Toetsing	Combinatie	Formule	Max Unity Check	
C1-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-1)	0,01	
C1-V1 (0.000-2.500)	Kliploetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,01	
C2-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0,08	

Veld	Toetsing	Combinatie	Formule	Max Unity Check	
C2-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.04	
C2-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.03	
C2-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.03	
C3-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.26	
C3-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.07	
C3-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.06	
C4-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.04	
C4-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.40	
C4-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.10	
C4-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.08	
C5-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.04	
C5-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.51	
C5-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.13	
C5-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.10	
C6-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C6-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.59	
C6-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.14	
C6-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.10	
C6-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C7-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.64	
C7-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.14	
C7-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.10	
C7-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C8-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.64	
C8-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.11	
C8-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.09	
C8-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C9-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.59	
C9-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.10	
C9-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.08	
C10-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C10-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.51	
C10-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.08	
C10-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.06	
C10-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C11-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.40	
C11-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.06	
C11-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.05	
C11-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.04	
C12-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.26	
C12-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.04	
C12-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.03	
C12-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.04	
C13-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.08	
C13-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.02	
C13-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.02	
C13-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.03	
C14-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-1)	0.01	
C14-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.01	
C15-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.07	
C15-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.23	
C15-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.24	
C16-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.06	
C16-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-2)	0.19	
C16-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.38	
C16-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.38	
C16-V1 (0.000-2.500)	Kipboetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	

Veld	Toetsing	Combinatie	Formule	Max Unity Check	
C17-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.32	
C17-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.53	
C17-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.53	
C17-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.06	
C18-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.41	
C18-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.65	
C18-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.65	
C18-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.07	
C19-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.48	
C19-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.74	
C19-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.74	
C19-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.07	
C20-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.52	
C20-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.80	
C20-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.79	
C20-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.08	
C21-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.53	
C21-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.82	
C21-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.81	
C21-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.08	
C22-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.53	
C22-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.82	
C22-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.81	
C22-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.08	
C23-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.52	
C23-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.80	
C23-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.79	
C23-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.08	
C24-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.48	
C24-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.74	
C24-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.74	
C24-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.07	
C25-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.41	
C25-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.65	
C25-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.65	
C25-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.07	
C26-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.32	
C26-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.53	
C26-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.53	
C26-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.06	
C27-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.19	
C27-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.38	
C27-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.38	
C27-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.05	
C28-V1 (0.000-2.500)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-2)	0.07	
C28-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-1)	0.23	
C28-V1 (0.000-2.500)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN6771(12.3-2)	0.24	
C28-V1 (0.000-2.500)	Kiptoetsing	Fu.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.06	
C29-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.2-3)	0.11	
C29-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0.11	
C29-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0.12	
C29-V1 (0.000-1.750)	Kiptoetsing	Bl.C.3	NEN6771(12.2-3)	0.00	
C30-V1 (0.000-3.052)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.3-17)	0.33	
C30-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0.15	
C30-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0.13	
C31-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.2-3)	0.00	
C31-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(1.2-3)	0.29	

Veld	Toetsing	Combinatie	Formule	Max Unity Check
C46-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0,04
C46-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C47-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.2-3)	0,11
C47-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,16
C47-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0,16
C48-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C48-V1 (0.000-3.052)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-17)	0,08
C48-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0,05
C48-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0,04
C48-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C48-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.2-3)	0,15
C48-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,23
C48-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0,23
C48-V1 (0.000-1.750)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C50-V1 (0.000-3.052)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-17)	0,12
C50-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0,06
C50-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0,05
C50-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C51-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.2-3)	0,20
C51-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,30
C51-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0,30
C51-V1 (0.000-1.750)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C52-V1 (0.000-3.052)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-17)	0,18
C52-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0,06
C52-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0,05
C52-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C53-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.2-3)	0,24
C53-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,37
C53-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0,37
C53-V1 (0.000-1.750)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C54-V1 (0.000-3.052)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-17)	0,25
C54-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0,07
C54-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0,06
C54-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C55-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,29
C55-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0,44
C55-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,44
C55-V1 (0.000-1.750)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C56-V1 (0.000-3.052)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.3-17)	0,33
C56-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-1)	0,08
C56-V1 (0.000-3.052)	Stabiliteit	Fu.C.2	NEN6771(12.3-2)	0,07
C56-V1 (0.000-3.052)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00
C57-V1 (0.000-1.750)	Doorsnede	Fu.C.3	NEN6770(11.2-3)	0,11
C57-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1a)	0,11
C57-V1 (0.000-1.750)	Stabiliteit	Fu.C.3	NEN 6771 (12.1-1b)	0,12
C57-V1 (0.000-1.750)	Kiploetsing	Bi.C.3	NEN6771(12.2-3)	0,00

Bijlage D

Indicaties van kengetallen per m² gebruikstoepassing

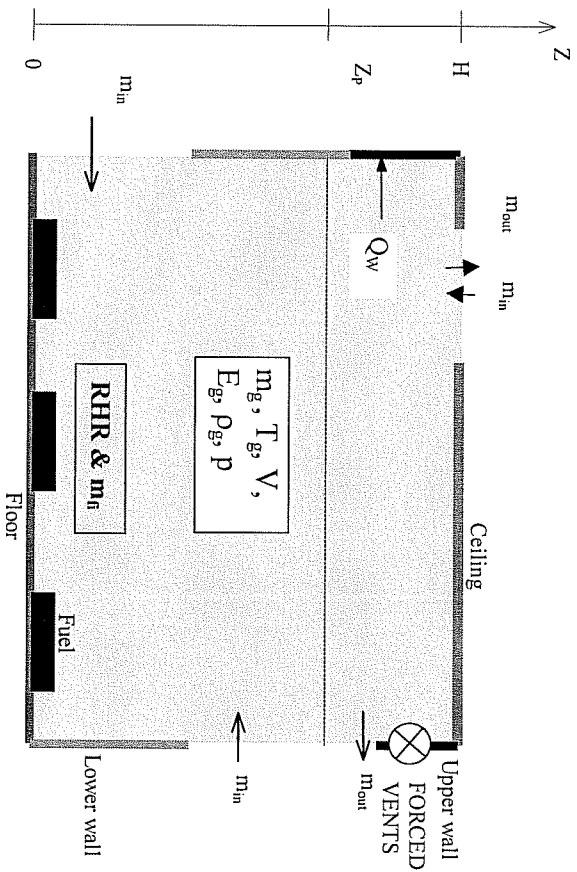
Bron: Toepassingsinstructie BvB 2007 - Save April 2007 -

A7 Kengetallen per m² gebruikstoepassing (indicatief)

Bron	Soort gebruik	Bruto verbrandingswaarde	
		[MJ/m ²]	[kg v/h/m ²]
5	Woonfunctie	n.v.t.	n.v.t.
5	Bijeenkomstfunctie	750 - 1.000	39,47 - 52,63
5	Cellfunctie	250 - 500	13,16 - 26,32
5	Gezondheidszorgfunctie	500 - 750	26,32 - 39,47
5	Industriefunctie	500 - 6.000	26,32 - 315,79
5	Kantoorfunctie	750 - 1.500	39,47 - 78,95
5	Logiesfunctie	500 - 750	26,32 - 39,47
5	Onderwijsfunctie	500 - 1.000	26,32 - 52,63
5	Sportfunctie	250 - 500	13,16 - 26,32
5	Winkelfunctie	750 - 1.500	39,47 - 78,95
5	Overige gebruikersfuncties	500 - 2.000	26,32 - 105,26
5	Bouwwerk geen bouwwerk zijnde	n.v.t.	n.v.t.
5	Expo-ruimte	1.000	52,63
5	Hotel, auditorium	750	39,47
5	Kantoor	750	39,47
5	Opslaghal	1.000 - 16.000	52,63 - 842,11
5	Productiehal	1.000 - 4000	52,63 - 210,53
5	School	500	26,32
5	Sporthal	250	13,16
5	Stal, Parkeergarage	750 - 1.000	39,47 - 52,63
5	Stationshal	250	13,16
5	Winkel, showroom	1.000 - 1.250	52,63 - 65,79
5	Ziekenhuis	500	26,32
4	Kantoor	665	35
3	Machiefabriek met dagvoorraden olie	19	1
3	Productiehal bewerking vuren, grenen en beperkt meranti	1.045	55
3	Productiehal suikerwaren en snoeppgoed	950	50
3	Productiehal voor het snijden van isolatieschuim (PS)	855	45
3	Productiehal voor verwerking van isolatieschuim (PS)	2.090	110
3	Staalfabriek(construcie)	19	1
3	Tricotagefabriek (breierij en atelier)	38	2

Bijlage E

Beschrijving modellering in OZone



Figuur D.1. Overzicht balans Ozone bij één zone

De massa balans kan worden beschreven door:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} + \dot{m}_f$$

De energie balans kan worden beschreven door:

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{wall} + \dot{q}_{in} + \dot{q}_{out} + RHR$$

De energie van een massa kan worden beschreven door:

$$E_g = c_v \dot{m}_g T_g$$

Waarin:

c_v = de specifieke warmte van het gas in het compartiment bij een constant volume

$\dot{m}_g$ = massa van het gas

T_g = temperatuur van het gas

Zodat de energie balans als volgt kan worden beschreven:

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{wall} + c_p (T_g) \dot{m}_{out} T_g + c_p (T_{out}) \dot{m}_{in} T_{out} + RHR$$

Het verschil in druk en de zone temperatuur zijn de twee onbekenden van het system. De massabalans en energiebalans kunnen als volgt worden omgezet:

$$\dot{\Delta p} = \frac{(\gamma - 1) \dot{q}}{V}$$

$$\dot{T}_g = \frac{1}{c_p(T_g)\rho_g V} \left(\dot{q} - c_p(T_g)m_g T_g + V \dot{\Delta p} \right)$$

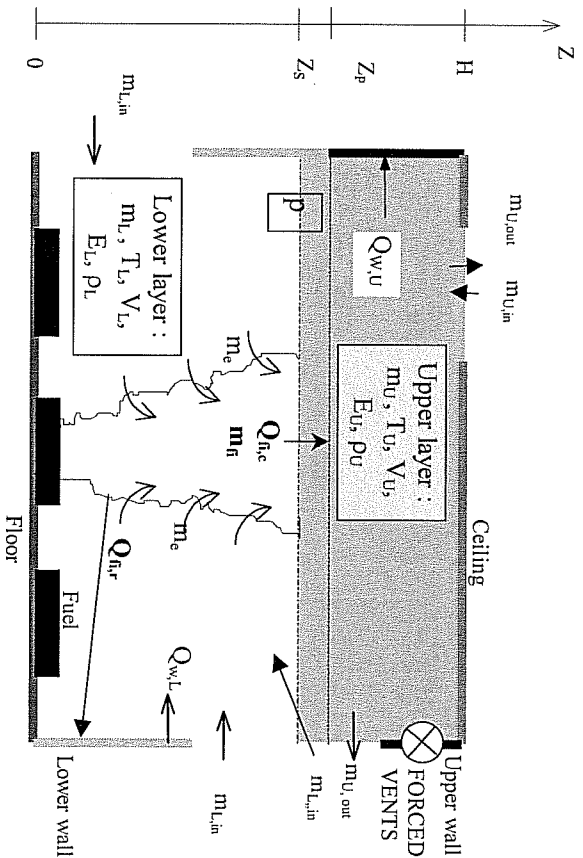
Waarin γ de ratio is tussen de specifieke warmte van het gas en bij een constant volume en de specifieke warmte van het gas bij een constante druk.

$$\gamma(T_i) = \frac{c_p(T_i)}{c_v(T_i)}$$

De specifieke warmte van het gas bij een constante druk kan worden beschreven door:

$$c_p(T) = 0.187 T + 952 \text{ [J/(kg K)]}$$

Voor een twee zone model kunnen de vergelijkingen worden omschreven voor beide zones. In onderstaande figuur zijn de aanwezige variabelen weergegeven. Het opstellen van de vergelijkingen gaat op dezelfde wijze als bij een één zone model.



Figuur D.2. Overzicht balans OZone bij twee zones

Bijlage F

Analytische benadering kritieke staaltemperatuur

Conform bijlage E van EN 1993-1-2

Controle van de kritieke staaltemperatuur van 350 °C voor klasse 4 profielen.

Het is mogelijk met behulp van EN 1993-1-2 een benadering te maken van de kritieke staaltemperatuur i.p.v. de grenswaarde die gegeven is in 4.2.3.6 (350 °C).

Kritieke staaltemperatuur voor klasse 4 profielen

Berekening bij brand

Belastingen: permanent

Eigen gewicht dak: 0,25 kN/m²

Eigen gewicht ligger 0,6 kN/m¹

H.o.h. spanten 5 m

$$M_{r,d} = \frac{\sigma_{x,s,d} \cdot I_{y,e}}{z_{y,e}} = \frac{235 \cdot 336433 \cdot 10^4}{800} = 988 kNm$$

Rekenwaarde van de permanente belasting: $q_d = 1 \times (0,25 \times 5 + 0,6) = 1,85 \text{ kN/m}$

Windbelasting werkt positief => niet in rekening gebracht.

$$M_{s,d} = 1/8 \times 1,85 \text{ kN/m} \times 35^2 = 283 \text{ kNm}$$

$$M_{s,d} / M_{r,d} = 283 \text{ kNm} / 988 \text{ kNm} = 0,29$$

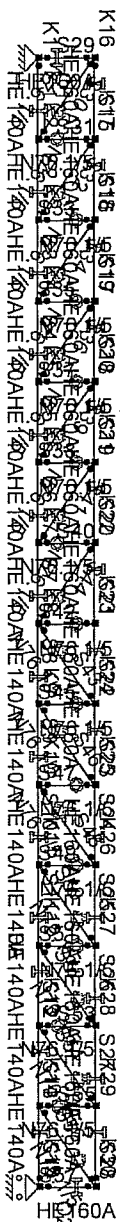
De reductiefactor voor koolstofstaal voor de berekening van profielen in klasse 4 bij brandsituaties kan worden ontleend uit bijlage E van EN 1993-1-2. In tabel E.1. is de reductiefactor voor de rekenwaarde van de vloei grens bij 500 °C gelijk aan 0,53 en bij 600 °C gelijk aan 0,30. Voor tussenvallende waarden mag lineair geïnterpoleerd worden. In dit geval zal de kritieke temperatuur gelijk zijn aan 557 °C.

Bijlage G

Berekening vakwerkligger bij brand

Rinse Wiersum			
Projectnaam	Projectnummer		
Omschrijving	Constructeur		
Opdrachtgever	Eenheden		m, kN, kNm
Bestand	F:\afstuderen\berekeningen\vakwerk.mxf		

Afb. Geometrie 1



Staaf	Knoop	B	Scharnier	E	Knoop	Profiel	X-B	Z-B	X-E	Z-E	Lengte
-------	-------	---	-----------	---	-------	---------	-----	-----	-----	-----	--------

S1	K1	NV-	NVM	K2	P3	0,000	7,750	2,500	7,750	2,500	2,500
S2	K2	NVM	NVM	K3	P3	2,500	7,750	5,000	7,750	2,500	2,500
S3	K3	NVM	NVM	K4	P3	5,000	7,750	7,500	7,750	2,500	2,500
S4	K4	NVM	NVM	K5	P3	7,500	7,750	10,000	7,750	2,500	2,500
S5	K5	NVM	NVM	K6	P3	10,000	7,750	12,500	7,750	2,500	2,500
S6	K6	NVM	NVM	K7	P3	12,500	7,750	15,000	7,750	2,500	2,500
S7	K7	NVM	NVM	K8	P3	15,000	7,750	17,500	7,750	2,500	2,500
S8	K8	NVM	NVM	K9	P3	17,500	7,750	20,000	7,750	2,500	2,500
S9	K9	NVM	NVM	K10	P3	20,000	7,750	22,500	7,750	2,500	2,500
S10	K10	NVM	NVM	K11	P3	22,500	7,750	25,000	7,750	2,500	2,500
S11	K11	NVM	NVM	K12	P3	25,000	7,750	27,500	7,750	2,500	2,500
S12	K13	NVM	NVM	K12	P3	30,000	7,750	27,500	7,750	2,500	2,500
S13	K14	NVM	NVM	K13	P3	32,500	7,750	30,000	7,750	2,500	2,500
S14	K15	NV-	NVM	K14	P3	35,000	7,750	32,500	7,750	2,500	2,500
S15	K17	NVM	NV-	K16	P2	2,500	6,000	0,000	6,000	2,500	2,500
S16	K18	NVM	NVM	K17	P2	5,000	6,000	2,500	6,000	2,500	2,500
S17	K19	NVM	NVM	K18	P2	7,500	6,000	5,000	6,000	2,500	2,500
S18	K20	NVM	NVM	K19	P2	10,000	6,000	7,500	6,000	2,500	2,500
S19	K21	NVM	NVM	K20	P2	12,500	6,000	10,000	6,000	2,500	2,500
S20	K22	NVM	NVM	K21	P2	15,000	6,000	12,500	6,000	2,500	2,500
S21	K23	NVM	NVM	K22	P2	17,500	6,000	15,000	6,000	2,500	2,500
S22	K24	NVM	NVM	K23	P2	20,000	6,000	17,500	6,000	2,500	2,500
S23	K25	NVM	NVM	K24	P2	22,500	6,000	20,000	6,000	2,500	2,500
S24	K26	NVM	NVM	K26	P2	22,500	6,000	25,000	6,000	2,500	2,500
S25	K25	NVM	NVM	K26	P2	25,000	6,000	27,500	6,000	2,500	2,500
S26	K27	NVM	NVM	K28	P2	27,500	6,000	30,000	6,000	2,500	2,500
S27	K28	NVM	NVM	K29	P2	30,000	6,000	32,500	6,000	2,500	2,500
S28	K30	NV-	NVM	K29	P2	35,000	6,000	32,500	6,000	2,500	2,500
S29	K16	NV-	NV-	K1	P2	0,000	6,000	7,750	7,750	3,062	1,750
S30	K16	NV-	NV-	K2	P1	0,000	6,000	2,500	7,750	3,062	1,750
S31	K17	NV-	NV-	K2	P1	2,500	6,000	2,500	7,750	3,062	1,750
S32	K17	NV-	NV-	K3	P1	2,500	6,000	5,000	7,750	3,062	1,750
S33	K3	NV-	NV-	K18	P1	5,000	7,750	5,000	6,000	1,750	1,750
S34	K18	NV-	NV-	K4	P1	5,000	6,000	7,500	7,750	3,062	1,750
S35	K4	NV-	NV-	K19	P1	7,500	7,750	7,500	6,000	1,750	1,750
S36	K19	NV-	NV-	K5	P1	7,500	6,000	10,000	7,750	3,062	1,750
S37	K5	NV-	NV-	K20	P1	10,000	7,750	10,000	6,000	1,750	1,750
S38	K6	NV-	NV-	K21	P1	12,500	7,750	12,500	6,000	1,750	1,750
S39	K20	NV-	NV-	K6	P1	10,000	6,000	12,500	7,750	3,062	1,750
S40	K22	NV-	NV-	K7	P1	15,000	6,000	15,000	7,750	3,062	1,750
S41	K21	NV-	NV-	K7	P1	12,500	6,000	15,000	7,750	3,062	1,750
S42	K8	NV-	NV-	K23	P1	17,500	7,750	17,500	6,000	1,750	1,750
S43	K24	NV-	NV-	K8	P1	20,000	6,000	17,500	7,750	3,062	1,750
S44	K22	NV-	NV-	K8	P1	15,000	6,000	17,500	7,750	3,062	1,750
S45	K9	NV-	NV-	K24	P1	20,000	7,750	20,000	6,000	1,750	1,750
S46	K25	NV-	NV-	K9	P1	22,500	6,000	20,000	7,750	3,062	1,750
S47	K10	NV-	NV-	K25	P1	22,500	7,750	22,500	6,000	1,750	1,750
S48	K26	NV-	NV-	K10	P1	25,000	6,000	22,500	7,750	3,062	1,750
S49	K11	NV-	NV-	K26	P1	25,000	7,750	25,000	6,000	1,750	1,750
S50	K12	NV-	NV-	K27	P1	25,000	7,750	27,500	6,000	3,062	1,750
S51	K12	NV-	NV-	K28	P1	27,500	7,750	27,500	6,000	3,062	1,750
S52	K12	NV-	NV-	K28	P1	27,500	7,750	30,000	6,000	3,062	1,750
S53	K28	NV-	NV-	K13	P1	30,000	6,000	30,000	7,750	1,750	1,750
S54	K13	NV-	NV-	K29	P1	30,000	7,750	32,500	6,000	3,062	1,750
S55	K29	NV-	NV-	K14	P1	32,500	6,000	32,500	7,750	3,062	1,750
S56	K14	NV-	NV-	K30	P1	32,500	7,750	35,000	6,000	3,062	1,750
S57	K15	NV-	NV-	K30	P2	35,000	7,750	35,000	6,000	1,750	1,750

1. The first part of the document is a title page. The title is "The Role of the Teacher in the 21st Century". The author is "John Doe". The date is "10/10/2023". 2. The second part of the document is an abstract. It states that the document discusses the role of the teacher in the 21st century, focusing on the challenges and opportunities faced by educators. 3. The third part of the document is an introduction. It discusses the importance of the teacher in the 21st century and the challenges they face. 4. The fourth part of the document is a literature review. It discusses the role of the teacher in the 21st century, focusing on the challenges and opportunities faced by educators. 5. The fifth part of the document is a conclusion. It discusses the role of the teacher in the 21st century and the challenges they face. 6. The sixth part of the document is a bibliography. It lists the sources used in the document. 7. The seventh part of the document is an appendix. It contains additional information related to the document. 8. The eighth part of the document is a glossary. It defines the terms used in the document. 9. The ninth part of the document is an index. It lists the topics covered in the document. 10. The tenth part of the document is a table of contents. It lists the sections of the document and their page numbers.	11. The eleventh part of the document is a table. It contains data related to the document. 12. The twelfth part of the document is a figure. It is a chart showing the results of a study. 13. The thirteenth part of the document is a table. It contains data related to the document. 14. The fourteenth part of the document is a figure. It is a chart showing the results of a study. 15. The fifteenth part of the document is a table. It contains data related to the document. 16. The sixteenth part of the document is a figure. It is a chart showing the results of a study. 17. The seventeenth part of the document is a table. It contains data related to the document. 18. The eighteenth part of the document is a figure. It is a chart showing the results of a study. 19. The nineteenth part of the document is a table. It contains data related to the document. 20. The twentieth part of the document is a figure. It is a chart showing the results of a study.
--	---

Profielen		Opervlakte		Iy Materiaal		Hoek
Profiel	Profielnaam					
P1	N76,1/5	1.1200e-03	7.0900e-07	S275		C
P2	HE160A	3.8771e-03	1.6730e-05	S235		C
P3	HE140A	3.1416e-03	1.0331e-05	S235		C
-		m2	m4	-		

Materialen

Materialnaam	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoëff
S235	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
S275	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
	KN/m3	KN/m2	C°m

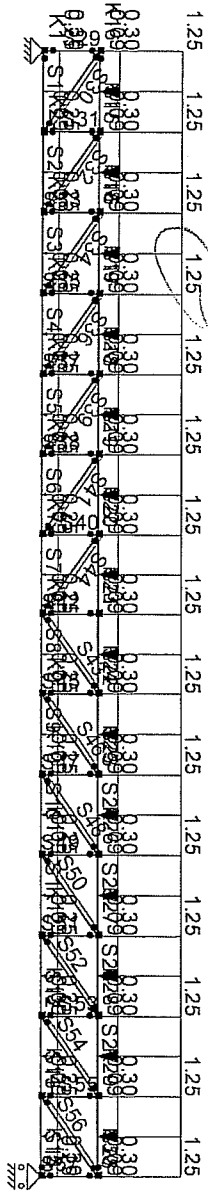
Opleggingen

Opiegling	Knoop	X	Z	Yr	HoekYr
O1	K1	vast	vast	vrij	0
O2	K15	vrij	vast	vrij	0
-	-	kN/m	kN/m	kN/mrad	°

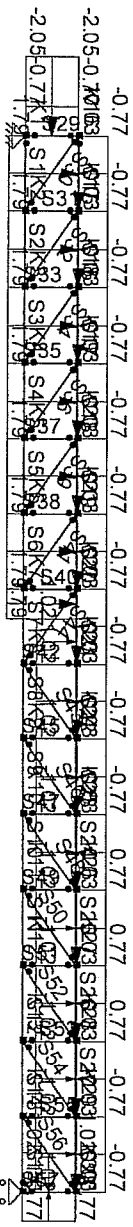
Gewichtsberekening

Index	Staven	Berekening	y/z Eenheden
	Belastingen en vervormingen		
C1	Systeemmaat	NEN6702	5.00
LR1	Permanente Belasting		
C2	Factor eigengewicht	NEN6702#7	1.00
q1	Dak	1.00	1.00 [kN/m]
Pp1	Eigen gewicht	0.25	0.25 [kN/m ²]
q2	Permanente Belasting	Pp1*C1	1.25 [kN/m]
LR2	Wind van Links		
Cq1	Ceq	NEN6702#8.6	1.00
Cd1	Cd1m t.b.v. Wind	NEN6702#8.6.5(16.00, 5.00)	0.96
Pw1	Voor gedeelte < Gem. Breedte	NEN6702#8.6.2(2.00, 2.00)	0.54 [kN/m ²]
Ce1	Gewel Druk/Zuiging		
q3	Gewel Druk	NEN6702#8.6.4.1.Fig.A.4(+)	0.80
Ce2	Gewel Zuiging	Cd1*Ce1*Pw1*Cq1*C1	2.05 [kN/m]
q4	Gewel Zuiging	NEN6702#8.6.4.1.Fig.A.4(-)	-0.40
Ce3	Platdak	Cd1*Ce2*Pw1*Cq1*C1	-1.02 [kN/m]
Ce4	Cpe t.b.v. Plat dak voor	NEN6702#8.6.4.2.Fig.A.6(<n)	-0.70
q5	T.b.v. Plat dak achter	NEN6702#8.6.4.2.Fig.A.6(>n)	-0.40
q6	T.b.v. Platdak achter	Cd1*Ce3*Pw1*Cq1*C1	-1.79 [kN/m]
C11	Cpe t.b.v. Plat dak achter	Cd1*Ce4*Pw1*Cq1*C1	-1.02 [kN/m]
C12	Overdruk	NEN6702#8.6.4.4(+).FALSE.FALSE.TRUE)	0.30
q7	Cpl t.b.v. Onderdruk	Cd1*C11*Pw1*Cq1*C1*(-1)	-0.77 [kN/m]
q8	Onderdruk	NEN6702#8.6.4.4(-).FALSE.FALSE.TRUE)	-0.30
Cf1	Plat Dak, Wrijving	Cd1*C12*Pw1*Cq1*C1*(-1)	0.77 [kN/m]
q9	Plat Dak, Wrijving	NEN6702#8.6.4.5(0)	0.01
LR3	T.b.v. Platdak, Wrijving met	Cd1*Cf1*Pw1*Cq1*C1	0.03 [kN/m]
	Sneeuwbelasting		
Cs1	Platdak	NEN6702#8.7.2	0.80
Pf1	Prep voor Sneeuw	NEN6702#8.7.2.1.B(a,c1)	0.56 [kN/m ²]
110	Platdak	NEN6702#8.7.2.1.(Cs1)	2.80 [kN/m]
		Pf1*C1	

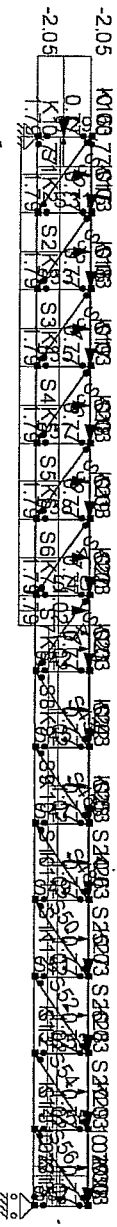
$$0,25 \times 5 = 1,25$$



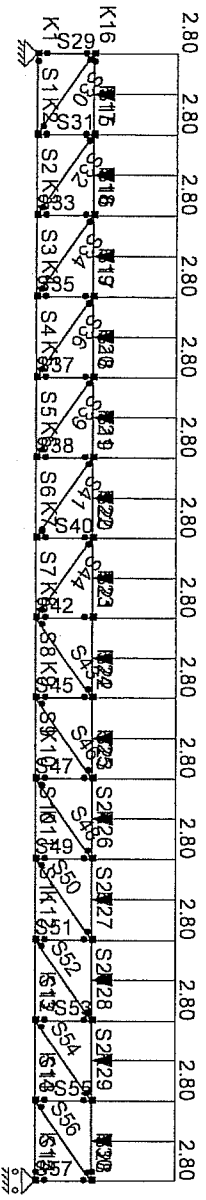
AfB. Lasten B.G. 1 Permanente Belasting



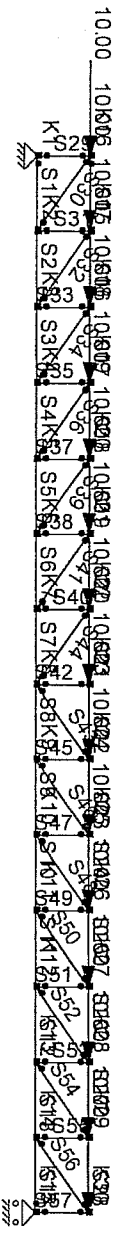
AfB. Lasten B.G. 2 Wind links + onderdruk



AfB. Lasten B.G. 3 Wind links + overdruk



AfB. Lasten B.G. 4 Sneeuwbelasting 1

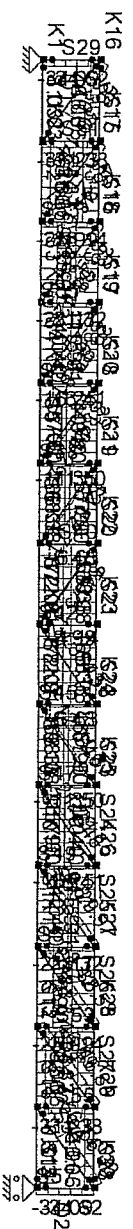


AfB. Lasten B.G. 5 Kniklengte

Item	Unit	Quantity	Unit Price	Total Price
1. Material				
1.1. Cement	m ³	100	100	10000
1.2. Sand	m ³	200	50	10000
1.3. Gravel	m ³	150	80	12000
1.4. Steel reinforcement	kg	500	20	10000
1.5. Formwork	m ²	100	100	10000
2. Labor				
2.1. Carpenter	man	10	100	1000
2.2. Mason	man	20	100	2000
2.3. Painter	man	5	100	500
2.4. Electrician	man	2	100	200
2.5. Welder	man	3	100	300
3. Equipment				
3.1. Excavator	hour	10	1000	10000
3.2. Bulldozer	hour	5	1000	5000
3.3. Loader	hour	10	500	5000
3.4. Truck	hour	20	500	10000
3.5. Crane	hour	5	1000	5000
4. Other				
4.1. Insurance	%	1	100000	10000
4.2. Tax	%	1	100000	10000
4.3. Profit	%	1	100000	10000
4.4. Contingency	%	1	100000	10000
4.5. Miscellaneous	%	1	100000	10000
5. Total				100000

Type	Beginwaarde	Eindwaarde	Beginstand	Eindstand	Richting Staaf of knoop
B.G.1: Permanente Belasting					
qG	0,30 (1.00x)	0,30 (1.00x)	0,000	2,500(L)	Z ^m S15-S29,S57
q	1,25 (q2)	1,25 (q2)	0,000	2,500(L)	Z ^m S15-S28
qG	0,25 (1.00x)	0,25 (1.00x)	0,000	2,500(L)	Z ^m S1-S14
qG	0,09 (1.00x)	0,09 (1.00x)	0,000	1,750(L)	Z ^m S30-S56
Som lasten	X:	0,00 kN Z:	69,86 kN		
B.G.2: Wind links + onderdruk					
q	-2,05 (-q3)	-2,05 (-q3)	0,000	1,750(L)	Z ^m S29
q	1,02 (-q4)	1,02 (-q4)	0,000	1,750(L)	Z ^m S22-S23,S28,S57
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	0,000	2,500(L)	Z ^m S15-S20
q	1,02 (-q6)	1,02 (-q6)	0,000	1,500	Z ^m S21
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	1,500	2,500(L)	Z ^m S21
q	-1,02 (q6)	-1,02 (q6)	0,000	2,500(L)	Z ^m S24-S27
q	-0,77 (-q6)	-0,77 (-q6)	0,000	1,750(L)	Z ^m S15-S23,S28-S29,S57
q	0,77 (q6)	0,77 (q6)	0,000	2,500(L)	Z ^m S24-S27
q	-0,03 (-q9)	-0,03 (-q9)	0,000	2,500(L)	X ^m S15-S23,S28
q	0,03 (q9)	0,03 (q9)	0,000	2,500(L)	X ^m S24-S27
Som lasten	X:	6,27 kN Z:	-21,25 kN		
B.G.3: Wind links + overdruk					
q	-2,05 (-q3)	-2,05 (-q3)	0,000	1,750(L)	Z ^m S29
q	1,02 (-q4)	1,02 (-q4)	0,000	1,750(L)	Z ^m S22-S23,S28,S57
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	0,000	2,500(L)	Z ^m S15-S20
q	1,02 (-q6)	1,02 (-q6)	0,000	1,500	Z ^m S21
q	1,79 (-q5)	1,79 (-q5)	1,500	2,500(L)	Z ^m S21
q	-1,02 (q6)	-1,02 (q6)	0,000	2,500(L)	Z ^m S24-S27
q	0,77 (-q7)	0,77 (-q7)	0,000	1,750(L)	Z ^m S15-S23,S28-S29,S57
q	-0,77 (q7)	-0,77 (q7)	0,000	2,500(L)	Z ^m S24-S27
q	-0,03 (-q9)	-0,03 (-q9)	0,000	2,500(L)	X ^m S15-S23,S28
q	0,03 (q9)	0,03 (q9)	0,000	2,500(L)	X ^m S24-S27
Som lasten	X:	6,27 kN Z:	-75,03 kN		
B.G.4: Sneeuwbelasting 1					
q	2,80 (q10)	2,80 (q10)	0,000	2,500(L)	Z ^m S15-S28
Som lasten	X:	0,00 kN Z:	98,00 kN		
B.G.5: Kniklengte					
N	10,00	150,00 kN Z:	0,00 kN		X K16-K30

	BI.C.1	BI.C.2	BI.C.3
B.G. Omschrijving			
B.G.1 Permanente Belasting	1,00	1,00	1,00
B.G.2 Wind links + onderdruk	-	0.20	-
B.G.3 Wind links + overdruk	-	-	0.20
B.G.4 Sneeuwbelasting 1	-	-	-
B.G.5 Kniklengte	-	-	-



Bi.C. Extreme staafkrachten											
Staf	B.C.	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0 T/D	Nmax	Vb	Vmax	Ve
S1	Bi.C.1	0.00	0.19	1.256	0.00	0.000	0.000 T	0.00	0.31	0.31	-0.31
S1	Bi.C.3	0.00	0.18	1.194	-0.03	2.386	0.000 T	1.03	0.29	-0.32	-0.32

11-3-2011 17:24:31
MatixFrame@ 4.3.SP3
4

Staaf	B.C.	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0 T/D	Nmax	Vb	Vmax	Ve
S2	Bi.C.1	0.00	0.35	1.680	0.27	0.000	0.000 T	46.06	0.41	0.41	-0.20
S2	Bi.C.3	-0.03	0.28	1.594	0.18	0.090	0.000 T	36.17	0.39	0.39	-0.22
S3	Bi.C.1	0.27	0.50	1.370	0.34	0.000	0.000 T	84.37	0.34	0.34	-0.28
S4	Bi.C.1	0.34	0.58	1.400	0.44	0.000	0.000 T	115.91	0.35	0.35	-0.27
S5	Bi.C.1	0.44	0.66	1.337	0.49	0.000	0.000 T	140.40	0.33	0.33	-0.29
S6	Bi.C.1	0.49	0.71	1.337	0.54	0.000	0.000 T	157.90	0.33	0.33	-0.29
S7	Bi.C.1	0.54	0.70	1.143	0.48	0.000	0.000 T	168.38	0.28	0.33	-0.33
S8	Bi.C.1	0.48	0.70	1.357	0.54	0.000	0.000 T	168.38	0.33	0.33	-0.28
S9	Bi.C.1	0.54	0.71	1.163	0.49	0.000	0.000 T	157.90	0.29	-0.33	-0.33
S10	Bi.C.1	0.49	0.66	1.163	0.44	0.000	0.000 T	140.40	0.29	-0.33	-0.33
S11	Bi.C.1	0.44	0.58	1.100	0.34	0.000	0.000 T	115.91	0.27	-0.35	-0.35
S12	Bi.C.1	-0.27	-0.50	1.370	-0.34	0.000	0.000 T	84.37	-0.34	-0.34	0.28
S13	Bi.C.1	0.00	-0.35	1.680	-0.27	0.000	0.000 T	46.06	-0.41	-0.41	0.20
S13	Bi.C.3	0.03	-0.29	1.606	-0.19	0.070	0.000 T	37.23	-0.40	-0.40	0.22
S14	Bi.C.3	0.00	-0.19	1.256	0.00	0.000	0.000 T	0.00	-0.31	-0.31	0.31
S14	Bi.C.3	0.00	-0.18	1.206	0.03	2.412	0.000 T	0.31	-0.30	0.32	0.32
S15	Bi.C.1	0.58	-0.94	1.398	0.00	0.297	0.000	-46.06	-2.17	-2.17	1.71
S16	Bi.C.1	0.17	-0.85	1.146	0.58	0.102	2.190	-84.37	-1.78	2.10	2.10
S17	Bi.C.1	0.04	-1.11	1.216	0.17	0.023	2.410	-115.91	-1.89	2.00	2.00
S18	Bi.C.1	-0.10	-1.24	1.213	0.04	2.478	0.000	-140.40	-1.88	2.00	2.00
S19	Bi.C.1	-0.19	-1.36	1.227	-0.10	0.000	0.000	-157.90	-1.91	1.98	1.98
S20	Bi.C.1	-0.27	-1.44	1.230	-0.19	0.000	0.000	-168.38	-1.91	1.97	1.97
S21	Bi.C.1	-0.14	-1.42	1.282	-0.27	0.000	0.000	-172.01	-1.99	1.99	1.89
S22	Bi.C.1	-0.27	-1.44	1.218	-0.14	0.000	0.000	-172.01	-1.89	1.99	1.99
S23	Bi.C.1	-0.19	-1.44	1.270	-0.27	0.000	0.000	-168.38	-1.97	-1.97	1.91
S24	Bi.C.1	0.19	1.36	1.227	0.10	0.000	0.000	-157.90	1.91	-1.98	-1.98
S25	Bi.C.1	0.10	1.24	1.213	-0.04	2.478	0.000	-140.40	1.88	-2.00	-2.00
S25	Bi.C.2	0.09	1.19	1.214	-0.05	2.473	0.000	-133.67	1.82	-1.93	-1.93
S26	Bi.C.1	-0.04	1.11	1.216	-0.17	0.023	2.410	-115.91	1.78	-2.10	-2.10
S27	Bi.C.1	-0.17	0.85	1.146	-0.58	0.102	2.190	-84.37	1.71	2.17	2.17
S28	Bi.C.1	0.00	-0.94	1.102	0.00	0.000	0.000	-46.06	-1.71	2.17	2.17
S29	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-34.62	0.00	0.00	0.00
S29	Bi.C.2	0.00	-0.22	0.875	0.00	0.000	0.000	-31.79	-0.49	-0.49	0.49
S29	Bi.C.3	0.00	-0.10	0.875	0.00	0.000	0.000	-26.43	-0.22	-0.22	0.22
S30	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	56.30	0.11	0.11	-0.11
S31	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-31.38	0.00	0.00	0.00
S32	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	46.84	0.11	0.11	-0.11
S33	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-26.14	0.00	0.00	0.00
S34	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	38.58	0.11	0.11	-0.11
S35	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-21.32	0.00	0.00	0.00
S36	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	29.97	0.11	0.11	-0.11
S37	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-16.41	0.00	0.00	0.00
S38	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-11.50	0.00	0.00	0.00
S39	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	21.45	0.11	0.11	-0.11
S40	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-6.63	0.00	0.00	0.00
S41	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	12.87	0.11	0.11	-0.11
S42	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-4.14	0.00	0.00	0.00
S43	Bi.C.1	0.00	-0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	4.50	-0.11	-0.11	0.11
S44	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	12.87	-0.11	-0.11	0.11
S44	Bi.C.2	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	4.50	0.11	0.11	-0.11
S45	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-6.63	0.00	0.00	0.00
S46	Bi.C.1	0.00	-0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	12.87	-0.11	-0.11	0.11
S47	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-11.50	0.00	0.00	0.00
S48	Bi.C.1	0.00	-0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	21.45	-0.11	-0.11	0.11
S49	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-16.41	0.00	0.00	0.00
S50	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	29.97	0.11	0.11	-0.11
S51	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-21.32	0.00	0.00	0.00
S52	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	38.58	0.11	0.11	-0.11
S53	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-26.14	0.00	0.00	0.00
S54	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	46.84	0.11	0.11	-0.11
S55	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-31.38	0.00	0.00	0.00
S56	Bi.C.1	0.00	0.08	1.526	0.00	0.000	0.000 T	56.30	0.11	0.11	-0.11
S57	Bi.C.1	0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.000	-34.62	0.00	0.00	0.00
S57	Bi.C.3	0.00	0.14	0.875	0.00	0.000	0.000	-27.83	0.31	0.31	-0.31

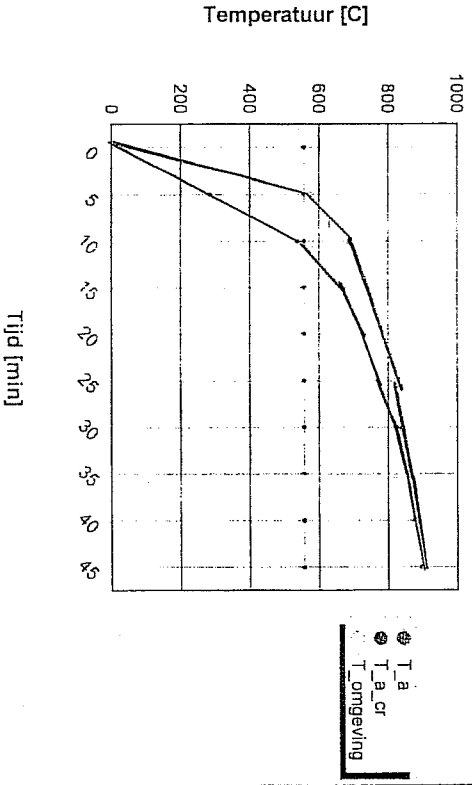
HEI100A

HEI60A

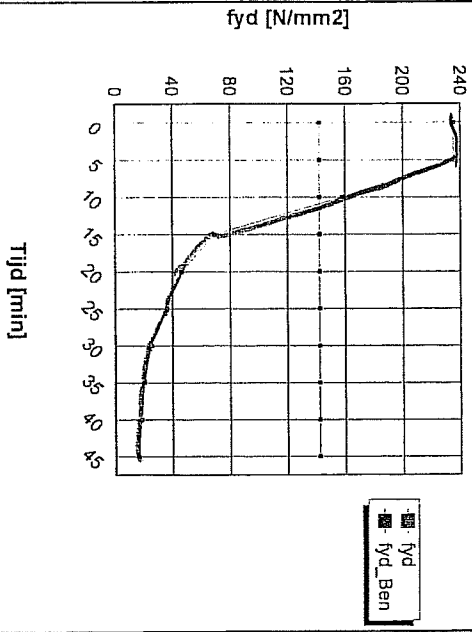
CAS761K1

Projectnaam:	HE160 A	Projectnr:	BOVENREGEEL
Onderdeel:		Constructeur:	
Klant:		Datum:	

Temperatuurverloop bij standaardbrand



Vloegrens ontwikkeling



Belasting type:	Kolom	KNIJLENSTE = 5 m'	
Knijlengte (20° C)	5.00 [m]	M _{1,s,d}	0.00 [kNm]
Knijlengte (brand)	5.00 [m]	M _{2,s,d}	0.00 [kNm]
M-equiv,s,d (brand)	0.00 [kNm]	M _{mid,s,d}	0.00 [kNm]
Nc,s,d (T-fire)	172.00 [kN]		

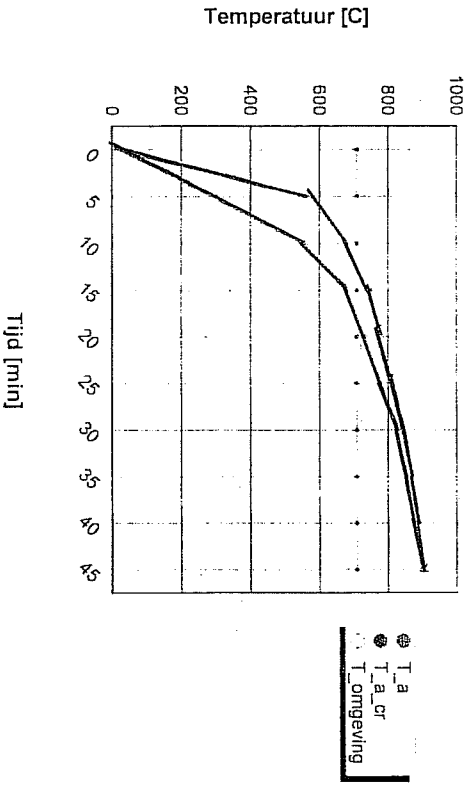
Profiel	HE160A	Z-as	
fyd (20°)	235 [N/mm2]	F-E (20°)	510.00 [kN]
fyd (brand)	235 [N/mm2]	F-E (brand)	510.00 [kN]
M _{y,p,l,d}	27.64 [kNm]	Wy,p]	117633 [mm3]
Nc,u,d	911.13 [kN]	Doorsnede	3877 [mm2]
		Oppervlak per meter	0.910 [m2/m]

Isolatie		Geldig tot	31 - 12 - 2099
Type			
Specifieke warmte	0 [J/kgK]		
Dichtheid	0 [kg/m3]		
Isolatie dikte	0.00 [mm]		
Profielfactor	234 [m/m2]		

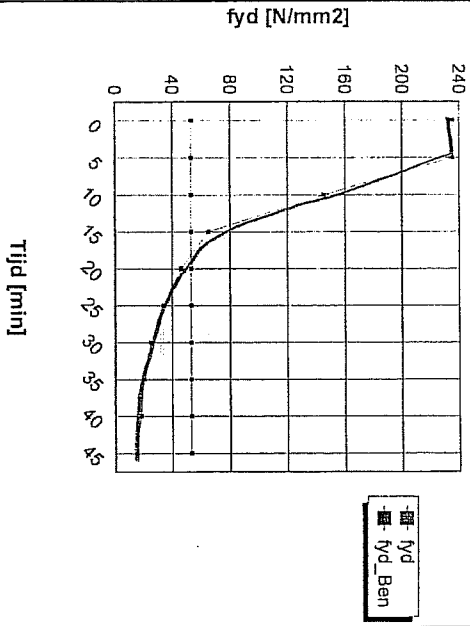
Resultaten			
Vereiste brandwerendheid	5 [min]	η	0.50
Berekende brandwerendheid	10 [min]	κ	1.20
Minimaal benodigde dikte	0.00 [mm]	Max Staal temperatuur	285 [C]
Conclusie:	Brandwerendheid voldoende!	Kritieke Staal temperatuur.	557 [C]
		Omgevingstemperatuur.	576 [C]

Projectnaam:		Projectnr:	ONDER REESEL
Onderdeel:		Constructeur:	
Klant:		Datum:	

Temperatuurverloop bij standaardbrand



Vloeigrens ontwikkeling



Belasting type: Trekstaaf

N_{c,s,d} (T-fire) 168.00 [kN]

Profiel	III:140A	Y-as	
f _{yd} (20°)	235 [N/mm ²]		
f _{yd} (brand)	235 [N/mm ²]		
M _{y,pl,d}	40.77 [kNm]	W _{y,pl}	173495 [mm ³]
N _{c,u,d}	738.28 [kN]	Doorsnede	3142 [mm ²]
		Oppervlak per meter	0.790 [m ² /m]

Isolatie

Geldig tot 31 - 12 - 2099

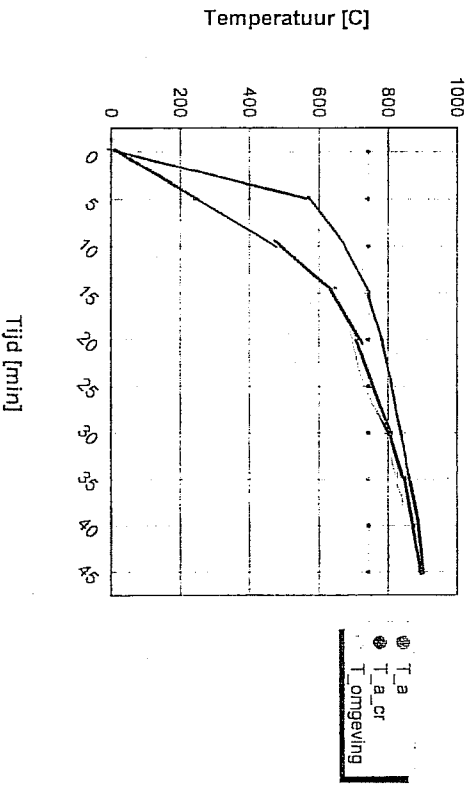
Type	
Specifieke warmte	0 [J/kgK]
Dichtheid	0 [kg/m ³]
Isolatie dikte	0.00 [mm]
Profielfactor	253 [m/m ²]

Resultaten

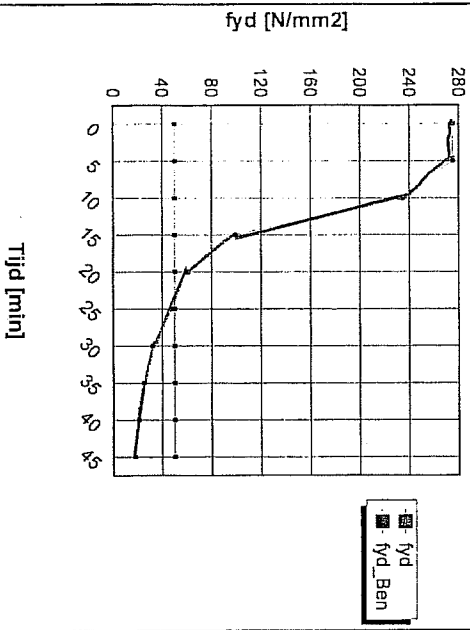
Vereiste brandwerendheid	5 [min]	η	0.23
Berekende brandwerendheid	16 [min]	κ	1.00
Minimaal benodigde dikte	0.00 [mm]	Max Staal temperatuur	300 [C]
Conclusie:	Brandwerendheid voldoende!	Kritieke Staal temperatuur.	709 [C]
		Omgevingstemperatuur.	576 [C]

Projectnaam:		Projectnr:	DIAGONAL
Onderdeel:		Constructeur:	
Klant:		Datum:	

Temperatuurverloop bij standaardbrand



Vloeigrens ontwikkeling



Belasting type: Trekstaaf

N_{c,s,d} (T-fire) 56.00 [kN]

Profiel	B76.1/5	Y-as
f _{yd} (20°)	275 [N/mm2]	
f _{yd} (brand)	275 [N/mm2]	
M _{y,p,l,d}	6.96 [kNm]	W _{y,p,l} 25300 [mm3]
N _{c,u,d}	308.00 [kN]	Doorsnede 1120 [mm2]
		Oppervlak per meter 0.210 [m2/m]

Isolatie Geldig tot 31 - 12 - 2099

Type	
Specifieke warmte	0 [J/kgK]
Dichtheid	0 [kg/m3]
Isolatie dikte	0.00 [mm]
Profielfactor	185 [m/m2]

Resultaten

Vereiste brandwerendheid	5 [min]	η	0.18
Berekende brandwerendheid	24 [min]	κ	1.00
Minimaal benodigde dikte	0.00 [mm]	Max Staal temperatuur	244 [C]
Conclusie:	Brandwerendheid voldoende !	Kritieke Staal temperatuur.	743 [C]
		Omgevingstemperatuur.	576 [C]