

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Berekening van de brandweerstand van aluminium constructies
volgens Eurocoderegels

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :

ir. Cyriel CLAUWAERT

Luke van Ratingen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



KU LEUVEN



KU LEUVEN

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Berekening van de brandweerstand van aluminium constructies
volgens Eurocoderegels

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :

ir. Cyriel CLAUWAERT

Luke van Ratingen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



KU LEUVEN

Voorwoord

Al van een jongen leeftijd ben ik gefascineerd door alles wat met hulpverlening te maken heeft. Dit zijn mensen die, die vaak met veel risico's, hun eigen leven op het spel zetten om andere mensen te helpen. Om deze reden heb ik dan ook beslist dat mijn carrière zal uitgroeien in de hulpverlening. Ik heb gekozen voor deze opleiding om na het behalen van mijn diploma te kunnen starten als brandweerofficier. Om deze reden lijkt het mij dus ook zeer interessant om mijn masterproef te volgen in een brand gerelateerd onderwerp. Ik ben daarom de UHasselt en KU Leuven ook zeer dankbaar voor de kans om mij te verdiepen in het wetenschappelijke aspect van brandbestrijding.

Doorheen het verloop van dit onderzoek is mijn wetenschappelijke kant ook zodanig geprikkeld dat ik hoop een doctoraat te kunnen volgen die verder gaat over dit onderwerp.

Graag wil ik ook Prof. Dr. Ir. Herve Degee bedanken en Ir. Cyriel Clauwaert voor de begeleiding tijdens deze masterproef. Eveneens bedank ik Ir. Cyriel Clauwaert voor het nazicht op de inhoud. Ook bedank ik graag het Aluminium Center België voor het verschaffen van de benodigde informatie en de mede opvolging van de masterproef.

Ook een speciale dank naar Ellen Van de Weghe en Lies Van den Broeck voor het nazicht op schrijffouten.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Inhoudsopgave.....	3
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren.....	7
Lijst van afkortingen en symbolen	9
Bijzondere termen betreffende ontwerp en berekening in het algemeen	10
Termen betreffende thermische belastingen	11
Termen betreffende de berekening van warmteoverdracht	12
Symbolen	12
Abstract.....	15
Abstract (English)	17
1 Inleiding.....	19
Doelstellingen	20
2 Literatuurstudie	21
2.1 Het materiaal aluminium	21
2.2 Brandwetgeving volgens Eurocode regels	21
2.2.1 Procedure voor constructief ontwerp	21
2.2.2 Thermische belasting voor de thermische berekening.....	23
2.2.3 Natuurlijke-brandmodellen	25
2.2.4 Mechanische belasting voor de constructieve berekening	27
2.3 Ontwerp en berekening van aluminiumconstructies bij brand volgens EN1999-1-2.....	29
2.3.1 Algemeen	29
2.3.2 Grondslagen van het ontwerp	30
2.3.3 Materiaaleigenschappen aluminiumlegeringen: thermisch en mechanisch.....	35
2.4 Ontwerp en berekening van constructies bij brand	42
2.4.1 Eenvoudige berekeningsmodellen.....	42
2.4.2 Validatie van geavanceerde berekeningsmodellen	57
2.5 Brandreactie van aluminium in kaart gebracht	57
2.5.1 Voordelen van aluminium.....	57
2.5.2 Aluminium legeringen.....	57
2.5.3 Volgens de Ramberg-Osgood methode	58
2.5.4 Spanningcorrosie	61
2.6 Brandveilige aluminium structuren	62
2.6.1 Vergelijking aluminium met staal bij brand	62
2.6.2 Actieve en passieve brandbescherming	64
2.7 Basisnormen brandveiligheid.....	69
2.7.1 Laagbouw	70
2.7.2 Middelhoge gebouwen	71
2.7.3 Hoge gebouwen	71
2.7.4 Industriegebouwen	71
2.8 Methoden om de brandweerstand te verbeteren	72
2.8.1 Brandwerende verven en coatings	73
2.8.2 Brandwerende doorvoeren.....	73
2.8.3 Manieren om aluminium te beschermen voor brand	73
3 Simulaties.....	77
3.1 Voorbeeld van Hydro	77
3.2 Methodiek simulaties	78
3.3 Grafieken.....	91
3.4 Proeven	91

4	Voorbeeld berekening	93
4.1	Flexibele rotswolisolatie	93
4.2	Gyproc omkasting	95
4.3	Cellenglas isolatieplaten	99
5	Resultaten	101
6	Conclusie en toekomstvisie.....	103
	Referenties.....	105
	Bijlages	107

Lijst van tabellen

Tabel 1 Reductiefactor van de 0.2% rekgrens voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur voor een thermische blootstellingsperioden tot 2uur	37
Tabel 2 Ondergrenzen voor de reductiefactoren van de 0,2% rekgrens $k_{o,\theta}$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur voor thermische blootstellingsperioden tot 2 uur	37
Tabel 3 Elasticiteitsmodulus van aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur voor een thermische blootstellingsperiode van twee uur, $E_{al,\theta}$	38
Tabel 4 Profiefactor A_m/V van onbeklede constructieve aluminiumelementen	52
Tabel 5 Profiefactor A_p/V voor constructieve aluminiumelementen met een brandwerende bekleding bij gebruik van de methode van de gelokaliseerde massa "lumped mass method"	54
Tabel 6 Aluminium legeringen: eigenschappen en toepassingen	58
Tabel 7 Overzicht eigenschappen aluminium 6082-T6 en staal S355	63
Tabel 8 Waarden voor de vereiste brandreactie volgens KB basisnorm, laagbouw	70
Tabel 9 Waarden voor de vereiste brandreactie volgens KB basisnormen, middelhoge bouw.....	71
Tabel 10 Toelaatbare oppervlakte in m^2 voor industriegebouwen met slechts een bouwlaag of voor de compartimenten daarvan	72
Tabel 11 Minimale brandweerstand van de compartimentwanden.....	72
Tabel 12 Brandklassen	74
Tabel 13 Rookklassen	74
Tabel 14 Druppelvormingsklassen	75
Tabel 15 invloed temperatuur op elasticiteitsmodulus en 0,2% rekgrens in voorbeeld oefening.....	85
Tabel 16 Gegevens Bistra proef Rockwool 133 40 mm	93
Tabel 17 Resterende weerstand	95
Tabel 18 Gegevens Bistra proef Gyproc 2*15mm	96
Tabel 19 Verloop van de sterkte bij Gyproc panelen 2x15mm.....	98
Tabel 20 Gegevens Bistra proef Foamglas T3+ 50 mm	99

Lijst van figuren

Figuur 1: "Skyhall Brussel airport" Aluminium constructie	19
Figuur 2 Standaardbrand versus natuurlijke brand	24
Figuur 3 Brandkrommen	25
Figuur 4 Stappenplan geavanceerde berekeningsmodellen of vereenvoudigde berekeningsmodellen	26
Figuur 5 Verloop van de reductiefactor in functie van de belastingsverhouding	33
Figuur 6 Mechanische eigenschappen van aluminium bij verhoogde temperaturen volgens EN 1999-1-2	35
Figuur 7 Impact temperatuur op draagvermogen aluminium	35
Figuur 8 Maximale spanning aluminium legeringen.....	36
Figuur 9 Reductie coefficient vloeispanning aluminium legering.....	36
Figuur 10 Verhoudingen k_{θ} voor de 0,2% rekgrens en verhouding $E = E_{a,\theta}/E_a$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur θ_{al} /°C voor een thermische blootstellingsperiode tot 2 uur, EN-AW 3004 en 6xxx-legeringen van tabel 1	38
Figuur 11 Verhoudingen k_{θ} voor de 0,2% rekgrens θ en verhouding $E = E_{a,\theta}/E_a$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur θ_{al} /°C voor een thermische blootstellingsperiode tot 2 uur, 5xxx legeringen van tabel 1	39
Figuur 12 Relatieve thermische verlenging van aluminiumlegeringen als functie van de temperatuur	40
Figuur 13 Specifieke warmte van aluminiumlegeringen als functie van de temperatuur.....	40
Figuur 14 Warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de temperatuur	41
Figuur 15 Berekeningsmodellen volgens Ralph Hamerlinck	42
Figuur 16 FSW toepassing op aluminium	43
Figuur 17 Invloedszone krachtsreductie A) klassiek lassen, B) FSW. Via Ir. Cyriel Clauwaert	43
Figuur 18 Aluminium elementen met gearceerde drukzone voor doorsnedenclassificatie	44
Figuur 19 Classificatie van doorsneden volgens bijlage F NBN EN 1999-1-1.....	44
Figuur 20 Vergelijking van de kritische temperatuur tussen het onderzoek van Y.Q.Zheng en Z.Zhang en de Eurocode 9	47
Figuur 21 Voorbeelden van kniklengtes l_{fi} van kolommen in geschoorde raamwerken.....	48
Figuur 22 Verband tussen relatieve knikweerstand en in-elastische relatieve slankheid	50
Figuur 23 Voorbeelden van groeven met een breedte aan het oppervlak < 20 mm, en groeven met een breedte aan het oppervlak > 20 mm	51
Figuur 24 Invloed van de dikte van de vuurvaste plaat tegenover de thermische geleidbaarheid	54
Figuur 25 Spannings-rek diagrammen voor aluminium (a) normaal elastisch (b) Ramberg-Osgood ..	59
Figuur 26 Onderzoek "behaviour of aluminium allor structures under fire"	60
Figuur 27 Brandweerstand van verschillende aluminium legeringen	60
Figuur 28 Brandweerstand van aluminium legeringen met afwisselende waarde voor n	60
Figuur 29 Vergelijking van de spannings-rek diagrammen van staal en aluminium	64
Figuur 30 Links: Staalprofiel met brandweerstand 60 min. Rechts: Aluminium profiel met brandweerstand 60 min	66
Figuur 31 Aluminium profielen 5xxx onderhevig aan brandtest volgens Y.Q. Zheng en Z. Zhang	67
Figuur 32 Resultaten proef Y.Q.Zheng en Z.Zhang	68
Figuur 33 FireMaster Marine Plus blanket in simulatie via Ir Cyriel Clauwaert.....	68
Figuur 34 Onderscheidt gebouwen van WTCB en de basisnormen brandveiligheid	70
Figuur 35 Verschillende methoden om het aluminium profiel met isolatie in te pakken	76
Figuur 36 Links: Stalen I profiel REI 60; Rechts: Aluminium I-vormig profiel REI 60	77
Figuur 37 Bescherming Stalen profiel en aluminium profiel met Firemaster Marine Blanket plus	78
Figuur 38 I vormig aluminium profiel getekend in Autocad	78
Figuur 39 Aluminium profiel in Bisco	79

Figuur 40 Controle op afmetingen in Bisco.....	79
Figuur 41 Definieren van de vlakken in Bisco	79
Figuur 42 Resultaat Bisco berekening.....	79
Figuur 43 Definieren van de grafieken voor de simulatie.....	80
Figuur 44 Koppelen van de juiste grafiek aan het juiste materiaal	80
Figuur 45 Test na 30 minuten	81
Figuur 46 Test na 60 minuten	82
Figuur 47 Test na 63 minuten	82
Figuur 48 Test na 63 minuten	83
Figuur 49 Verdeling van temperatuur over I-vormig profiel na 30 minuten	83
Figuur 50 Reductie van de elasticiteitsmodulus en de 0,2% rekgrens per tijdsverloop tot 200°C.....	86
Figuur 51 Reductie van de elasticiteitsmodulus en de 0,2% rekgrens per temperatuurgradiënt.....	86
Figuur 52 Temperatuurstijging in het profiel.....	87
Figuur 53 Reductie van het traagheidsmoment	87
Figuur 54 Visuele voorstelling van de reductie per temperatuurstijging voor doorsnedeklasse 1 en 2	88
Figuur 55 Visuele voorstelling van de reductie per temperatuurstijging voor doorsnedeklasse 3	89
Figuur 56 Vergelijking traagheidsmoment per doorsnedeklasse	90
Figuur 57 Vergelijking weerstandsmoment per doorsnedeklasse	90
Figuur 58 Test 60 minuten	94
Figuur 59 Test 90 minuten	94
Figuur 60 Test 120 minuten	94
Figuur 61 Reductie van het profiel bij Rockwool 40 mm	94
Figuur 62 Grafiek van simulatie Rockwool 133 40mm	95
Figuur 63 Gyproc omkasting Bisco berekening.....	97
Figuur 64 Resterende weerstand bij gyroc 2 x 15mm	97
Figuur 65 Reductie van de doorsneden bij Gyproc 2x15 mm.....	98
Figuur 66 Resultaat Foamglass na 3 uur	99
Figuur 67 Vergelijking van brandwerende isolatie	101

Lijst van afkortingen en symbolen

In dit hoofdstuk zullen enkele belangrijke termen verduidelijkt worden om de tekst correct te interpreteren. Deze termen zijn overgenomen uit de Eurocode 1 – belasting op constructies – Deel 1-2: Algemene belasting – Belasting bij brand [4].

equivalente duur van blootstelling aan brand

tijdsduur van blootstelling aan de standaardbrandkromme die wordt verondersteld hetzelfde thermisch effect te hebben als een werkelijke brand in een compartiment.

uitwendig constructiedeel

constructiedeel aan de buitenzijde van het gebouw dat kan worden blootgesteld aan brand via openingen in de omhullende constructie van het gebouw.

brandcompartiment

ruimte binnen een gebouw die zich uitstrekt over een of meer verdiepingen en die is omsloten door scheidingselementen die de uitbreiding van de brand gedurende de van toepassing zijnde blootstelling aan brand tegengaan.

brandwerendheid

vermogen van een constructie, een gedeelte of een element daarvan om de vereiste functies te vervullen (dragende en/of scheidende functie) bij een bepaald belastingsniveau, een bepaalde blootstelling aan brand en gedurende een bepaalde tijdsduur.

volledig ontwikkelde brand

deelname van alle brandbare oppervlakken in een brand aan een bepaalde ruimte.

niet-rechtstreekse belastingen door brand

inwendige krachten en momenten veroorzaakt door thermische uitzetting.

vlamdichtheid (E)

vermogen van een scheidingselement van een bouwconstructie om, als het aan de ene zijde is blootgesteld aan brand, de doorslag van vlammen en hete gassen te voorkomen en het optreden van vlammen aan de andere zijde te voorkomen.

thermische isolatie (I)

vermogen van een scheidingselement van een bouwconstructie om, als het aan de ene zijde is blootgesteld aan brand, de temperatuurstijging aan de andere zijde te beperken tot onder een bepaald niveau.

dragende functie (R)

vermogen van een constructie of element om bepaalde belastingen te dragen tijdens de brand van toepassing, volgens vastgestelde criteria.

element

basisonderdeel van een constructie (zoals een balk of kolom, maar ook samengestelde delen, zoals stijl- en regelwerk, vakwerk, ...) dat op zichzelf wordt beschouwd met de rand- en oplegvoorwaarden van toepassing.

elementberekening (bij brand)

thermische en mechanische berekening van een constructief element blootgesteld aan brand, waarbij het element op zichzelf wordt beschouwd met de opleggingen en randvoorwaarden van toepassing; niet rechtstreekse belastingen door brand worden niet in beschouwing genomen, behalve die welke het gevolg zijn van temperatuurgradiënten.

ontwerp en berekening bij normale temperatuur

ontwerp en berekening van de uiterste grenstoestand bij omgevingstemperatuur volgens deel 1-1 van EN 1992 tot en met EN 1996 of EN 1999.

scheidende functie

vermogen van een scheidingselement om uitbreiding van brand tegen te gaan (bijvoorbeeld door doorslag van vlammen en hete gassen – zie vlamdichtheid) of ontbranding aan de niet-blootgestelde zijde (zie thermische isolatie) gedurende de brand van toepassing.

scheidingselement

dragend of niet-dragend element (bijvoorbeeld een wand) dat onderdeel is van de omhullende constructie van een brandcompartiment.

standaard brandwerendheid

vermogen van een constructie of een gedeelte daarvan (gewoonlijk alleen de elementen) om te voldoen aan de vereiste functies (dragende en/of scheidende functie), bij blootstelling aan opwarming volgens de standaardbrandkromme, bij een bepaalde belastingscombinatie en voor een bepaalde tijdsduur.

constructieve elementen

dragende elementen van een constructie met inbegrip van de verbindingen.

thermische berekening

procedure voor het bepalen van de temperatuurontwikkeling in elementen op basis van de thermische belastingen (nettowarmtestroomdichtheid) en de thermische materiaaleigenschappen van de elementen en van eventuele beschermende lagen.

thermische belastingen

belastingen op de draagconstructie bepaald door de nettowarmtestroomdichtheid op de elementen.

Bijzondere termen betreffende ontwerp en berekening in het algemeen

geavanceerd brandmodel

ontwerpbrand op basis van behoud van massa en energie.

*numeriek stromingsmodel *) / computational fluid dynamics (CFD)*

brandmodel om de partiële differentiaalvergelijkingen numeriek op te lossen die in alle punten van het compartiment de thermodynamische en aerodynamische variabelen geven

brandmuur

scheidingswand tussen twee ruimten (bijvoorbeeld twee gebouwen) ontworpen en berekend voor brandwerendheid en constructieve stabiliteit en mogelijk een weerstand tegen horizontale belastingen zodat, bij brand en bezwijken van de draagconstructie aan de ene zijde van de muur, de uitbreiding van brand naar de andere zijde van de muur wordt voorkomen.

eenzone model

brandmodel waarbij wordt uitgegaan van een homogene temperatuur van het gas in het compartiment.

eenvoudig brandmodel

ontwerpbrand op basis van een beperkt toepassingsgebied van specifieke fysische parameters.

tweezonemodel

brandmodel waarbij verschillende zones in een compartiment worden vastgesteld: de bovenste laag, de onderste laag, de brand en zijn pluim, het externe gas en de wanden; in de bovenste laag wordt uitgegaan van een gelijkmatige temperatuurverdeling van het gas.

Termen betreffende thermische belastingen

verbrandingsfactor

factor die de effectiviteit van de verbranding weergeeft, variërend van 1 voor complete verbranding tot 0 voor volledig belemmerde verbranding.

ontwerpbrand

bepaalde brandontwikkeling aangenomen voor ontwerp en berekening.

rekenwaarde van de vuurbelasting

vuurbelasting beschouwd om thermische belastingen te bepalen bij ontwerp en berekening bij brand; hierin zijn onzekerheden verdisconteerd.

ontwerpbrandscenario

voorgeschreven brandscenario op basis waarvan de berekening wordt uitgevoerd.

kromme voor externe brand

nominale temperatuur-tijdcurve voor de buitenzijde van scheidende buitenwanden die vanaf verschillende delen van de gevel kan worden blootgesteld aan brand, namelijk direct vanaf de binnenzijde van het desbetreffende brandcompartiment of vanuit een compartiment dat onder of naast de desbetreffende buitenwand is gelegen.

risico op ontstaan van brand

parameter waarin de kans op ontbranding, het gebruik van het compartiment en de bezettingsgraad worden uitgedrukt.

vuurbelasting

vuurlast per oppervlakte-eenheid betrokken op de vloeroppervlakte q_f , of op de oppervlakte van de volledige omhullende constructie met inbegrip van de openingen, q_t .

vuurlast

som van alle thermische energie die vrijkomt bij de verbranding van alle brandbare materialen in een ruimte (inhoud van het gebouw en constructie-elementen).

brandscenario

kwalitatieve beschrijving van het verloop van een brand in de tijd, waarbij wordt aangegeven welke belangrijke gebeurtenissen de brand kenmerken en onderscheiden van andere mogelijke branden; gewoonlijk zijn dit het proces van ontbranding en uitbreiding van de brand, de volledig ontwikkelde fase, de uitdovingsfase, met de omgeving van het gebouw en de installaties die het verloop van de brand beïnvloeden.

vlamoverslag

gelijktijdige ontsteking van de totale vuurlast in een compartiment.

koolwaterstofkromme

nominale temperatuur-tijdcurve die de gevolgen van een koolwaterstofbrand weergeeft.

lokale brand

brand waarbij slechts een beperkte oppervlakte van de vuurlast in het compartiment betrokken is.

openingsfactor

factor die de mate van ventilatie weergeeft, afhankelijk van de oppervlakte van de openingen in de wanden van het compartiment, de hoogte van deze openingen en de totale oppervlakte van buitenzijde de omhullende constructie van deze opening.

brandvermogensdichtheid

warmte (energie) afgegeven door een brandbaar product als functie van de tijd.

standaardbrandkromme

nominale kromme vastgesteld in prEN 13501-2 als weergave van een model van een volledig ontwikkelde brand in een compartiment.

temperatuur-tijdkrommen

gastemperatuur in de omgeving van het oppervlak van elementen als functie van de tijd; de krommen kunnen zijn:

- nominaal: conventionele krommen, toegepast voor de klassering of toetsing van de brandwerendheid, bijvoorbeeld de standaardbrandkromme, kromme voor externe brand, koolwaterstofkromme;
- parametrisch: bepaald op basis van brandmodellen en specifieke fysische parameters die bepalend zijn voor de omstandigheden in het brandcompartiment

Termen betreffende de berekening van warmteoverdracht

zichtfactor

factor voor warmteoverdracht door straling van oppervlak A naar oppervlak B, vastgesteld als de fractie van de diffuse stralingsenergie die oppervlak A verlaat en oppervlak B bereikt.

warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie

warmtestroomdichtheid door convectie op het constructiedeel door het verschil tussen de gastemperatuur rondom het oppervlak van toepassing van het element en de temperatuur van dat oppervlak.

emissiefactor

absorptiefactor van een oppervlak, dit is de verhouding van de stralingswarmte die wordt geabsorbeerd door een gegeven oppervlak tot die door een zwart oppervlak.

nettowarmtestroomdichtheid

energie, per eenheid van tijd en oppervlakte, geabsorbeerd door elementen.

Symbolen

Eveneens worden er een reeks symbolen gebruikt die hieronder verduidelijkt zullen worden.

$t_{fi,d}$	= de rekenwaarde van de brandwerendheid
$t_{fi,requ}$	= vereiste tijdsduur van de brand
$R_{fi,d,t}$	= de rekenwaarde van de weerstand van het element bij brand op tijdstip t
E	= Young's modulus
$E_{fi,d,t}$	= rekenwaarde van het belastingeffect bij de brand op tijdstip t, bepaald volgens EN 1991-1-2, inclusief de effecten van thermische uitzetting en vermogen.
$E_{fi,d}$	= de rekenwaarde van het belastingeffect voor het ontwerp en berekening bij de brandsituatie volgens EN 1991-1-2
E_d	= De rekenwaarde van de overeenkomstige kracht of moment voor ontwerp en berekening
θ_d	= de rekenwaarde van de materiaaltemperatuur
$\theta_{cr,d}$	= de rekenwaarde van de kinetische materiaaltemperatuur
θ_r	= de effectieve stralingstemperatuur van de omgeving van de brand
θ_m	= de oppervlaktetemperatuur van het element in °C
θ_g	= de gastemperatuur in het brandcompartiment in °C
Q	= warmtetransport in Watt (W)
Q_a	= de warmtestroomdichtheid van de afgegeven straling (W/m ²)
Q_z	= warmtestraling van het "zwarte lichaam"

T	= de absolute temperatuur in Kelvin (K)
ΔT	= temperatuurverschil in Kelvin (K)
α_c	= warmteoverdrachtcoëfficiënt, deze is afhankelijk van het materiaaltipe. W/m^2K
B_1	= hyperbolische-sinus-wet mutliplayer (m^2/N)
A	= oppervlak in m^2
A_1	= kracht wet mutliplayer (1/s)
A_p/V	= de profielfactor voor aluminiumelementen bekleed met een brandwerend bekledingsmateriaal
A_m/V	= de profielfactor voor onbeschermd aluminiumelementen
A_i	= een elementaire oppervlakte van de netto doorsnede met een temperatuur θ_i
$h_{net,c}$	= nettowarmtestroom door convectie
$h_{net,s}$	= nettowarmtestroom door straling
K	= de sterktecoëfficiënt van het materiaal, meestal = 0,002
ϕ	= de zichtfactor
ε_m	= de emmissiefactor van het oppervlak van het element
ε_f	= de emmissiefactor van de brand
σ_s	= stralingsconstante van Stephan Boltzmann ($=5,67*10^{-8} W/m^2K^4$)
σ	= Spanning
t	= de tijd in minuten
X_k	= De karakteristieke waarde van een sterkte- of vervormingseigenschap voor een ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1
$X_{k,\theta}$	= De waarde van een materiaaleigenschap in ontwerp en berekening bij brand, in het algemeen afhankelijk van de temperatuur van het materiaal.
k_θ	= de reductiefactor voor een sterkte- of vervormingseigenschap ($X_{k,\theta}/X_k$) afhankelijk van de temperatuur en het materiaal
$f_{0,\theta}$	= de 0.2% rekgrens bij verhoogde temperatuur
f_0	= de 0.2% rekgrens bij kamertemperatuur volgens EN 1999-1-1
l	=de lengte bij 20°C
Δl	= de verlenging veroorzaakt door temperatuur
ε_{cre}	= kruipsnelheid
ΔH	= activatie energy (J/kg)
R	= gas constante (J/kg°C)
$k_{0,\theta,i}$	= de reductiefactor voor sterkte in geval van de 0.2% rekgrens bij temperatuur θ_i , θ_i is de temperatuur van de elementaire oppervlakte A_i
N_{Rd}	= is de rekenwaarde van de weerstand voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1. N_{Rd} is ofwel $N_{0,Rd}$ ofwel $N_{u,Rd}$
γ_{Mx}	= is de partiële factor volgens EN 1999-1-1. γ_{M1} is toegepast in combinatie met $N_{0,Rd}$ en γ_{M2} is toegepast in combinatie met $N_{u,Rd}$
$\chi_{20^\circ C}$	= De relatieve knikweerstand
$f_{0.2,\theta}$	= 0.2% rekspanning bij een specifieke temperatuur
k_{sh}	= De correctiefactor voor het schaduwefect
h_{net}	= De rekenwaarde van de nettowarmtestroomdichtheid per eenheid van oppervlakte, zie EN 1991-1-2
$\theta(t)$	= de temperatuur van de omringende gassen op tijdstip t (°C)
$\theta_{al}(t)$	= de aluminium temperatuur op tijdstip t (°C)
$\Delta\theta(t)$	= toename van temperatuur van de omringende gassen gedurende tijdsinterval Δt (°C)
d_p	= dikte van brandwerend materiaal
ρ_p	= dichtheid in kg/m^3
c_p	= specifieke warmte in J/kg°C

ρ'_p	= dichtheid met vocht in kg/m^3
c'_p	= specifieke warmte met vocht in $J/kg^\circ C$
P	= vocht inhoud
c_w	= specifieke warmte van water = $4190 J/kg^\circ C$
ΔH_w	= verdampingswarmte van water = $2.27 MJ/kg$
ξ_w	= voortgangsvariabele variabele voor de verdamping van water
ε	= rek
$f_{0.2}$	= Vloeispanning
n	= rekverhardingscoëfficiënt
f_t	= Absolute spanning
ε_u	= Absolute rek

Abstract

Er ontstaat een steeds groter wordende interesse in het gebruik van aluminium in constructies. Het grootste voordeel van aluminium is zijn relatief lage gewicht in vergelijking met zijn sterkte. Echter is een grote beperking het gedrag van aluminium wanneer het in contact komt met vuur. De Eurocode over brandweerstand van aluminium (EN 1999-1-2) is gestoeld op de Eurocode die focust op brandweerstand van staal (EN 1993-1-2) maar andere aanvullingen zijn mogelijk. Er is een ruim aanbod aan buitenlandse literatuur over aluminium. Maar door het ingewikkeld jargon en Engelse taal is dit niet voor iedereen even toegankelijk. Samen met prof. Dr. Ir. Hervee Degee en Ir. Cyriel Clauwaert probeert dit onderzoek duidelijkheid te bieden over de brandveilige toepassingen van aluminium constructies.

Dit onderzoek werkt met pakket van verschillende soorten software. Bistra wordt gebruikt voor thermische berekeningen en SCIA ENGINEER voor stabiliteitsberekeningen. Beide programma's worden steeds gebruikt met in Autocad uitgewerkte voorbeelden. De basis van de berekeningen ligt bij de Eurocode; door toevoegingen van resultaten van de studie met voornoemde softwarepakketten probeert het onderzoek de Eurocoderegels voor brandveilige aluminiumconstructies in de praktijk te brengen.

Het onderzoek verduidelijkt de verschillende methodes om aluminium structuren te beschermen en leidt tot een eerste basis. Een uitgebreider onderzoek kan plaatsvinden vertrekkende vanuit deze studie.

Abstract (English)

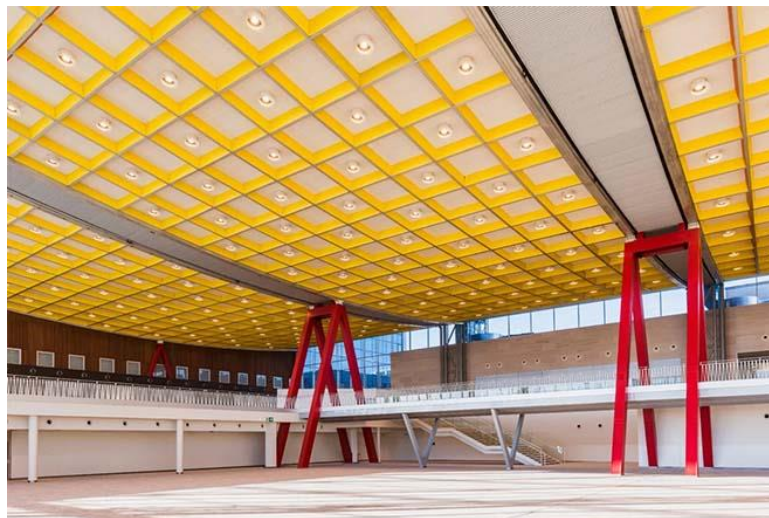
There is a growing interest in the use of aluminium in constructions. The greatest advantage of aluminium is its relatively low weight in comparison to its strength. However, a major limitation is the behaviour of aluminium when in contact with fire. The Eurocode on fire resistance of aluminium (EN 1999-1-2) is based on the Eurocode that focuses on fire resistance of steel (EN 1993-1-2), but other additions are possible. There is a wide range of foreign literature on aluminium. However, the complicated jargon and English language make it not equally accessible to everyone. Together with Prof. Dr. Ir. Hervee Degee and Ir. Cyriel Clauwaert, this research tries to provide clarity about the fire-safe applications of aluminium structures.

This research works with a package of different types of software. Bistra is used for thermal calculations and SCIA ENGINEER for stability calculations. Both programmes are always used with examples worked out in Autocad. The basis of the calculations is the Eurocode; by adding the results of the study with the above mentioned software packages, the research tries to put the Eurocode rules for fire safe aluminium structures into practice.

The study clarifies the different methods to protect aluminium structures and leads to a first baseline. A more extensive research can take place starting from this study.

1 Inleiding

Vanaf de 20^e eeuw is aluminium op de markt gekomen als een nieuw bouwproduct. Het materiaal kende verschillende voordelen, zo is het een van de lichtere metaalsoorten en bestand tegen corrosie. Echter heeft aluminium nooit echt vertrouwen gewonnen in de bouwwereld als structureel materiaal wegens zijn lage smelttemperatuur, namelijk 650°C [5]. Toch worden er in België al constructies uitgevoerd in aluminium zoals t' Kuipke in Gent [6], dit is een Wielerpiste gebouwd in 1963. Of de skyhall van Brussels Airport (figuur 1) gebouwd in 1958 [7]. Dit zonder dat er veel gekend was over het brandgedrag van aluminium. Er is dus een noodzaak om de constructie te berekenen volgens eurocode regels, het gedrag onder brandbelasting te begroten en deze te vergelijken met beschikbare resultaten.



Figuur 1: "Skyhall Brussel airport" Aluminium constructie [7]

Doorheen de jaren zijn er verschillende methodes ontwikkeld om de brandwerendheid van staal te verbeteren, echter is er in België een gebrek aan kennis omtrent de brandwerendheid van aluminium voor structurele draagelementen in constructies. Aluminium is geen onbekend materiaal in de bouwwereld, maar het wordt vooral gebruikt voor afwerkingen. Slechts zelden wordt er een gebouw uitgevoerd in aluminium. Wanneer de brandwerendheid van aluminiumconstructies zodanig verbeterd kan worden dat deze een gelijkgestelde prestatie levert als staal, maakt dit dat aluminium eveneens een interessant materiaal wordt om te gebruiken in de bouwwereld als structureel materiaal voor draagconstructies. Voornamelijk door zijn licht gewicht wordt het aspect bij verbouwingen of toevoeging van extra bouwlagen op bestaande gebouwen een interessant gegeven. Een groot aandachtspunt van constructies in aluminium is de brandweerstand van het aluminium wanneer deze onvoldoende beschermd worden. Daarom komt de vraag vanuit het Aluminium Center om onderzoek uit te voeren naar de brandweerstand van aluminium en of deze verbeterd kan worden. Hetzij evenaren met de brandweerstand van andere constructiematerialen die al worden gebruikt om draagstructuren te realiseren zoals staal, beton, hout, steen, ... Hiervoor heeft het Aluminium Center de universiteit ingeschakeld, zo is de onderzoeksvraag tot stand gekomen.

De intentie van het onderzoek is om aluminium aan te bieden als volwaardig constructiemateriaal en zodat het ingezet kan worden, niet alleen voor de afwerking, maar ook om structurele draagelementen in de constructie te realiseren.

Het onderzoek zal de focus leggen op de reactie van aluminium bij brand. Eveneens wordt er een vergelijking gemaakt met staal om de verschillen en gelijkenissen bij brand in kaart te brengen.

Nadat de reactie van aluminium bij brand bepaald is, worden de mogelijkheden bekeken om met brandbeschermingsproducten de brandweerstand te verhogen. Hiervoor worden de Europese richtlijnen voor brandveiligheid en wat de nodige eisen zijn toegepast. Vervolgens volgt er een beoordeling of de eisen te behalen zijn met aluminium.

Voor de toepassingen op aluminium worden de brandwerende toepassingen van staal bestudeerd. Vervolgens wordt er geoordeeld of deze ook bij aluminium van toepassing kunnen zijn. Er volgen enkele testen op de brandweerstand van aluminium met een brandwerende bescherming zoals deze bij staal. Met de resultaten volgt een oordeel over hoe aluminium met een brandwerende bescherming reageert tijdens een brand ten opzichte van staal.

Vervolgens wordt er een eindbesluit opgesteld uit de bekomen resultaten en volgt er een vergelijkingen met staal. Hieruit kan men dan eenvoudig bepalen welke bescherming vereist is om te voldoen aan de voorwaarden van de basisnorm brandveiligheid.

Doelstellingen

Uit deze onderzoeksvraag zal het onderzoek een duidelijk beeld verschaffen over aluminium en zijn toepassingen in de bouwwereld. Het onderzoek zal duidelijkheid scheppen over aluminium en aluminium interessanter maken voor de bouw:

- De brandweerstand van aluminium constructies in kaart brengen en verbeteren,
- Zorgen dat aluminium ook gebruikt kan worden voor structurele draagelementen in constructies,
- Aluminium een groter toepassingsgebied geven in de bouwwereld,
- Richtlijnen opstellen voor de brandweerstand van aluminium constructies.

2 Literatuurstudie

2.1 Het materiaal aluminium

Aluminium “Al” met atoomnummer 13 is een metaal van de hoofdgroep metalen [8]. De naam is afkomstig van het Latijnse alumen wat aluin betekent, de verzamelnaam voor chemische verbindingen met dubbelzouten van sulfaten.

Aluminium werd al in de oudheid gebruikt, het werd voor het eerst ontdekt in 1807 door Humphry Davy, een Britse scheikundige. In 1825 kwam de eerste onzuivere vorm van aluminium uit aluminiumchloride en kaliumamalgaam [8]. Het werd voor het eerst ontgonnen in 1854 en pas als commercieel product geproduceerd en verkocht als kostbaar metaal in 1886. Deze grootschalige ontginning was mogelijk dankzij het Hall-Heroult-proces [9]. Dit is een elektrolyseproces, Hierbij wordt door een elektrische stroom een chemische reactie opgewekt die samengestelde stoffen ontleedt tot enkelvoudige stoffen en/of andere samengestelde stoffen. De eerste bekende toepassing in een gebouw gaat terug tot 1898, wanneer de koepel van de San Gioacchino's-kerk in Rome bekleed werd met een aluminium beplating [10]. In België is het Atomium eveneens bekleed met aluminium. Meer dan 45 jaar vervulde het zijn functie als buitenschil in een “tijdelijk” Expo '58-ontwerp, met een niet voor buitentoepassing geschikte oppervlaktebehandeling en zonder enig onderhoud stond dit monument aan de ring rond Brussel tot het vervangen werd bij de volledige renovatie van het gebouw [10].

2.2 Brandwetgeving volgens Eurocode regels

Alle informatie waarnaar wordt verwezen in dit hoofdstuk komt uit de Eurocode 1 [4] tenzij anders vermeld. In Eurocode 1 – belasting op constructies – Deel 1-2: Algemene belasting – Belasting bij brand, staat vermeld welke richtlijnen er zijn bepaald voor de berekening van constructies onderhevig aan brand. Om deze teksten correct te interpreteren moeten er enkele termen en symbolen verduidelijkt worden, deze zijn vermeld onder het hoofdstuk “Lijst van afkortingen en symbolen”.

2.2.1 Procedure voor constructief ontwerp

Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand concludeert dat er een specifieke procedure is om de brandweerstand van constructies te bepalen. Deze procedure wordt onder dit hoofdstuk verduidelijkt.

Het berekenen van brandweerstand moet het volgende omvatten:

- Keuze van de ontwerpbrandscenario's van toepassing;
- Bepaling van de bijhorende ontwerpbranden;
- Berekening van de temperatuurontwikkeling binnen de constructie-elementen;
- Berekening van het mechanische gedrag van de constructie die is blootgesteld aan brand.

Hierbij moet wel rekening gehouden worden dat het mechanisch gedrag van een constructie afhankelijk is van zijn thermische belasting en het thermische effect op de materiaaleigenschappen. Eveneens van niet-rechtstreekse mechanische belastingen en van het directe gevolg van de mechanische belasting. Belastingen op constructies die het gevolg zijn van een brand worden aanschouwd als buitengewone belastingen.

2.2.1.1 Ontwerpbrandscenario

Om buitengewone ontwerpsituaties te kunnen beschrijven moeten de ontwerpbrandscenario's die van toepassing zijn, en de daarbij horende ontwerpbranden, van tevoren zijn bepaald op basis van een beoordeling van de brandrisico's. Indien een constructie een bijzonder risico heeft op het ontstaan van een brand door andere buitengewone belastingen, hoort men hier rekening mee te houden bij het bepalen van het totale veiligheidsconcept. Het gedrag van de constructie in de tijd en belastingen voorafgaand aan de buitengewone situatie hoeft men niet te beschouwen bij deze berekening. Behalve bij constructies met een verhoogd risico door buitengewone belastingen, dan moet hier uiteraard wel rekening mee gehouden worden.

2.2.1.2 Ontwerpbrand

Bij ieder ontwerpbrandscenario behoort een ontwerpbrand in een brandcompartiment te zijn bepaald volgens de methode van de "thermische belastingen voor thermische berekeningen". De ontwerpbrand behoort in een brandcompartiment aanwezig te zijn tijdens de test, tenzij anders aangegeven in het ontwerpbrandscenario. Voor constructies waarvoor de regering strikte eisen stelt voor de veiligheid, mag men veronderstellen dat de ontwerpbrand representatief is naar de standaardbrand.

2.2.1.3 Thermische berekening

Bij de thermische berekening van een element is het belangrijk om de locatie van de ontwerpbrand te bepalen. Zo moet men ook rekening houden bij het bepalen van elementen die zich buiten een gebouw begeven, hoe deze in contact kunnen komen met brand via openingen in daken en gevels. Eveneens moeten bijvoorbeeld muren van brandcompartimenten langs beide zijden beoordeeld en gecontroleerd worden. Om deze berekeningen correct uit te voeren dienen er enkele procedures gevolgd te worden.

- Bij een nominale temperatuur-tijd-kromme is de thermische berekening van de constructie-elementen uitgevoerd voor een voorgeschreven tijdsduur, zonder afkoelingsfase;
- Bij een brandmodel is de thermische berekening van de constructie-elementen uitgevoerd voor de volledige duur van de brand, met inbegrip van de afkoelingsfasen.

2.2.1.4 Mechanische berekening

Een belangrijke bemerking is dat voor het berekenen van de mechanische weerstand van de constructie en de thermische berekening dezelfde tijdsduur moet worden gehanteerd.

Brandwerendheid behoort in de tijd te zijn getoetst:

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

Op sterkte:

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

Op temperatuur:

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

Waarin:

- $t_{fi,d}$ = de rekenwaarde van de brandwerendheid
 $t_{fi,requ}$ = vereiste tijdsduur van de brand

$R_{fi,d,t}$	= de rekenwaarde van de weerstand van het element bij brand op tijdstip t
$E_{fi,d,t}$	= rekenwaarde van het belastingseffect bij de brand op tijdstip t
θ_d	= de rekenwaarde van de materiaalsoorttemperatuur
$\theta_{cr,d}$	= de rekenwaarde van de kinetische materiaalsoorttemperatuur

2.2.2 Thermische belasting voor de thermische berekening

De thermische belasting wordt uitgedrukt als de nettowarmtestroomdichtheid h_{net} in W/m^2 op het oppervlakte element. Deze nettowarmtestroomdichtheid behoort te zijn bepaald als functie van de warmteoverdracht door convectie en straling.

Convectie is warmtestroom overdracht door contact tussen een stromend medium (lucht, water, ...) en een wand. Deze waarden kan men bepalen met de Wet van Newton [11].

$$Q = \alpha_c * \Delta T * A$$

Waarin:

Q	= Warmtetransport in Watt (W)
ΔT	= Temperatuurverschil in Kelvin (K)
α_c	= warmteoverdrachtcoëfficiënt, deze is afhankelijk van het materiaaltype. W/m^2K
A	= oppervlak in m^2

Er zijn twee soorten convectie. Gedwongen convectie waar de stroming van een medium wordt veroorzaakt door een pomp of ventilator. Daarnaast ook vrije convectie waarbij de stroming ontstaat door een verandering van dichtheid van het medium [11].

Straling, ofwel warmtestraling, is het transport van energie door lucht en andere gassen in de vorm van elektromagnetische trillingen [12]. Elk materiaal geeft warmtestraling af, de mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de temperatuur van het oppervlak en de materiaaleigenschappen [12]. De hoeveelheid warmte die een bepaald oppervlak uitstraalt kan worden berekend met de wet van Stefan-Boltzmann [12].

$$Qa = \varepsilon_m * 56,7 * 10^{-9} * T^4 \quad (\varepsilon_m * \sigma * T^4 = \varepsilon_m * Qz)$$

Waarin:

Qa	= de warmtestroomdichtheid van de afgegeven straling (W/m^2)
ε_m	= de emissie coëfficiënt van het materiaaloppervlak
T	= de absolute temperatuur in Kelvin (K)
σ	= Stralingsconstante of Boltzmann-constante (W/m^2K^4)
Qz	= warmtestraling van het "zwarte lichaam"

Om h_{net} te bepalen op een oppervlak dat is blootgesteld aan brand moet de nettowarmtestroom door convectie bij brand opgeteld worden met de nettowarmtestroom door straling bij brand:

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,s}$$

Waarin:

$h_{net,c}$	= nettowarmtestroom door convectie
$h_{net,s}$	= nettowarmtestroom door straling

De nettowarmtestroomdichtheid in W/m^2 door convectie bij brand dient te zijn bepaald volgens:

$$h_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m)$$

Waarin:

α_c	= warmteoverdrachtcoëfficiënt voor convectie in W/m^2K
θ_g	= gastemperatuur bij een element blootgesteld aan brand in $^{\circ}C$
θ_m	= de oppervlaktetemperatuur van het element in $^{\circ}C$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie α_c is afhankelijk van de nominale temperatuur-tijdscurven, zie 1.2.2.1 nominale temperatuur-tijdscurven.

Op de niet-blootgestelde zijde van scheidende elementen behoort de nettowarmtestroomdichtheid h_{net} te zijn bepaald volgens de formule van $h_{net,c}$ waarbij $\alpha_c = 4W/m^2K$. Indien is vastgesteld dat deze het effect van warmteoverdracht door straling omvat, dient men $\alpha_c = 9 W/m^2K$ aan te houden.

De nettowarmtestroomdichtheid in W/m^2 door straling per oppervlakte-eenheid dient bepaald te zijn volgens:

$$h_{net,s} = \phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma_s * [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

Waarin:

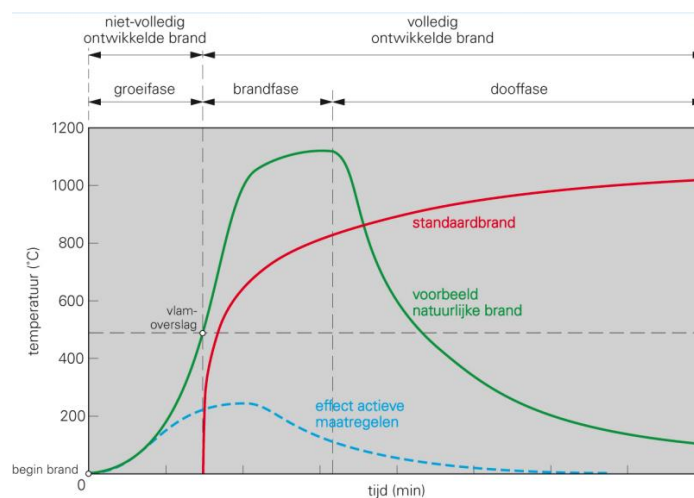
- ϕ = de zichtfactor
- ε_m = de emissiefactor van het oppervlak van het element
- ε_f = de emissiefactor van de brand
- σ_s = stralingsconstante van Stephan Boltzmann ($=5,67*10^{-8} W/m^2K^4$)
- θ_r = de effectieve stralingstemperatuur van de omgeving van de brand
- θ_m = de oppervlaktetemperatuur van het element in °C

Tenzij anders gegeven in de materiaal gebonden bijlagen voor ontwerp bij brand van EN 1992 tot en met EN 1996 en EN 1999, mag $\varepsilon_m = 0,8$. De emissiefactor van brand wordt gelijkgesteld aan $\varepsilon_f = 1$ eveneens mag de zichtfactor $\phi = 1$ genomen worden. De zichtfactor is de waarde die bepaald hoeveel uitgezonden straling er wordt opgenomen op een ontvangend oppervlak. Een lagere waarde mag worden genomen voor de berekening van plaats- en schaduw effecten. Voor een meer specifieke berekening van de zichtfactor wordt er verwezen naar bijlage G van de NBN EN 1991-1-2:2002.

Voor elementen die volledig zijn omgeven door brand mag de stralingstemperatuur θ_r hetzelfde worden genomen als de gastemperatuur θ_g rondom het element. Voor de gastemperatuur θ_g mogen de nominale temperatuur-tijdscurven aangehouden worden, of de natuurlijke-brandmodellen.

2.2.2.1 Nominale temperatuur-tijdscurven

Om het gedrag van een brand te beschrijven worden er temperatuur-tijdscurven opgesteld. Deze curven beschrijven het verloop van verschillende branden (figuur 2). De standaard brand is het brandverloop zoals omschreven in de Eurocode. Uiteraard zal een natuurlijke brand anders verlopen. Eveneens is het brandverloop bij actieve maatregelen zichtbaar. Dit verduidelijkt waarom dat zowel actieve als passieve maatregelen belangrijk zijn bij de bestrijding van brand.



Figuur 2 Standaardbrand versus natuurlijke brand [13]

De standaardbrandkromme is gedefinieerd als:

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

Waarin:

θ_g = de gastemperatuur in het brandcompartiment in °C

t = de tijd in minuten

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie $\alpha_c = 25 W/m^2K$

De kromme voor externe brand (buitenbrand-figuur 3) is gedefinieerd als:

$$\theta_g = 660 * (1 - 0.687 * e^{-0.32*t} - 0.313 * e^{-3.8*t}) + 20$$

Waarin:

θ_g = de gastemperatuur in het brandcompartiment in °C

t = de tijd in minuten

De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie $\alpha_c = 50 W/m^2K$

De koolwaterstofkromme is gedefinieerd als:

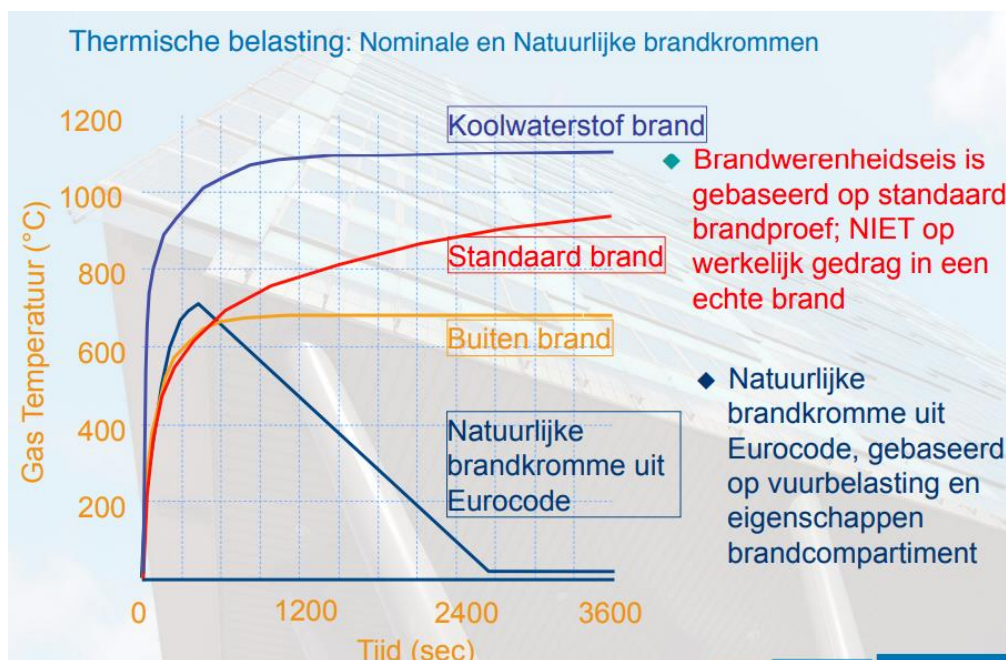
$$\theta_g = 1080 * (1 - 0.325 * e^{-0.167*t} - 0.675 * e^{-2.5*t}) + 20$$

Waarin:

θ_g = de gastemperatuur in het brandcompartiment in °C

t = de tijd in minuten

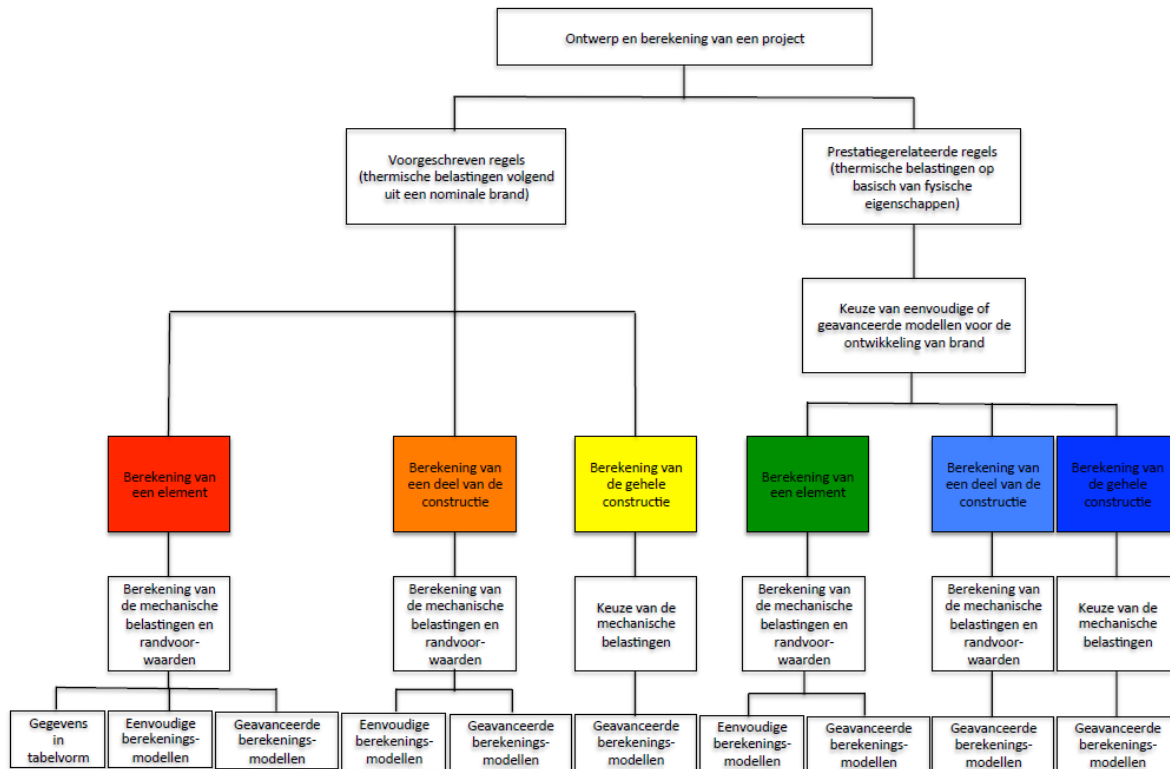
De warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie $\alpha_c = 50 W/m^2K$



Figuur 3 Brandkrommen [13]

2.2.3 Natuurlijke-brandmodellen

De aard van de berekening die nodig is wordt bepaald in de grafiek getoond in figuur 4.



Figuur 4 Stappenplan geavanceerde berekeningsmodellen of vereenvoudigde berekeningsmodellen [13]

2.2.3.1 Vereenvoudigde brandmodellen

Vereenvoudigde brandmodellen zijn gebaseerd op specifieke fysische parameters met een beperkt toepassingsgebied, meer informatie hierover is opgenomen in bijlage E van de NBN EN 1991-1-2:2002. Hier wordt bepaald hoe de rekenwaarde van de vuurbelasting $q_{f,d}$ kan bepaald worden.

Bij compartimentsbranden wordt uitgegaan van een gelijkmatige temperatuurverdeling als functie van de tijd. Bij lokale branden wordt uitgegaan van een niet-gelijkmatige temperatuurverdeling in functie van de tijd. Bij het toepassen van de vereenvoudigde brandmodellen behoort de warmteoverdrachtcoëfficiënt voor convectie als $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ genomen te worden.

Bij compartimentsbranden moeten worden de gastemperaturen bepaald op fysische parameters met ten minste de vuurbelasting en de ventilatie mee te verwerken. Voor de berekening van de gastemperatuur bij inwendige elementen in brandcompartimenten is bijlage A van de NBN EN 1991-1-2:2002 van toepassing. Voor uitwendige elementen behoort de warmtestroomdichtheid door straling te zijn bepaald als de som van de overdracht vanuit het brandcompartiment en de overdracht van de vlammen die uit de openingen in de gevel of in het dak naar buiten slaan. Voor de berekening van de opwarming van deze elementen die worden blootgesteld aan brand door openingen in de gevel en het dak is bijlage B van de NBN EN 1991-1-2:2002 van toepassing.

Wanneer bij een lokale brand de kans op vlamoverslag klein is, moeten de thermische belastingen van een lokale brand in rekening gebracht worden. Deze methode is terug te vinden in bijlage C van de NBN EN 1991-1-2:2002.

2.2.3.2 Geavanceerde brandmodellen

De geavanceerde brandmodellen houden rekening met:

- De eigenschappen van gas;
- Massa-overdracht;
- Energie-overdracht.

De berekening van de brandvermogensdichtheid Q en de rekenwaarde van de vuurbelasting $q_{f,d}$ worden verder uitgelegd in bijlage E van de NBN EN 1991-1-2:2002.

Een van volgende modellen behoort te zijn toegepast:

- Eenzone modellen, die een gelijkmatige, tijdsafhankelijke temperatuurverdeling in het compartiment veronderstellen;
- Tweezone modellen, die van een bovenlaag met een tijdsafhankelijke dikte en een tijdsafhankelijke gelijkmatige temperatuurverdeling en een onderlaag met een tijdsafhankelijke, gelijkmatige en lagere temperatuur veronderstellen;
- Numerieke stromingsmodellen voor de bepaling van de temperatuurontwikkeling in het compartiment, in functie van de tijd en de plaats in het compartiment.

Voor de berekening hiervan zie bijlage D van de NBN EN 1991-1-2:2002. De warmteoverdrachtcoëfficiënt voor convectie behoort $\alpha_c = 35 W/m^2 K$ te zijn, tenzij anders vermeld. Om de temperatuurverdeling langsheen een element bij een lokale brand nauwkeuriger te bepalen, mogen de resultaten van het tweezone model gecombineerd worden met de resultaten van het model voor een lokale brand.

2.2.4 Mechanische belasting voor de constructieve berekening

Opgelegde en verhinderde uitzettingen en vervormingen ten gevolge van temperatuursveranderingen ontstaan door brand leiden tot belastingseffecten zoals krachten en momenten die dienen berekend te worden, uitgezonderd voor volgende gevallen:

- Vooraf bepaald kan worden dat deze een verwaarloosbaar of gunstig effect hebben,
- Hier al rekening mee is gehouden in de ontwerpfase door specifieke opleggingen en randvoorwaarden en/of impliciet beschouwd door conservatieve brandveiligheidseisen.

Bij de bepaling van de niet-rechtstreekse belastingen moet men volgende aspecten in rekening brengen:

- Eventuele verhindering van de thermische uitzetting door bijvoorbeeld kolommen in hoogbouwconstructies met stijve wanden;
- Ongelijkmatige thermische uitzettingen in onbepaalde statische elementen zoals doorgaande vloerplaten;
- Temperatuurverschillen binnen een dwarsdoorsneden die kunnen zorgen voor spanningen;
- Thermische uitzetting die zorgt voor verplaatsingen van aangrenzende elementen, zoals bijvoorbeeld een kolomkop die verplaatst door uitzetting van een vloerplaat;
- Thermische uitzetting van elementen die invloed hebben op andere elementen buiten het brandcompartiment.

Rekenwaarden van niet-rechtstreekse belastingen door brand $A_{ind,d}$ moeten worden bepaald op basis van rekenwaarden van thermische en mechanische materiaaleigenschappen gegeven in de delen voor ontwerp (en berekening) bij brand van EN 1992 tot en met EN 1996 en EN 1999, eveneens de van toepassing zijnde blootstelling aan de brand.

Men hoeft geen rekening te houden met niet-rechtstreekse belastingen veroorzaakt door aangrenzende elementen wanneer men spreekt over een standaardbrand.

2.2.4.1 *Gelijktijdigheid van belastingen, algemene regel en de vereenvoudigde regel*

De belastingen die hoogstwaarschijnlijk plaatsvinden bij brand moeten mee in rekening worden gebracht zoals bij ontwerp en berekening bij normale temperatuur. Eventuele waarden van veranderlijke belastingen van toepassing in de buitengewone ontwerpsituatie bij brand behoren te zijn bepaald volgens EN 1990. De vermindering van opgelegde belastingen door verbranding behoort niet in rekening gebracht te worden. Situaties waarbij sneeuwbelasting niet hoeft te zijn beschouwd vanwege het wegsmelten van de sneeuw moeten apart worden bepaald. Belastingen door bedrijfsprocessen moet men niet in rekening brengen.

Het gelijktijdig voorkomen van meerdere onafhankelijke buitengewone belastingen hoeft niet in rekening gebracht te worden. Afhankelijk van de buitengewone ontwerpsituatie kan het nodig zijn bijkomende belastingen door brand in rekening te brengen gedurende de blootstelling aan brand, bijvoorbeeld stootbelasting door het bezwijken van een constructie-element of zware machines. Deze kunnen in de nationale bijlage "bijkomende belastingen" zijn voorgeschreven. Eveneens kan er bepaald worden dat de brandmuren een horizontale stootbelasting moeten aan kunnen volgens EN 1363-2.

Voor het berekenen van belastingen zijn er verschillende combinatieregels opgesteld, de Algemene Regel geeft volgende methode:

Om de belastingeffecten van toepassing bij brand $E_{fi,d,t}$ te bepalen, moeten de mechanische belastingen voor buitengewone ontwerpsituaties zijn gecombineerd volgens EN 1990 grondslagen voor constructief ontwerp.

De representatieve waarde van de veranderlijke belasting Q_1 , mag zijn beschouwd als de quasi-blijvende waarde $\psi_{2,1} Q_1$ of anders als de frequente waarde $\psi_{1,1} Q_1$. Dit kan zijn voorgeschreven in de nationale bijlage, dus de toepassing van de quasi-blijvende waarde $\psi_{2,1} Q_1$ wordt aanbevolen.

De vereenvoudigde regel verduidelijkt wanneer niet-rechtstreekse belastingen door de brand niet expliciet hoeven te zijn meegerekend. De belastingeffecten worden bepaald door de constructie uitsluitend te berekenen met belastingscombinaties volgens de algemene regel op tijdstip $t=0$. Deze belastingeffecten $E_{fi,d}$ mogen als een constante in rekening worden gebracht gedurende de gehele brand. Dit geldt bijvoorbeeld voor belastingeffecten op begrenzingen en opleggingen als deze zijn berekend volgens de delen voor ontwerp bij brand EN 1992 tot en met EN 1996 en EN 1999.

Ter verdere vereenvoudiging, mogen belastingeffecten worden ontleend aan degene welke zijn bepaald bij ontwerp en berekening bij normale temperatuur.

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} * E_d$$

Waarin:

$E_{fi,d}$ = de overeenkomstige constante rekenwaarde in de brandsituatie

E_d = de rekenwaarde van de belastingeffecten van toepassing van de fundamentele belastingscombinaties volgens EN1990

η_{fi} = de reductiefactor vastgesteld volgens bijlagen voor ontwerp bij brand van EN 1992 tot en met EN 1996 en EN1999

Als getabelleerde gegevens voor een referentie-belastingsniveau zijn voorgeschreven, komt dit belastingsniveau overeen met:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} * R_d$$

Waarin:

$\eta_{fi,t}$ = het belastingsniveau voor ontwerp en berekening bij brand

R_d = de rekenwaarde van de weerstand van het element bij normale temperatuur.

2.3 Ontwerp en berekening van aluminiumconstructies bij brand volgens EN1999-1-2

De Europese voorschriften over de brandveiligheid van aluminium zijn terug te vinden in de Eurocode onder "Eurocode 9: ontwerp en berekening van aluminiumconstructies – deel 1-2: ontwerp en berekening van constructies bij brand". Alles onder dit hoofdstuk komt uit de Eurocode 9, EN 1999-1-2 [1] tenzij anders vermeld.

Bescherming tegen brand is in het algemeen bedoeld om in geval van brand de risico's te beperken voor individu en maatschappij net zoals aangrenzend eigendom en waar vereist milieu of de directe blootgestelde eigendommen. Een bouwwerk moet dus zodanig zijn ontworpen dat bij het uitbreken van brand:

- Het draagvermogen van de constructie verzekerd is;
- Het ontstaan en de uitbreiding van brand en rook binnen het bouwwerk beperkt is;
- De uitbreiding van brand aan aanliggende gebouwen beperkt is;
- De aanwezigen op een veilige manier het bouwwerk kunnen verlaten of op andere manieren gered kunnen worden;
- Er rekening is gehouden met de veiligheid van reddingswerkers.

2.3.1 Algemeen

EN 1999 is van toepassing op het ontwerp en de berekening van gebouwen en civieltechnische werken in aluminium. De norm voldoet aan de beginselen en eisen ten aanzien van de veiligheid en bruikbaarheid van constructies, waarvan de grondslagen van het ontwerp en de berekening zijn gegeven in EN 1990 – Grondslagen van het constructief ontwerp.

EN 1999 heeft uitsluitend betrekking op eisen ten aanzien van de weerstand, bruikbaarheid, duurzaamheid en brandwerendheid van aluminiumconstructies. Overige eisen, bijvoorbeeld betreffende warmte- of geluidsisolatie, zijn niet behandeld.

EN 1999 is bedoeld om te gebruiken samen met:

- EN 1990 grondslagen van het constructief ontwerp;
- EN 1991 belastingen op constructies;
- Europese normen voor bouwproducten die relevant zijn voor aluminium.

EN 1999-1-2 behandelt het ontwerp en de berekening van aluminiumconstructies voor de buitengewone situatie van blootstelling aan brand en is bedoeld om te worden gebruikt in combinatie met EN 1999-1-1 en EN 1991-1-2.

EN1999-1-2 geeft uitsluitend verschillen met of aanvullingen op het ontwerp en de berekening onder normale temperatuur.

EN 1999-1-2 behandelt uitsluitend passieve methode voor brandbescherming en behandelt geen actieve methode.

Actieve brandbescherming wil zeggen dat deze geactiveerd moeten worden, zoals bijvoorbeeld een sprinklerinstallatie. Terwijl de passieve methode de weerstand tegen brand van de constructie zelf representeert. Deze werken dus zonder menselijke tussenkomst [14].

EN 1999-1-2 is van toepassing op aluminiumconstructies waarvan geëist is dat ze hun dragende functie vervullen wanneer ze blootgesteld worden aan brand, wat betreft het voorkomen van voortijdig bezwijken van de constructie.

EN 1999-1-2 geeft beginselen en toepassingsregels voor het ontwerpen en berekenen van constructies voor gespecificeerde eisen met betrekking tot de dragende functie en de prestatieniveaus [1], alsook van toepassing op constructies, of delen van constructies, die binnen het onderwerp en toepassingsgebied van EN 1999-1-1 vallen en die zijn ontworpen en berekend volgens EN 1999-1-1.

De aluminiumlegeringseigenschappen gegeven in deel 1-2 van EN 1999 zijn van toepassing op de volgende aluminiumlegeringen:

- EN AW-3004-H34,
- EN AW-5005-O en H34,
- EN AW-5052-H34,
- EN-AW-5083-O en H12,
- EN AW-5454-O en H34,
- EN AW-6061-T6,
- EN AW-6063-T5 en T6,
- EN AW-6082-T4 en T6,

Volgend samenvattend overzicht van Europese normen, belangrijk bij de bepaling van de brandveiligheid van aluminium constructies :

- EN 485-2: Aluminium and aluminium alloys. Sheet, strip and plate. Part 2: mechanical properties,
- EN 755-2: Aluminium and aluminium alloys. Extruded rod/bar, tube and profiles. Part2: Mechanical properties,
- EN 1990: Basis of structural design,
- EN 1991-1-2: Basis of design and actions on structures part 1-2: actions on structures exposed to fire,
- EN 1999-1-1: Design of aluminium structures: part 1-1: general structural rules,
- EN 1090-3: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 3: Technical requirements for aluminium structures,
- EN 13501-2: Fire classification of construction products and building elements. Part 2 Classification using data from fire resistance tests,
- EN 13381-1: Fire tests on elements of building construction: Part 1: Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members: By horizontal protective membranes,
- EN 13381-2: Fire tests on elements of building construction. Part 2: Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members: By vertical protective membranes,
- EN 13381-4: Fire tests on elements of building construction. Part 4: Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members: By applied protection to steel structural elements.

2.3.2 Grondslagen van het ontwerp

2.3.2.1 Fundamentele Eisen

Wanneer mechanische weerstand vereist is in geval van brand moeten aluminiumconstructies zodanig zijn ontworpen, berekend en uitgevoerd dat ze hun dragende functie behouden gedurende de blootstelling aan het van toepassing zijnde brandcriterium R.

Elementen moeten als volgt aan de criteria R,E,I voldoen:

- Scheidende functie: E en I,
- Dragende functie: R.

Wanneer compartimentering vereist is, moeten de scheidende elementen zodanig zijn ontworpen, berekend en uitgevoerd dat ze hun scheidende functie behouden gedurende de van toepassing zijnde blootstelling aan brand, dit wil zeggen:

- Geen volledige bezwijking als gevolg van scheuren, gaten of andere openingen die groot genoeg zijn om brand te veroorzaken door hete gassen of vlammen – criterium E;
- Geen bezwijken van de isolatie als gevolg van temperaturen van blootgestelde oppervlakken groter dan de ontstekings temperatuur – criterium I.

Er mag zijn aangenomen dat aan criterium I is voldaan wanneer de gemiddelde temperatuurstijging gedurende de blootstelling aan de standaardbrand op het niet aan de brand blootgestelde oppervlak de 140 °C niet overschrijdt en de maximale temperatuurstijging op elk willekeurig punt van het niet blootgestelde oppervlak de 180 °C niet overschrijdt.

EN 1999-2-1 heeft alleen betrekking op het R-criterium. De materiaaleigenschappen die in deze norm zijn gegeven, worden gebruikt voor het berekenen van temperaturen voor het I-criterium.

Vervormingseisen behoren te zijn toegepast wanneer de bekleding dat vereist of wanneer de ontwerpseisen voor scheidende elementen vereisen dat vervormingen van de draagconstructie in aanmerking zijn genomen. Men hoeft hier in volgende gevallen geen rekening mee te houden:

- Wanneer is nagegaan dat de eigenschappen en de prestatie van brandwerend bekledingsmateriaal toegepast in het ontwerp niet afzakken tijdens de relevante blootstelling aan brand;
- De scheidende elementen moeten voldoen aan eisen die horen bij blootstelling aan een nominale brand.

2.3.2.2 Blootstelling aan nominale brand

Voor de blootstelling aan een standaardbrand behoren de elementen met uitsluitend een dragende functie een voldoende mechanische weerstand te beschikken (criterium R).

Aangenomen is dat aan het criterium R is voldaan wanneer de dragende functie behouden blijft gedurende de vereiste duur van blootstelling aan brand.

Voor de curve voor blootstelling aan een koolwaterstofbrand horen dezelfde criteria te zijn toegepast, waarbij echter wel naar de specifieke curve moet worden verwezen met aanduiding HC (Hydro Carbon).

2.3.2.3 Blootstelling aan een parametrische brand

De dragende functie is gegarandeerd indien instorting is voorkomen gedurende de volledige duur van de brand, inclusief de uitdovingsfase, of gedurende een vereiste tijdsperiode.

2.3.2.4 Belastingen

De thermische en mechanische belastingen behoren te zijn ontleed aan EN 1991-1-2. De waarde van $h_{met,d}$ behoren te zijn verkregen uit 1991-1-2, gebruik makend van:

- $\varepsilon_m = 0,3$ voor schone, niet bedekte aluminium oppervlakken
- $\varepsilon_m = 0.7$ voor geverfde en (bijvoorbeeld door roet) bedekte oppervlakken

2.3.2.5 Rekenwaarden van de materiaaleigenschappen

De rekenwaarde van de mechanische materiaaleigenschappen $X_{fi,d}$ zijn als volgt gedefinieerd:

$$X_{fi,d} = \frac{k_{\theta} X_k}{\gamma_{M,fi}}$$

Waarin:

- X_k = de karakteristieke waarde van een sterkte- of vervormingseigenschap voor een ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1.
- $X_{k,\theta}$ = de waarde van een materiaaleigenschap in ontwerp en berekening bij brand, in het algemeen afhankelijk van de temperatuur van het materiaal.
- k_{θ} = de reductiefactor voor een sterkte- of vervormingseigenschap ($X_{k,\theta}/X_k$) afhankelijk van de temperatuur en het materiaal.

De partiele factor voor de mechanische eigenschappen van aluminium in de brandsituatie s gegeven in de nationale bijlage. De waarde $\gamma_{M,fi} = 1$ is aanbevolen.

- Indien de toename van de eigenschap gunstig is voor de veiligheid:

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi}$$

- Indien een toename van de eigenschap ongunstig is voor de veiligheid:

$$X_{fi,d} = \gamma_{M,fi} * X_{k,\theta}$$

De partiele factor voor de thermische eigenschappen van aluminium in de brandsituatie s gegeven in de nationale bijlage. De waarde $\gamma_{M,fi} = 1$ is aanbevolen.

2.3.2.6 Toetsingsmethoden

Het constructieve model dat is gebruikt voor het ontwerp en de berekening volgens EN1999-1-2 moet het verwachte gedrag bij brand weergeven. Er moet zijn getoetst dat gedurende de van toepassing zijnde duur van de blootstelling aan de brand t:

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

Waarin:

- $E_{fi,d}$ = de rekenwaarde van het belastingeffect in de brandsituatie, bepaald volgens EN 1991-1-2, inclusief de effecten van thermische uitzetting en vermogen.
- $R_{fi,d,t}$ = de corresponderende weerstand in de brandsituatie

De constructieve berekening in de brandsituatie behoort te zijn uitgevoerd volgens EN 1990. Als alternatief voor een berekening mag het ontwerp in de brandsituatie zijn gebaseerd op de resultaten van brandproeven of op brandproeven in combinatie met berekeningen.

2.3.2.7 Berekening van elementen

Het belastingeffect behoort te zijn bepaald op tijdstip t=0, gebruikmakend van de combinatiefactoren $\psi_{1,1}$ of $\psi_{2,1}$ volgens 4.3.1 van EN 1991-1-2 (figuur 5). Als vereenvoudiging hierop mag het effect van de belastingen $E_{fi,d}$ zijn verkegen uitgaande van een constructieve berekening voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d$$

Waarin:

- E_d = de rekenwaarde van de overeenkomstige kracht of moment voor ontwerp en berekening

bij kamertemperatuur voor een fundamentele belastingscombinatie.

De reductiefactor η_{fi} voor belastingscombinatie (6.10) in EN 1990 behoort als volgt te zijn bepaald:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

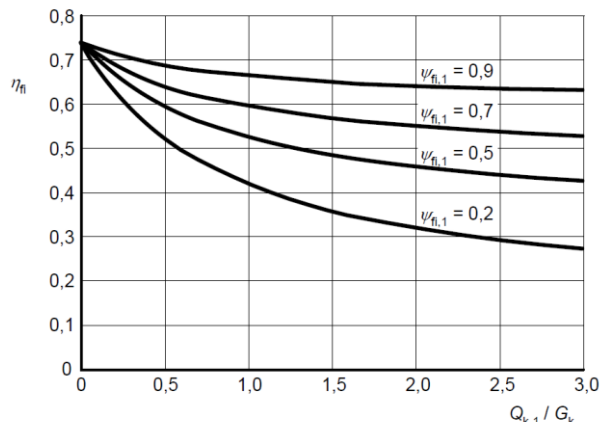
Of voor belastingscombinaties (6.10a) en (6.10b) in EN 1990 als de kleinste waarde van de volgende twee uitdrukkingen:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

Waarin:

- $Q_{k,1}$ = de karakteristieke waarde van de belangrijkste veranderlijke belasting
- G_k = de karakteristieke waarde van een blijvende belasting
- γ_G = de partiele factor voor blijvende belastingen
- $\gamma_{Q,1}$ = de partiele factor voor de veranderlijke belasting 1
- ψ_{fi} = de combinatiefactor voor veel voorkomende, gegeven hetzij door $\psi_{1,1}$ of $\psi_{2,1}$
- ξ = de reductiefactor voor ongunstig werkende blijvende belastingen, volgens de Nationale Bijlage $\xi = 1,2/1,35 = 0,89$



Figuur 5 Verloop van de reductiefactor in functie van de belastingsverhouding [1]

Alleen de effecten van thermische vervormingen, veroorzaakt door een thermische gradiënt over de doorsnede, hoeven te zijn beschouwd. De effecten van axiale of in het vlak optredende thermische uitzettingen mogen zijn verwaarloosd. Er mag zijn aangenomen dat de randvoorwaarden ter plaatse van de steunpunten en de uiteinden van de elementen niet veranderen tijdens de blootstelling aan brand. De eenvoudige en geavanceerde berekeningsmethoden zijn bruikbaar voor het toetsen van elementen onder brandomstandigheden.

2.3.2.8 Berekening van een deel van de constructie

Als alternatief voor het uitvoeren van een constructieve berekening in de brandsituatie op het tijdstip $t = 0$, mogen de steunpuntsreacties en de interne krachten en momenten ter plaatse van de randen van een constructiedeel zijn verkregen uit een berekening bij normale temperatuur.

Het te berekenen constructiedeel behoort op basis van de mogelijke thermische uitzettingen en vervormingen zodanig te zijn omschreven dat de interactie met andere delen van de constructie kan worden benaderd door tijdsafhankelijke opleg- en randvoorwaarden tijdens blootstelling aan brand.

Voor het te berekenen constructiedeel behoort rekening te zijn gehouden met de van toepassing zijnde bezwijkvormen bij de blootstelling aan brand, met de temperatuurafhankelijke

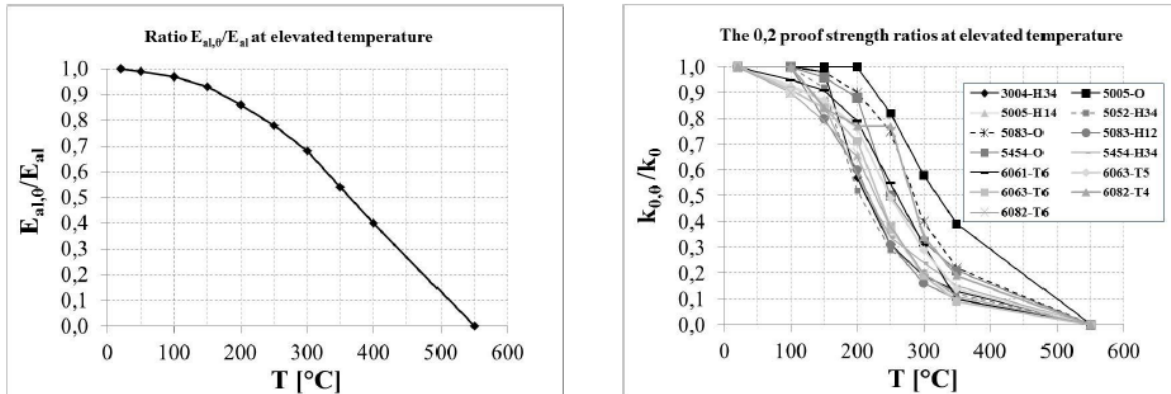
materiaaleigenschappen en stijfheden van de elementen, en met de effecten van thermische uitzettingen en vervormingen (indirecte belastingen door brand).
Er mag zijn aangenomen dat de randvoorwaarden ter plaatse van de steunpunten, de krachten en de momenten ter plaatse van de randen van een constructiedeel niet veranderen tijdens de blootstelling aan brand.

2.3.2.9 Berekening van de constructie als geheel

Wanneer een berekening van de constructie als geheel in de brandsituatie is uitgevoerd, behoort rekening te zijn gehouden met de van toepassing zijnde bezwijkvormen bij de blootstelling aan brand. Alsook met de temperatuurafhankelijke eigenschappen en stijfheden van de elementen en met de effecten van thermische vervormingen (indirecte belastingen door brand).

2.3.3 Materiaaleigenschappen aluminiumlegeringen: thermisch en mechanisch

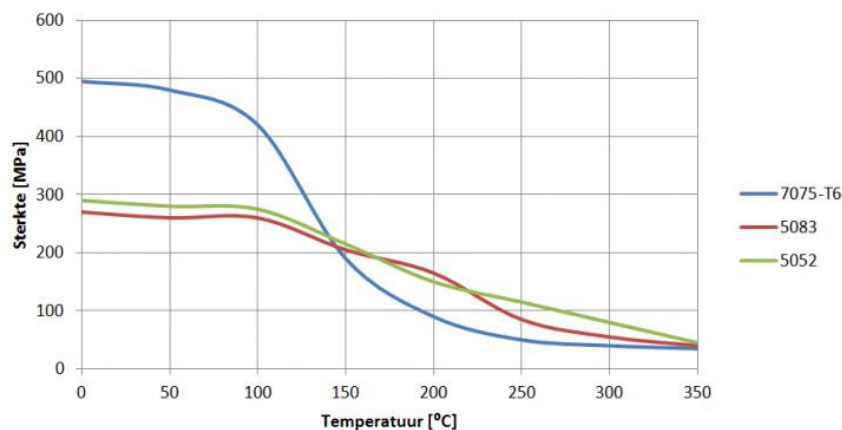
Tenzij vermeld als rekenwaarden, behoren de waarden voor materiaaleigenschappen in dit hoofdstuk te zijn beschouwd als karakteristieke waarden. De mechanische eigenschappen van aluminiumlegeringen bij 20 °C behoren te zijn aangehouden volgens EN 1999-1-1 voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur (figuur 6).



Figuur 6 Mechanische eigenschappen van aluminium bij verhoogde temperaturen volgens EN 1999-1-2 [15]

De belangrijkste waarden voor het karakteriseren van het mechanisch gedrag van aluminiumlegeringen binnen het elastische bereik zijn Young's modulus (E) en 0,2% drukvastheid ($f_{0,2}$), waarbij de laatste wordt gebruikt als elasticiteitsgrens van het materiaal [15]. Terwijl de Young's modulus praktisch onafhankelijk is van de gebruikte legering, is de 0,2% rekgrens strikt gerelateerd aan het type legering dat wordt onderzocht [15]. Figuur 6 toont de waarden voorgesteld door Eurocode 9 voor typische aluminiumlegeringen en toestanden bij verhoogde temperaturen [15]. Men kan de elasticiteitsgrens met temperatuur ($f_{0,2,T}$) voor verschillende legeringstypes en temperaturen waarnemen [15]. Bijvoorbeeld, de relatieve sterkte waarden bij 250 °C zijn 82 % voor 5005-O en 29 % voor 5052-H34 [15]. Hoewel het niet mogelijk is om een typische gemeenschappelijke trend tussen verschillende groepen legeringen te vormen, kan worden opgemerkt dat de gunstige effecten van warmtebehandeling en harding afnemen bij hoge temperaturen [15]. EN 1999-1-1 geeft geen verdere informatie over het materiaalgedrag in het plastische bereik, waardoor het onmogelijk is om rekening te houden met de vrij belangrijke bijdrage van de hardingseigenschappen van aluminiumlegeringen die beschikbaar zijn bij hoge temperaturen [15].

De kracht weerstand van aluminium daalt volgens figuur 7 drastisch rond de 100°C, terwijl dit bij staal vaak pas is bij 450°C [16]. Echter is deze daling van kracht sterk afhankelijk van het soort aluminium dat gebruikt wordt.



Figuur 7 Impact temperatuur op draagvermogen aluminium [15]

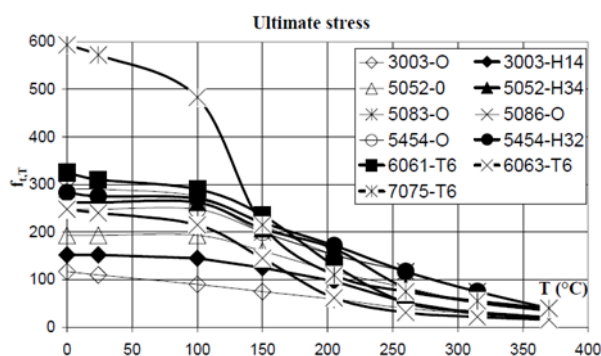
In figuur 7 worden er 3 aluminium soorten getest. Type: 7075-T6, 5083 en 5052.

Type 5052 en 5083 zijn aluminiumsoorten met als belangrijkste element magnesium [16]. Deze aluminium soort heeft een gemiddelde tot hoge sterkte [16]. Magnesium zorgt voor een extra versterking in het aluminium [16]. Deze soorten zijn goed lasbaar en hebben een hoge weerstand tegen corrosie [16]. Dit is een aluminium soort dat ook wordt toegepast in de bouw [16]. Zoals te zien in figuur 24 begint het aluminium rond de 100 °C te dalen. Bij 200°C is er vaak nog maar 50% van de originele sterkte over [16, 17].

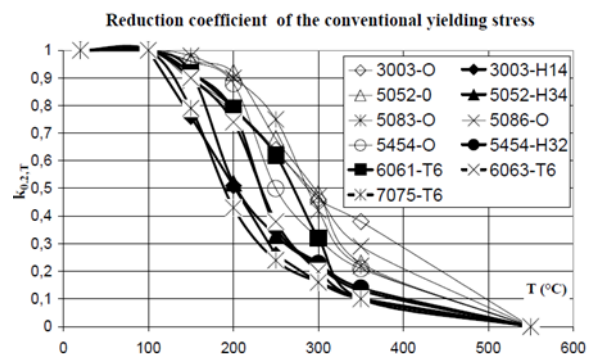
Type 7075-T6 is een aluminium soort met zink in verwerkt [16]. Deze aluminium soort heeft een hoge sterkte, maar is gevoeliger voor spanningscorrosie bij hogere temperaturen [16]. Deze soort wordt niet toegepast in de bouw en is voornamelijk te vinden in de automobielen sector en de luchtvaart.

In figuur 8 is te zien dat deze aluminium soort 7xxx een hoge sterkte kent tot de temperaturen stijgen, dan verliest deze al snel zijn draagkrachtig vermogen. Bij 100 °C begint de curve drastisch te dalen.

Wanneer er gekeken wordt naar een verzameling van aluminium legeringen valt op dat de legeringen die in normale staat vaak beter zijn van sterkte, met voornamelijk de H en T legeringen, juist kracht verliezen naarmate de temperatuur stijgt (figuur 9). De H staat voor aluminium dat wordt versterkt door koud vervorming. De T staat voor aluminium dat thermisch behandeld is met soms een supplementaire kou vervorming. Zo zien is te zien dat legeringen met een H of T aanduiding vaak al 70 – 80% sterkte verliezen bij 250 °C. Terwijl de zwakkere legeringen beter bestemd zijn tegen temperatuurstijging en vaak maar tot 30 – 50% kracht verliezen bij 250 °C.



Figuur 8 Maximale spanning aluminium legeringen



Figuur 9 Reductie coefficient vloeispanning aluminium legering

Het is belangrijk te beseffen dat het gedrag van aluminium, wanneer onderhevig aan brand, verschilt per aluminium legering. Er zijn slechts enkele zaken die bij alle soorten legeringen terug komen en dat zijn volgende eigenschappen, deze staan ook vermeld in tabel 7 [15, 17]:

- De thermische rek van aluminium bedraagt ongeveer $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- De soortelijke warmte van aluminiumlegeringen varieert van 0,9 kJ/kg°C (bij kamertemperatuur) tot 1,1 kJ/kg°C (bij 500 °C), dus ongeveer twee keer zoveel als die van staal;
- In tegenstelling tot staal neemt de warmtegeleidingscoëfficiënt van aluminium toe met de temperatuur en varieert van 140-190 W/m°C bij kamertemperatuur tot 180-220 W/m°C bij 400°C. (Meer dan driemaal hoger dan voor staal);
- De emissiviteit van aluminiumoppervlakken is afhankelijk van de afwerking van het oppervlak, waardoor het moeilijk is deze nauwkeurig te bepalen (voorgestelde waarden zijn 0,3 voor schone onbedekte oppervlakken en 0,7 voor geverfde en bedekte oppervlakken (terwijl de voorgestelde waarde voor staal 0,625 is)) [1, 15].

De sterkte daalt bij het toenemen van temperatuur, ook kan er vastgesteld worden dat de vormbaarheid en verlenging toenemen naarmate de temperatuur stijgt. Dit wordt beïnvloed door de temperatuur waaraan het aluminium wordt blootgesteld en de tijdsduur ervan [2].

2.3.3.1 Mechanische eigenschappen: sterkte- en vervormingseigenschappen

Voor thermische blootstelling tot 2 uur volgt de 0,2% rekgrens bij verhoogde temperatuur van aluminiumlegeringen genoemd in tabel 1 uit:

$$f_{0,\theta} = k_{0,\theta} * f_0$$

Waarin:

$f_{0,\theta}$ = de 0.2% rekgrens bij verhoogde temperatuur

f_0 = de 0.2% rekgrens bij kamertemperatuur volgens EN 1999-1-1

Voor tussenliggende waarden voor de aluminiumtemperatuur mag tabel 1, tabel 2, of lineaire interpolatie zijn gebruikt.

Tabel 1 Reductiefactor van de 0.2% rekgrens voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur voor een thermische blootstellingsperioden tot 2uur [1]

Legering	Harding	Aluminiumlegering temperatuur °C							
		20	100	150	200	250	300	350	550
EN AW-5052	O	1,00	1,00	0,96	0,82	0,68	0,48	0,23	0
EN AW-5052	H34	1,00	1,00	0,92	0,52	0,33	0,22	0,13	0
EN AW-5083	O	1,00	1,00	0,98	0,90	0,75	0,42	0,22	0
EN AW-5083	H113	1,00	1,00	0,89	0,78	0,63	0,47	0,29	0
EN AW-5454	O	1,00	1,00	0,96	0,88	0,50	0,32	0,21	0
EN AW-5454	H32	1,00	1,00	0,92	0,78	0,36	0,23	0,14	0
EN AW-6061	T6	1,00	1,00	0,92	0,79	0,62	0,32	0,10	0
EN AW-6063	T6	1,00	1,00	0,90	0,74	0,38	0,20	0,10	0
EN AW-6082	T6	1,00	1,00	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0

De 0,2% rekgrens van aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur die niet gegeven zijn in tabel 1, maar wel genoemd in tabel 3.2a en 3.2b van EN 1999-1-1, behoren te zijn gedocumenteerd door middel van beproeving, of de ondergrenswaarden voor de verhoudingen van de 0,2% rekgrens gegeven in tabel 2 mogen zijn gebruikt.

Tabel 2 Ondergrenzen voor de reductiefactoren van de 0,2% rekgrens $k_{0,\theta}$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur voor thermische blootstellingsperioden tot 2 uur [1]

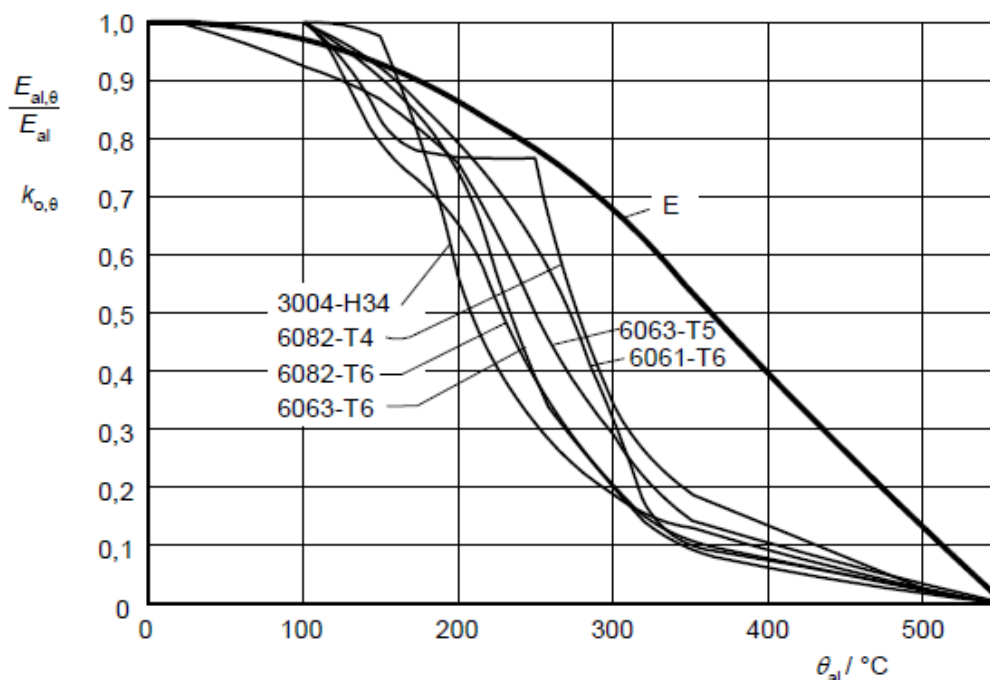
	Aluminiumlegeringstemperatuur °C							
	20	100	150	200	250	300	350	550
Ondergrenswaarden	1,00	0,90	0,75	0,50	0,23	0,11	0,06	0

Bijlage A geeft reductiefactoren voor de sterkte, $k_{0,\theta}$, voor een aantal legeringen en toestanden die niet genoemd zijn in tabellen 3.2a en 3.2b van EN 1999-1-1. De 0,2% rekgrens van het materiaal bij kamertemperatuur f_0 uit EN 485-2 of EN 755-2 mag zijn toegepast. De elasticiteitsmodulus van alle aluminiumlegeringen na twee uur thermische blootstelling aan verhoogde temperatuur $E_{al,\theta}$ behoort te zijn ontleend aan tabel 3.

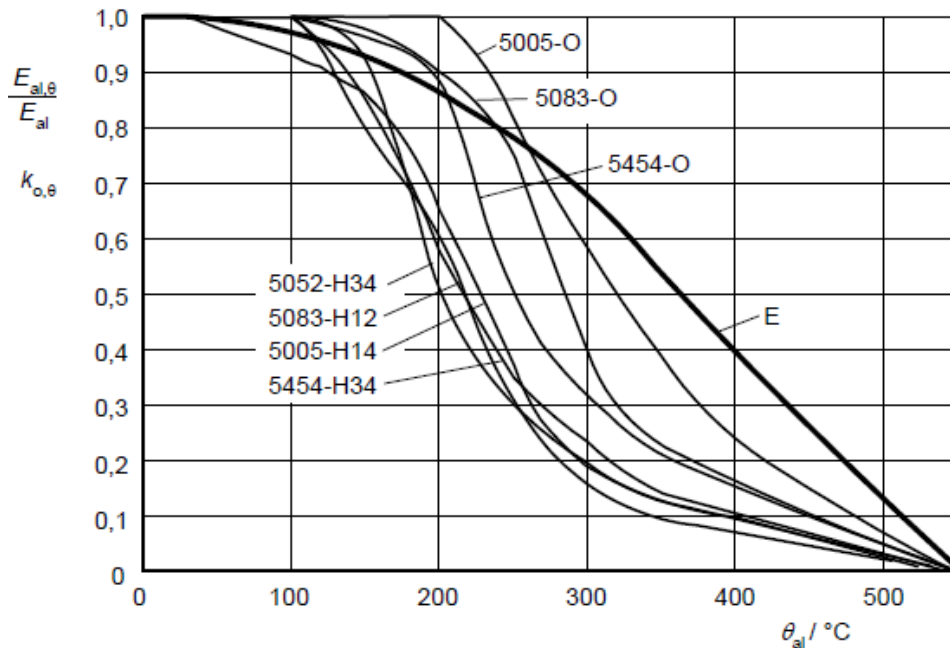
Tabel 3 Elasticiteitsmodulus van aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur voor een thermische blootstellingsperiode van twee uur, $E_{al,\vartheta}$ [1]

Aluminiumlegerings-temperatuur, ϑ (°C)	Elasticiteitsmodulus, $E_{al,\vartheta}$ (N/mm ²)
20	70 000
50	69 300
100	67 900
150	65 100
200	60 200
250	54 600
300	47 600
350	37 800
400	28 000
550	0

De verhoudingen $k_{0,\vartheta}$ voor de 0,2 % rekgrens en de verhouding $E_{al,\vartheta}/E_{al}$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur $\vartheta_{al}/^{\circ}\text{C}$ zijn gegeven in figuren 10 en 11 voor een thermische blootstellingsperiode tot 2 uur.



Figuur 10 Verhoudingen $k_{0,\vartheta}$ voor de 0,2% rekgrens en verhouding $E = E_{al,\vartheta}/E_{al}$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur $\vartheta_{al}/^{\circ}\text{C}$ voor een thermische blootstellingsperiode tot 2 uur, EN-AW 3004 en 6xxx-legeringen van tabel 1 [1]



Figuur 11 Verhoudingen $k_{o,\vartheta}$ voor de 0,2% rekgrens ϑ en verhouding $E = E_{al,\vartheta}/E_{al}$ voor aluminiumlegeringen bij verhoogde temperatuur $\vartheta_{al} / ^\circ C$ voor een thermische blootstellingsperiode tot 2 uur, 5xxx legeringen van tabel 1 [1]

Aangenomen mag worden dat de volumieke massa van aluminium onafhankelijk is van de aluminiumtemperatuur. De volgende waarde behoort te zijn toegepast.

$$\rho_{al} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

2.3.3.2 Thermische eigenschappen aluminiumlegeringen

De relatieve thermische verlenging (rek) van aluminiumlegeringen $\Delta l/l$, (figuur 12) behoort als volgt te zijn bepaald:

voor $0 \text{ }^\circ\text{C} < \theta_{al} < 500 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta l/l = 0.1 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_{al}^2 + 22,5 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{al} - 4.5 \cdot 10^{-4}$$

Waarin:

l = de lengte bij 20°C

Δl = de verlenging veroorzaakt door temperatuur

Dit kan verder uitgebreid worden om een thermische expansie α te bepalen, deze waarden is soms nodig bij de mechanische analyse in software programma's zoals ABAQUS [3].

$$\alpha = 0.2 \cdot 10^{-7} T + 22.5 \cdot 10^{-6}$$

De hyperbolische-sinus kruipwet in eindige elementen software ABAQUS werd gebruikt om kruip bij hoge temperaturen te modelleren. De kruipsnelheid ε_{cre} kan worden uitgedrukt als [3].

$$\varepsilon_{cre} = A_1 [\sinh(B_1 \sigma)]^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{R(T - T_2)}\right)$$

Waarin:

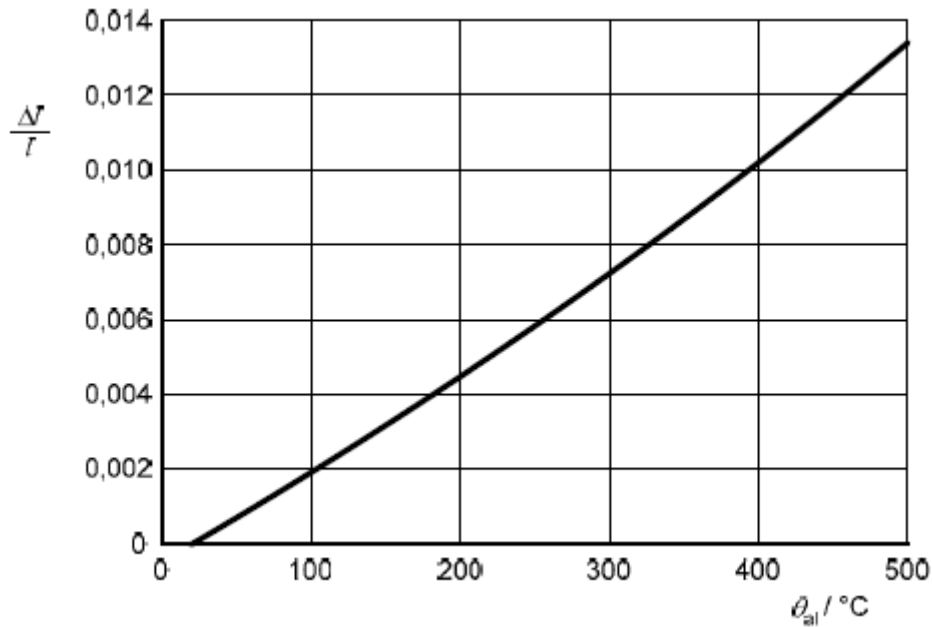
ε_{cre} = kruipsnelheid

A_1 = kracht wet mutliplayer (1/s)

B_1 = hyperbolische-sinus-wet mutliplayer (m^2/N)

ΔH = activatie energy (J/kg)

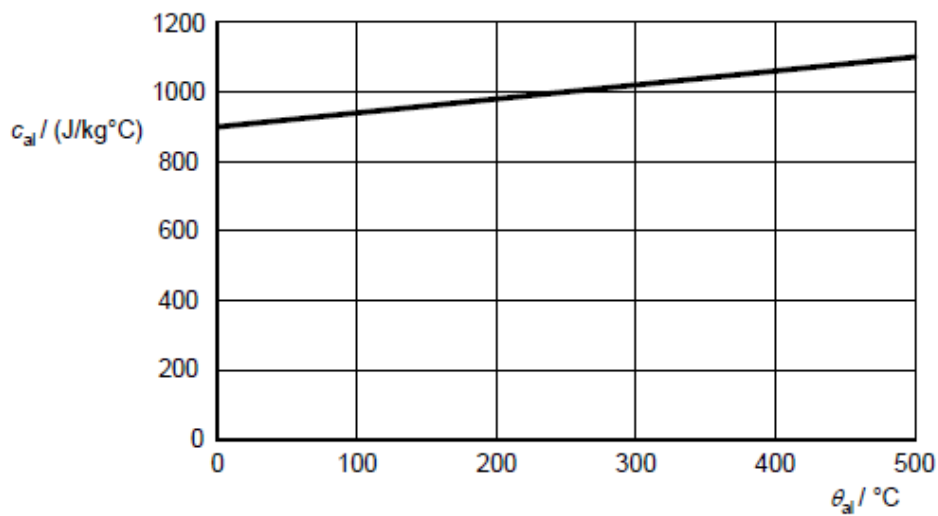
R = gas constante (J/kg $^\circ\text{C}$)



Figuur 12 Relatieve thermische verlenging van aluminiumlegeringen als functie van de temperatuur [1]

De specifieke warmte van aluminium c_{al} , (figuur 13) behoort als volgt te zijn bepaald:
 Voor $0^{\circ}\text{C} < \theta_{al} < 500^{\circ}\text{C}$

$$c_{al} = 0.41 * \theta_{al} + 903 \text{ (J/kg}^{\circ}\text{C)}$$



Figuur 13 Specifieke warmte van aluminiumlegeringen als functie van de temperatuur

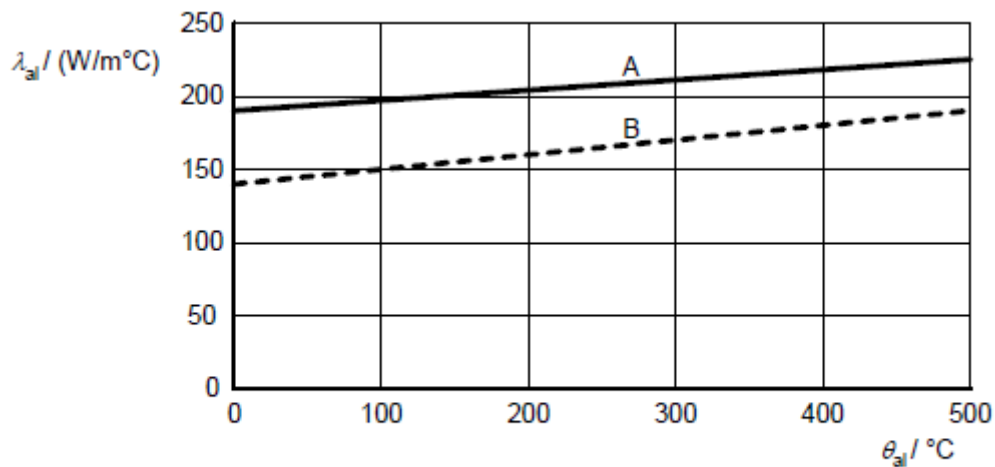
De thermische geleiding van aluminiumlegeringen λ_{al} , (figuur 14) voor $0^{\circ}\text{C} < \theta_{al} < 500^{\circ}\text{C}$ behoort te zijn bepaald:

a) Voor legeringen 3xxx en 6xxx series:

$$\lambda_{al} = 0,07 * \theta_{al} + 190 \text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}$$

b) Voor legeringen 5xxx en 7xxx series:

$$\lambda_{al} = 0.1 * \theta_{al} + 140 \text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}$$



A: 3xxx en 6xxx series, B: 5xxx en 7xxx series

Figuur 14 Warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de temperatuur [1]

Voor de soortelijke warmte van aluminiumlegeringen bij temperaturen onder 500 °C [3]

$$c_{al} = 0.41 * \theta_{al} + 903 \text{ (J/kg °C)}$$

2.3.3.3 Brandwerend bekledingsmateriaal

De eigenschappen en de prestatie van brandwerend bekledingsmateriaal toegepast in het ontwerp en de berekening behoren te zijn getoetst door na te gaan dat de brandwerende bekleding samenhangend en bindend aan zijn ondersteuning blijft gedurende de relevante blootstelling aan brand.

De verificatie van de eigenschappen van beschermende materialen is in het algemeen bepaald door middel van proeven. Momenteel zijn er geen Europese normen voor het beproeven van dergelijke materialen in relatie met aluminiumconstructies. Een voorbeeld van een dergelijke proef toepasbaar op brand beschermde staalconstructies is gegeven in EN 13381-4.

2.4 Ontwerp en berekening van constructies bij brand

Voor de bepaling van eenvoudige berekeningsmodellen of geavanceerde berekeningsmodellen bekijk punt 1.2.2.2 Hier wordt dieper ingegaan op iedere methode. Dit gedeelte geeft regels over aluminiumconstructies die:

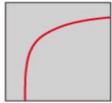
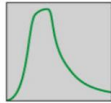

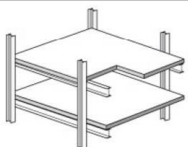
- Onbeschermd kunnen zijn;
- Geïsoleerd kunnen zijn met brandwerend materiaal;
- Beschermd kunnen zijn door hittenscherm.

Voorbeelden van andere beschermingsmethoden zijn het vullen met water of gedeeltelijke bescherming in muren en vloeren.

Brandwerendheid behoort te zijn bepaald door middel van een of meerdere van de volgende methoden:

- Beproeving,
- Eenvoudige berekeningsmodellen,
- Geavanceerde berekeningsmodellen.

Eenvoudige berekeningsmodellen zijn vereenvoudigde ontwerp- en berekeningsmethoden voor afzonderlijke elementen, die gebaseerd zijn op conservatieve aannamen. Geavanceerde berekeningsmodellen zijn ontwerp- en berekeningsmethoden waarbij ingenieursprincipes op realistische wijze toegepast zijn voor specifieke toepassingen (figuur 18).

	 standaardbrand	 natuurlijke brand
 component	classificatie traditioneel	fire safety engineering
 systeem	fire safety engineering	fire safety engineering

Figuur 15 Berekeningsmodellen volgens Ralph Hamerlinck [13]

2.4.1 Eenvoudige berekeningsmodellen

Aangenomen moet worden dat de dragende functie van een aluminiumconstructie of constructief element behouden blijft na een tijd t in een gegeven brand indien:

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

Waarin:

$E_{fi,d}$ = de rekenwaarde van het belastingeffect voor het ontwerp en berekening bij de brandsituatie volgens EN 1991-1-2

$R_{fi,d,t}$ = de rekenwaarde van de weerstand van de aluminiumconstructie of constructief element in aluminium, voor ontwerp en berekening bij de brandsituatie, op tijdstip t

$R_{fi,d,t}$ behoort te zijn bepaald voor de temperatuurverdeling in de constructieve elementen op tijdstip t , door het aanpassen van de rekenwaarde van de weerstand voor het ontwerp en de berekening bij

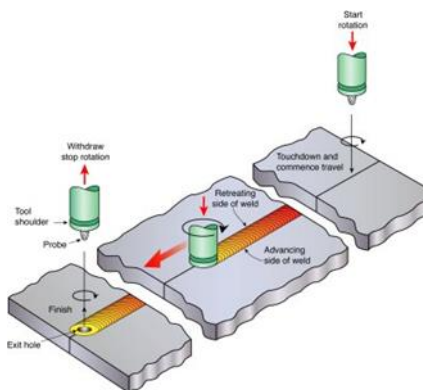
normale temperatuur, bepaald volgens EN 1999-1-1, om de mechanische eigenschappen van aluminiumlegeringen bij verhoogde temperaturen in rekening te brengen.

De weerstand van verbindingen tussen elementen hoeft niet te zijn gecontroleerd mits de thermische weerstand $(d_p/\lambda_p)_c$ van de brandwerende bekleding niet kleiner is dan de minimumwaarde van de thermische weerstand $(d_p/\lambda_p)_M$ van de brandwerende bekleding van elk van de verbonden aluminiumstaven.

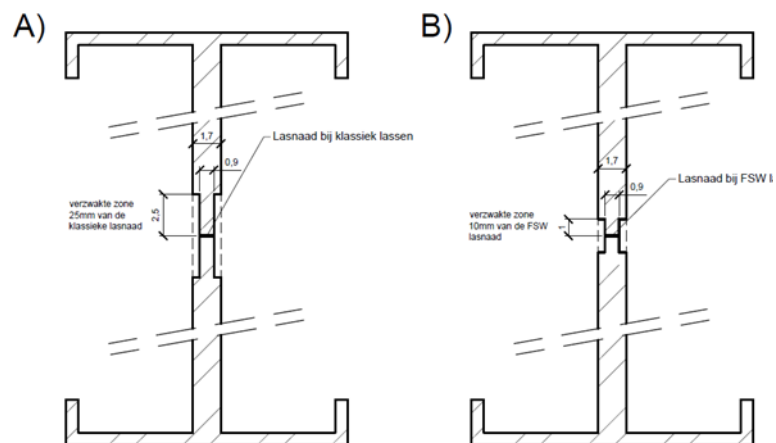
Voor gelaste verbindingen moet de gereduceerde sterkte in de warmte-beïnvloede zone in rekening gebracht worden. Er mag worden aangenomen dat voldaan is aan 3.4.4.2.2.2; 3.4.4.2.2.3 en 3.4.4.2.2.4 vermeld in de EN 1999-1-1 indien de temperatuur θ_{al} op tijdstip t in alle doorsneden niet meer dan 170 °C is.

Het lassen van aluminium kan op de klassieke methodes gebeuren, echter raadt men aan om Friction Stir Welding (FSW) ofwel wrijvingsroerlassen toe te passen (figuur 16) [18]. Hierbij worden de twee te lassen componenten tegen elkaar geplaatst en doormiddel van een pin die warmte genereert. Door rond te draaien zal het te lassen aluminium in een deegachtige toestand komen [18]. Het is belangrijk dat er geen smelten optreedt, door de draaibeweging van de las en de deegachtige toestand van het aluminium ontstaat er een stevige verbinding [18].

Wanneer men kiest voor traditioneel lassen moet men rekening houden met verschillende eigenschappen zoals een inert beschermingsgas, het juiste toevoegmateriaal, de lasnaadvorm, het lasproces en het voorverwarmen van het materiaal [19-21]. Door het warmer maken van het materiaal reduceer je de sterkte-eigenschappen met 50% tot 25mm van de lasnaad langs beide kanten (figuur 17) [19-21]. Het is dus belangrijk dat er wordt nagedacht over de locatie van de lasnaad, zodanig dat deze niet in een kritieke zone komt te liggen [19-21]. Bij aluminium kunnen er geëxtraheerde profielen gemaakt worden waardoor er meer speling ontstaat over de locatie van de lasnaad, er zal dus geen invloedzone zijn van een lasnaad [19-21]. Wanneer men wrijvingsroerlassen toepast wordt het invloedgebied rond de lasnaad beperkt tot 10 mm. De lasnaad heeft dan ook geen nabehandeling nodig. Deze toepassing is mogelijk voor aluminium profielen tot 65mm dikte [19-21].



Figuur 16 FSW toepassing op aluminium [18]



Figuur 17 Invloedszone krachtsreductie A) klassiek lassen, B) FSW. Via Ir. Cyriel Clauwaert

2.4.1.1 Weerstand

Om de sterkte van aluminium profielen te bepalen is het belangrijk om twee begrippen goed te onderscheiden:

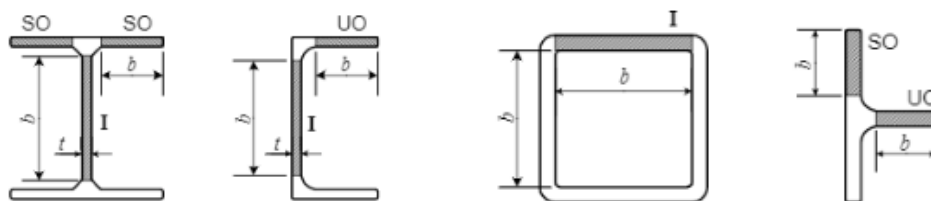
- 1) De netto doorsnede van een profiel. Dit is de bruto doorsnede min de uitsparingen voorzien voor bevestigingsmiddelen of doorvoeren en het mee in rekening brengen van de door de warmte-beïnvloede zone rond lasnaden zoals toegelicht in voorgaande paragraaf.
- 2) Eveneens moet de doorsnedeklasse van het profiel bepaald worden.

2.4.1.2 Classificatie van doorsneden

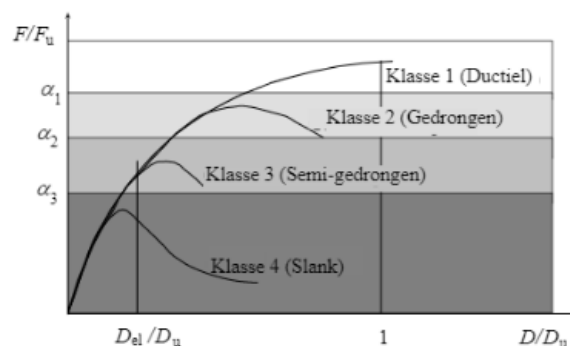
In het ontwerp en de berekening van een brandsituatie mogen doorsneden geclassificeerd zijn als in het ontwerp en de berekening voor normale temperatuur volgens 6.1.4 van EN 1999-1-1 [22]. Hier maakt men een onderverdeling van 4 klassen [22]. Eveneens moet men rekening houden met de door warmte aangetaste zone. Dit is dus afhankelijk of het profiel bestaat uit aan elkaar gelaste elementen of niet. Indien dit het geval is dient er, afhankelijk van het lastype, een reductie van de doorsnede mee in rekening gebracht te worden [22]. In het algemeen wordt er in de bouw niet gewerkt met profielen met een doorsnedeklasse 4 [22]. De klassen zijn verdeeld volgens EN 1999-1-1 6.1.4.2 [22]:

- Klasse 1: Doorsnede waarin zich een plastisch scharnier kan vormen met de rotatiecapaciteit die vereist is voor een plastische berekening zonder vermindering van de weerstand;
- Klasse 2: Is een doorsnede waar een plastisch moment kan worden bereikt doch met beperkte rotatiecapaciteit door lokaal plooiën;
- Klasse 3: Is een doorsnede waar de berekende spanning in de gedrukte uiterste vezel van het aluminiumelement de rekgrens kan bereiken, doch lokaal plooiën de ontwikkeling van het plastisch moment verhindert;
- Klasse 4: Is een doorsnede waar lokaal plooiën zal optreden voor het bereik van de rekgrens in een of meer delen.

Voor de exacte berekening van de doorsneden klasse wordt verwezen naar de EN 1999-1-1. 6.1.4. De classificatie van de doorsnede hangt ook af van het gedrukte deel van het profiel (figuur 18) [22]. De klasse wordt verdeelt volgens de grafiek in figuur 19.



Figuur 18 Aluminium elementen met gearceerde drukzone voor doorsnedenclassificatie [22]



Figuur F.1 – Classificatie van doorsneden

Figuur 19 Classificatie van doorsneden volgens bijlage F NBN EN 1999-1-1

2.4.1.3 Elementen belast op trek

De rekenwaarde van de weerstand $N_{fi,t,Rd}$ van een op trek belast element met een niet-uniforme temperatuurverdeling over de doorsnede op tijdstip t mag zijn bepaald uit:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum A_i k_{0,\theta,i} f_0 / \gamma_{M,fi}$$

Waarin:

A_i = een elementaire oppervlakte van de netto doorsnede met een temperatuur θ_i , inclusief een vermindering, indien van toepassing, om rekening te houden met het effect van de teruggang in sterkte-eigenschappen in de warmtebeïnvloede zone. Deze vermindering is gebaseerd op de gereduceerde dikte $\rho_{0,HAZ} * t$ en is volgens het Aluminium Center gelijk aan ongeveer 50%. Het is belangrijk dat men de netto doorsnede neemt en dus rekening houdt met openingen en uitsparingen in de zwakste doorsnede van het te testen onderdeel

$k_{0,\theta,i}$ = de reductiefactor voor sterkte in geval van de 0.2% rekgrens bij temperatuur θ_i , θ_i is de temperatuur van de elementaire oppervlakte A_i

De rekenwaarde van de weerstand $N_{fi,t,Rd}$ van een op trek belast element met een niet-uniforme temperatuur θ_{al} behoort te zijn bepaald uit:

$$N_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta} N_{Rd} (\gamma_{Mx} / \gamma_{M,fi})$$

Waarin:

N_{Rd} = is de rekenwaarde van de weerstand voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1. N_{Rd} is ofwel $N_{0,Rd}$ ofwel $N_{u,Rd}$

γ_{Mx} = is de partiële factor volgens EN 1999-1-1. γ_{M1} is toegepast in combinatie met $N_{0,Rd}$ en γ_{M2} is toegepast in combinatie met $N_{u,Rd}$

De rekenwaarde van de weerstand $N_{fi,t,Rd}$ is bepaald door de combinatie van N_{Rd} en γ_{Mx} die de laagste capaciteit geeft.

2.4.1.4 Elementen belast op trek: Gereduceerde liggers

De rekenwaarde van de momentweerstand $M_{fi,t,Rd}$ van een doorsnede in klasse 1 of klasse 2 met een niet-uniforme temperatuurverdeling over de doorsnede op tijdstip t mag zijn bepaald uit:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum A_i Z_i k_{0,\theta,i} f_0 / \gamma_{M,fi}$$

Waarin:

Z_i = is de afstand van de plastische neutrale lijn tot het zwaartepunt van het elementaire oppervlak A_i

De rekenwaarde van de momentweerstand $M_{fi,t,Rd}$ van een doorsnede klasse 3 of 4 met een niet-uniforme temperatuurverdeling op tijdstip t te zijn bepaald uit:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta,max} M_{Rd} (\gamma_{Mx} / \gamma_{M,fi})$$

Waarin:

$k_{0,\theta,max}$ = de sterkte in geval van de 0,2% rekgrens van de aluminiumlegering bij de maximale temperatuur $\theta_{al,max}$ op tijdstip t

M_{Rd} = is de momentweerstand van de doorsnede voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur voor klassen 3 of 4 volgens EN 1999-1-1. M_{Rd} is ofwel $M_{c,Rd}$ ofwel $M_{u,Rd}$

γ_{Mx} = is de partiële factor volgens EN 1999-1-1. γ_{M1} is toegepast in combinatie met $M_{c,Rd}$ en γ_{M2} is toegepast in combinatie met $N_{u,Rd}$

De rekenwaarde van de weerstand $M_{fi,t,Rd}$ is bepaald door de combinatie van M_{Rd} en γ_{Mx} die de laagste capaciteit geeft [1, 22].

2.4.1.5 Gereduceerde liggers met risico op Euler knik

De rekenwaarde van de momentweerstand $M_{fi,t,Rd}$ van een doorsnede in klasse 1,2,3 of 4 met een uniforme temperatuurverdeling op tijdstip t te zijn bepaald uit [1, 22]:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta} M_{Rd} (\gamma_{Mx} / \gamma_{M,fi})$$

Waarin:

M_{Rd} = de momentweerstand van de doorsnede voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur voor klasse 3 of 4 volgens EN 1999-1-1. M_{Rd} is ofwel $M_{c,Rd}$ ofwel $M_{u,Rd}$

γ_{Mx} = de partiële factor volgens EN 1999-1-1. γ_{M1} is toegepast in combinatie met $M_{c,Rd}$ en γ_{M2} is toegepast in combinatie met $N_{u,Rd}$

De rekenwaarde van de weerstand $M_{fi,t,Rd}$ is bepaald door de combinatie van M_{Rd} en γ_{Mx} die de laagste capaciteit geeft [1, 22].

De berekeningen voor knik in de eurocode zijn bevestigd door een onderzoek van Shanley [23] en langhelle en andere [24, 25] en in een later onderzoek heeft Maljaars en andere [26-29] dit ook verder bevestigd. Er is dus al een reeks aan onderzoek gebeurd op vlak van de kritische knik bij brand voor aluminium constructies. Zo hebben Maljaars en andere ook al onderzoek gedaan naar invloed van de doorsnedeklassificatie en de moment curve diagrammen voor aluminium doorsnedes bij brand en voor aluminium platen bij brand [30, 31].

2.4.1.6 Dwarskrachten weerstand van gereduceerde liggers

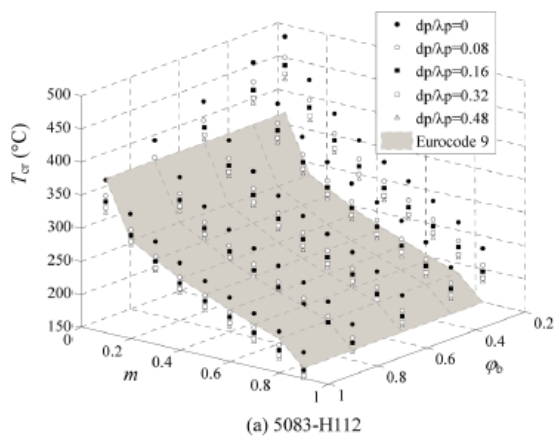
De rekenwaarde van de momentweerstand bij kip $M_{b,fi,t,Rd}$ van een zijdelings ongesteunde ligger op tijdstip t mag zijn bepaald uit [1, 22]:

$$M_{b,fi,t,Rd} = k_{0,\theta max} M_{b,Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,fi})$$

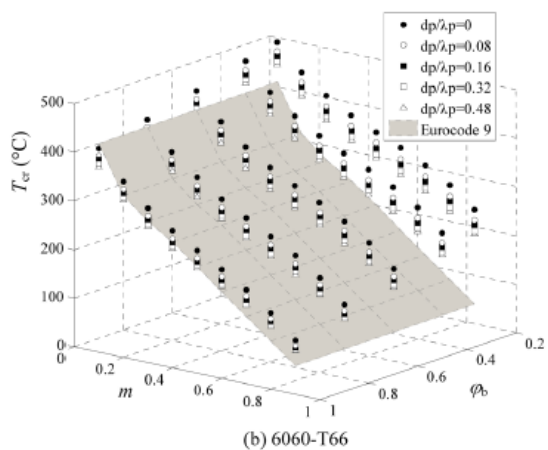
Waarin:

$M_{b,Rd}$ = de rekenwaarde van de momentweerstand bij kip voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1

waarin $k_{0,\theta max}$ de sterkteverminderingfactor is voor de 0,2% proefsterkte bij verhoogde temperatuur [1, 22].



(a) 5083-H112



(b) 6060-T66

Figuur 20 Vergelijking van de kritische temperatuur tussen het onderzoek van Y.Q.Zheng en Z.Zhang en de Eurocode 9 [3]

$M_{fi,t,Rd}$ en $M_{b,fi,t,Rd}$ zijn respectievelijk de momentweerstand en het knikweerstandsmoment bij omgevingstemperatuur en γ_{M1} en $\gamma_{M,fi}$ de partiële veiligheidsfactoren zijn voor de relevante materiaaleigenschap voor respectievelijk normale temperatuur en brandsituatie [3]. Zodra het belastingniveau m van de balk is gegeven, is de kritische temperatuur afhankelijk van de factor $k_{0,2T}$, die de sterktevermindering als functie van de temperatuur weergeeft [3]. Vandaar, houdt de ontwerpmethode van Eurocode 9 geen rekening met de invloeden op de kritische temperatuur van de globale stabiliteitscoëfficiënt of de verhouding dikte/thermische geleiding van de brandwerende plaat [3]. Figuur 20 toont een vergelijking van de kritische temperatuur tussen de vereenvoudigde resultaten van het onderzoek van Y.Q.Zheng en Z.Zhang alsook de resultaten op basis op Eurocode 9 [3]. Het is duidelijk dat Eurocode 9 de kritische temperaturen te laag voorspelt voor deze twee series aluminium-ligger I-balken in de meeste gevallen te laag worden ingeschat [3]. Eurocode 9 blijkt echter gedeeltelijk de kritische temperaturen voor de 5083-H112 balken van aluminiumlegering te overschatten wanneer de globale stabiliteitscoëfficiënt hoger is dan 0,8 en voor de 6060-T66 balken van aluminiumlegering wanneer de globale stabiliteits coëfficiënt hoger is dan 0,8 en het belastingniveau lager is dan 0,5 [3].

De rekenwaarde van de weerstand $V_{fi,t,Rd}$ van een ligger op tijdstip t mag worden bepaald uit:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{0,\theta,max} V_{Rd} (\gamma_{M1} / \gamma_{M,fi})$$

Waarin:

V_{Rd} = de afschuifweerstand van de netto doorsnede voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1

waarin $k_{0,\theta,max}$ de sterkteverminderingfactor is voor de 0,2% proefsterkte bij verhoogde temperatuur [1, 22].

2.4.1.7 Kolommen op druk belast

De rekenwaarde van de weerstand bij instabiliteit $N_{b,fi,t,Rd}$ van een op druk belast element op tijdstip t mag worden bepaald uit:

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{0,\theta,max} N_{b,Rd} (\gamma_{M1} / 1,2 \gamma_{M,fi})$$

Waarin:

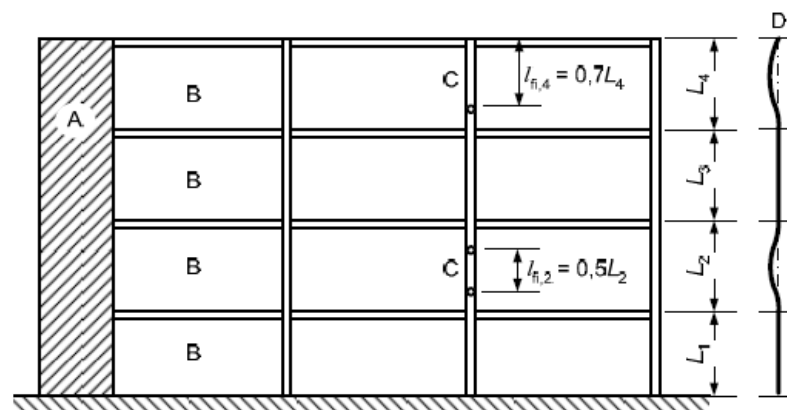
$N_{b,Rd}$ = is de weerstand bij instabiliteit voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur volgens EN 1999-1-1

1,2 is een reductiefactor voor de rekenwaarde van de weerstand vanwege temperatuurafhankelijke kruip van aluminiumlegeringen.

waarin $k_{0,\theta_{max}}$ de sterkteverminderingfactor is voor de 0,2% proefsterkte bij verhoogde temperatuur [1, 22].

Voor de bepaling van de relatieve slankheid zijn de bepalingen in EN 1999-1-1 van toepassing [1, 22]. Een kolom in een tussenverdieping, die volledig verbonden is met de kolommen hierboven en hieronder, mag zijn beschouwd als effectief ingeklemd, mits de brandwerendheid van de bouwelementen die de beschouwde verdieping scheiden, ten minste gelijk is aan de brandwerendheid van de kolom [1, 22].

In een geschoord raamwerk waarin elke verdieping een afzonderlijk brandcompartiment vormt met voldoende brandwerendheid, mag voor de kniklengte l_{fi} van een kolom zijn aangehouden $l_{fi} = 0,5L$ en in de bovenste verdieping mag voor de kniklengte zijn aangehouden $l_{fi} = 0,7L$. Hierin is L de systeemplengte van de relevante verdieping, zie figuur 21.



- A: Wand op afschuiving of ander schoringssysteem
- B: Afzonderlijk brandcompartiment op elke verdieping
- C: Kniklengte van de kolom
- D: Wijze van vervormen bij brand

Figuur 21 Voorbeelden van kniklengtes l_{fi} van kolommen in geschoorde raamwerken

Door Maljaars is er ook een onderzoek gebeurd naar een simulatiebrand in een gebouw via het software pakket Ozone [32-34]. Hier werd een brandproef gedaan op een kantoorgebouw om te testen of de kolommen van het gebouw een REI 60 zouden behalen, dit was niet het geval [32-34]. Echter moet men er wel rekening mee houden dat deze simulatie is uitgevoerd zonder actieve of passieve brandbeschermingsmiddelen [32-34].

2.4.1.8 Buigsterkte kolommen volgens onderzoek TU Eindhoven

In een onderzoek van de universiteit van Eindhoven is er een berekeningsmethode bepaald om de buiging van aluminium kolommen te bepalen bij verhoogde temperaturen. Dit hoofdstuk verwijst naar deze methode [35].

Volgens de Eurocode EN 1999-1-2 kun je met volgende formule de knikweerstand van kolommen bepalen [1, 35]. Hierin zit een factor 1.2, deze factor is een reductie factor die rekening houdt met de temperatuur afhankelijke kruip van aluminium. De factor houdt echter geen rekening met verschillende kruipontwikkeling bij verschillende temperaturen, voor verschillende en/of belasting snelheden en voor verschillende legeringen [1, 35].

$$F_{u,\theta} = \chi_{20^\circ C} * A * f_{0,2,\theta} \frac{1}{1.2 * \gamma_{fi}}$$

Waarin:

$\chi_{20^\circ C}$ = de relatieve knikweerstand

$f_{0.2,\theta}$ = 0.2% rekspanning bij een specifieke temperatuur

De relatieve knikweerstand wordt gelijkgesteld aan de waarde bij kamertemperatuur: $\chi_\theta = \chi_{20^\circ C}$. Dit is gebaseerd op de aanname dat de vermindering als functie van de elasticiteitsmodulus $E_\theta/E_{20^\circ C}$ gelijk is aan de verlaging van de 0,2 % proefspanning $f_{0.2,\theta}/f_{0.2,20^\circ C}$. Een gevolg van deze aanname is dat de relatieve slankheid bij verhoogde temperatuur gelijk is aan de relatieve slankheid bij kamertemperatuur: $\lambda_{rel,\theta} = \lambda_{rel,20^\circ C}$. Verder is het verband tussen $\lambda_{rel,\theta}$ en χ - d.w.z. de kniklijn - gelijk genomen aan die bij kamertemperatuur. Echter, blijkt dat $E_\theta/E_{20^\circ C}$ minder snel afneemt in vergelijking met $f_{0.2,\theta}/f_{0.2,20^\circ C}$. De aanname dat $\lambda_{rel,\theta} = \lambda_{rel,20^\circ C}$ is dus een voorzichtige benadering. In een noot bij de norm wordt op deze kwestie ingegaan door te stellen dat de Nationale bijlage bepalingen kan bevatten om de werkelijke daling van de elasticiteitsmodulus in het ontwerpmodel in aanmerking te nemen [35].

Deze zogenaamde in-elastische kritische knikbelasting $F_{cr,incl,\theta}$ wordt weergegeven door:

$$F_{cr,incl,\theta} = \frac{\pi^2 E_{T,\theta} I}{L_{buc}^2}$$

De vergelijking maakt gebruik van de tangentiële stijfheid $E_{T,\theta}$, gedefinieerd volgens:

$$E_{T,\theta} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

De tangentiële stijfheid wordt uitgedrukt door de parameters van de Ramberg-Osgood Relatie:

$$E_{T,\theta} = \frac{E_\theta}{1 + \frac{E_\theta 0.002 n_\theta}{f_{0.2,\theta}} \left(\frac{\sigma}{f_{0.2,\theta}}\right)^{n_\theta - 1}}$$

Toepassing van de vergelijking hierboven in vergelijking van $F_{cr,incl,\theta}$ en substitutie van σ door $F_{cr,incl,\theta}/A$ resulteert in:

$$\frac{F_{cr,incl,\theta}}{A} + 0.002 E_\theta n_\theta \left(\frac{F_{cr,incl,\theta}}{f_{0.2,\theta} A}\right)^{n_\theta} = \frac{\pi^2 E_\theta I}{A * L_{buc}^2}$$

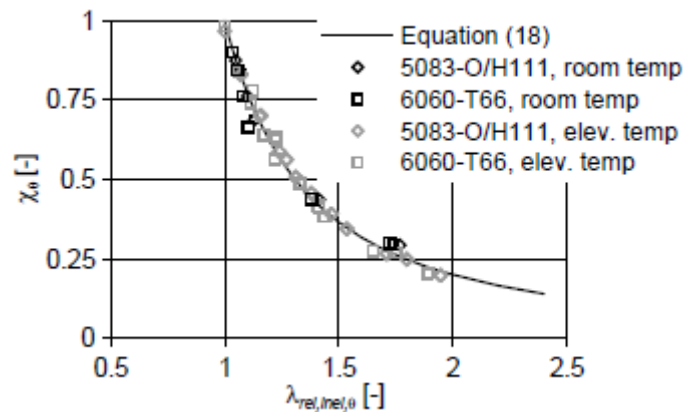
Met de parameters van de Ramberg-Osgood relatie E_θ , $f_{0.2,\theta}$ en n_θ en de geometrische eigenschappen I en A , wordt de vergelijking voor rek gebruikt om $F_{cr,incl,\theta}$ te bepalen. Een iteratieve procedure is nodig voor het oplossen van deze impliciete vergelijking op te lossen.

Er wordt een kniklijn gedefinieerd die het verband geeft tussen de in-elastische relatieve slankheid $\lambda_{rel,incl,\theta}$ en de relatieve knikweerstand χ_θ . Volgende vergelijking beschrijft het verband en wordt weergegeven door de kromme in figuur 22.

$$\chi_\theta = \frac{1}{\lambda_{rel,incl,\theta}^2} - \frac{0.8}{\lambda_{rel,incl,\theta}^3} + \frac{0.8}{\lambda_{rel,incl,\theta}^4}$$

De knikcurve is gebaseerd op een aanpassing van de resultaten van een parametrische studie met een eindig elementen model. Experimenten waar Maljaars in dit onderzoek naar verwijst aan aluminium kolommen bij verhoogde temperaturen worden gebruikt voor de validatie van het eindige elementenmodel. De validatie en de gevallen die in de parameterstudie worden gepresenteerd in een onderzoek van Maljaars in 2009 [36]. De resultaten van de parametrische studie zijn in figuur 22 met symbolen aangegeven. De uiteindelijke knikweerstand volgens het nieuwe ontwerpmodel voor buiging van aan brand blootgestelde aluminium kolommen wordt gegeven door volgende vergelijking:

$$F_{u,\theta} = \chi_{\theta} A f_{0,2,\theta} \frac{1}{\gamma_{fi}}$$



Figuur 22 Verband tussen relatieve knikweerstand en in-elastische relatieve slankheid [35]

2.4.1.9 Element belast op druk en buiging

De rekenwaarde van de weerstand bij instabiliteit van een element belast door een combinatie van buiging en normaalkracht mag zijn bepaald uit EN 1999-1-1, gebruik makend van de combinatieregels voor ontwerp en berekening bij normale temperatuur en gebruik makend van [1]:

$$\begin{aligned} N_{Ed} &= N_{fi,Ed} \\ M_{y,Ed} &= M_{y,fi,Ed} \\ M_{z,Ed} &= M_{z,fi,Ed} \end{aligned}$$

Als rekenwaarde voor de belasting, de weerstand van het element bij brand is bepaald volgens 2.5.4.2.2.3 en 2.5.4.2.2.4 van de EN 1999-1-1 [1].

2.4.1.10 Aluminiumtemperatuurontwikkeling: interne onbeklede aluminiumelementen

Bij een equivalente uniforme temperatuurverdeling in de doorsnede behoort de temperatuuroptename $\Delta\theta_{al(t)}$ van een onbekleed element in een tijdsinterval Δt te zijn bepaald als [1]:

$$\Delta\theta_{al(t)} = k_{sh} \frac{1}{c_{al}\rho_{al}} \frac{A_m}{V} h_{net} \Delta t$$

Waarin:

k_{sh} = de correctiefactor voor het schaduw effect

A_m/V = de profielfactor voor onbeschermd aluminiumelementen

h_{net} = de rekenwaarde van de nettowarmtestroomdichtheid per eenheid van oppervlakte, zie EN 1991-1-2

Voor I-profielen bij blootstelling aan een nominale brand mag de correctiefactor voor het schaduw effect zijn bepaald uit [1]:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V}$$

Waarin:

$(A_m/V)_b$ = De omhullende profielfactoren

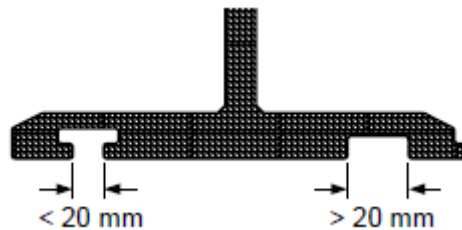
In alle andere gevallen behoort de waarde van k_{sh} te zijn bepaald uit [1]:

$$k_{sh} = \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V} \leq 1,0$$

Het schaduweffect speelt geen rol bij profielen die volledig door vlammen zijn omsloten [1].

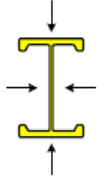
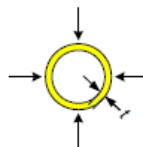
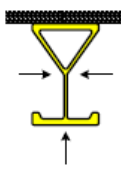
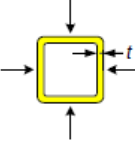
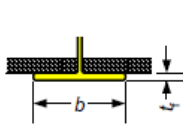
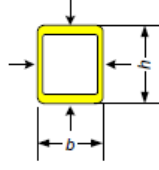
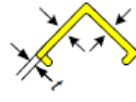
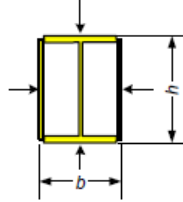
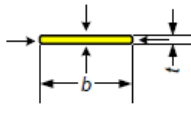
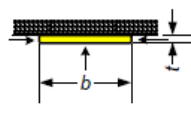
De waarde voor $h_{net,d}$ behoort te zijn verkregen uit EN 1991-1-2 met $\varepsilon_f = 1,0$ en ε_m volgens 2.5.2.2 met ε_f en ε_m als gedefinieerd in EN 1991-1-2 [1]. De waarde Δt behoort niet meer dan 5 seconden te zijn [1]. In de vergelijking van $\Delta\theta_{al(t)}$ dient A_m/V niet kleiner te zijn dan 10 m^{-1} (tabel 4) [1].

Voor de berekening van de blootgestelde oppervlakte van het element, A_m , behoren groeven met een breedte aan het oppervlak van minder dan 20 mm niet te worden meegenomen [1]. De oppervlakte van groeven met een breedte aan het oppervlak van meer dan 20 mm behoren wel meegenomen te zijn in de berekening van de blootgestelde oppervlakte, zie figuur 23 [1].



Figuur 23 Voorbeelden van groeven met een breedte aan het oppervlak $< 20 \text{ mm}$, en groeven met een breedte aan het oppervlak $> 20 \text{ mm}$ [1]

Tabel 4 Profiefactor A_m/V van onbeklede constructieve aluminiumelementen [1]

<p>Open profiel aan alle zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{omtrek}}{\text{oppervlakte doorsnede}}$	<p>Rond buisprofiel rondom blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{1}{t}$
<p>Open profiel aan drie zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{aan brand blootgestelde buitenzijde oppervlakte doorsnede}}{\text{oppervlakte doorsnede}}$	<p>Buisprofiel (of gelast kokerprofiel met uniforme dikte) aan alle zijden blootgesteld aan brand:</p>  <p>Voor $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p>
<p>Flens van een I-profiel aan drie zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t_f}{bt_f}$ <p>Voor $t_f \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t_f}$</p>	<p>Kokerprofiel aan alle zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{2b + h}{\text{oppervlakte doorsnede}}$
<p>Hoekprofiel (of elk open profiel met uniforme dikte) aan alle zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{2}{t}$	<p>I-profiel met aangelaste zijplaten, aan alle zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{2b + h}{\text{oppervlakte doorsnede}}$
<p>Strip aan alle zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{2b + 2t}{bt}$ <p>Voor $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{2}{t}$</p>	<p>Strip aan drie zijden blootgesteld aan brand:</p>  $\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t}{bt}$ <p>Voor $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p>

2.4.1.11 Interne aluminiumconstructies bekleed met brandwerend bekledingsmateriaal

Bij een uniforme temperatuurverdeling in een doorsnede behoort de temperatuuroename $\Delta\theta_{al(t)}$ van een bekleed element in een tijdsinterval Δt te zijn bepaald uit [1]:

$$\Delta\theta_{al(t)} = \frac{\lambda_p/d_p A_p}{c_{al}\rho_{al} V} \left[\frac{1}{1 + \phi/3} \right] (\theta_{(t)} - \theta_{al(t)}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{(t)}$$

Maar $\Delta\theta_{al(t)} \geq 0$

Hierin is:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_{al} \rho_{al}} d_p \frac{A_p}{V}$$

Waarin:

A_p/V = is de profielfactor voor aluminiumelementen bekleed met een brandwerend bekledingsmateriaal

$\theta_{(t)}$ = de temperatuur van de omringende gassen op tijdstip t (°C)

$\theta_{al(t)}$ = de aluminium temperatuur op tijdstip t (°C)

$\Delta\theta_{(t)}$ = toename van temperatuur van de omringende gassen gedurende tijdsinterval Δt (°C)

d_p = dikte van brandwerend materiaal


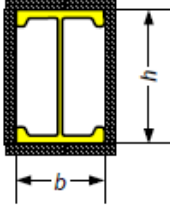
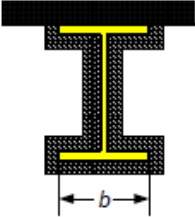
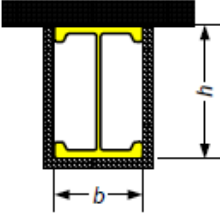
De waarde voor Δt behoort niet meer dan 30 seconden te zijn [1]. Tabel 5 geeft een aantal rekenwaarde van de profielfactor A_p/V voor beschermde aluminiumelementen [1]. Voor de meeste brandwerende bekledingsmaterialen mag de berekening van de aluminiumtemperatuurtoename $\Delta\theta_{al(t)}$ zijn aangepast om rekening te houden met een tijdvertraging in de stijging van de aluminiumtemperatuur wanneer deze 100 °C bereikt [1]. Echter zal het aluminium volgens het Aluminium Center pas drastisch zijn sterkte verliezen vanaf een temperatuur van 200°C. Wanneer het aluminium een temperatuur van 100°C bereikt ontstaat er een temperatuurstijging door de verdamping van water in het brandwerende materiaal en de absorptie van warmtehoeveelheid. de vertragingstijd t_V is meestal om rekening te houden met het effect van vocht [3].

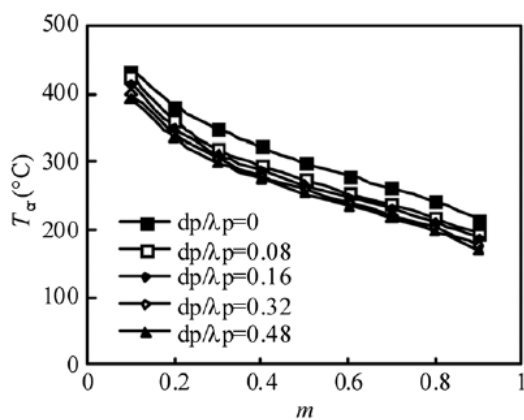
$$t_V = \frac{p * \rho_p * d_p^2}{5\lambda_p}$$

Figuur 24 toont de invloed van de verhouding van de dikte van de vuurvaste plaat en de thermische geleidbaarheid (d_p/λ_p) op de kritische temperatuur [3]. Het blijkt dat de kritische temperaturen van balken van aluminiumlegeringen relatief snel dalen wanneer d_p/λ_p onder 0,08 ligt [3]. Vervolgens dalen ze lineair met de toename van de verhouding boven 0,08 [3].

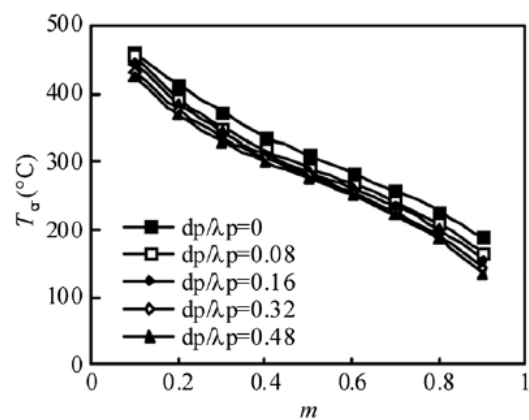
Voor balken met een belastingsniveau van 0,3 en een verhouding van 0,08 waarde veroorzaakt een toename van de verhouding van 0 tot 0,08 een 8,4% afname van de kritische temperatuur in de 5083-H112 legering en een daling van 6,2% in de kritische temperatuur in de 6060-T66 legering [3]. De onbeschermden balken lijken hogere kritische temperaturen te hebben dan de met brandboard beschermde balken [3]. Dit kan worden toegeschreven aan de langzamere ontwikkeling van laterale buigtorsie in onbeschermden balken tijdens de latere verwarmingsfase en snellere ontwikkeling van verticale doorbuiging tijdens de vroegere verwarmingsfase als gevolg van de grotere uitzetting van de onder flens en de opwaartse verschuiving van de natuurlijke as die het gevolg is van de relatief grotere temperatuurgradiënt voor onbeschermden liggers [3].

Tabel 5 Profiefactor A_p/V voor constructieve aluminiumelementen met een brandwerende bekleding bij gebruik van de methode van de gelokaliseerde massa "lumped mass method" [1]

Schematische voorstelling	Omschrijving	Profiefactor (A_p/V)
	Bekleding met uniforme dikte die de profielvorm volgt, aan alle zijden blootgesteld aan brand.	$\frac{\text{aluminiumomtrek}}{\text{oppervlakte aluminiumdoorsnede}}$
	Holle bekleding met uniforme dikte, aan alle zijden blootgesteld aan brand.	$\frac{2(b+h)}{\text{oppervlakte aluminiumdoorsnede}}$
	Bekleding met uniforme dikte die de profielvorm volgt, aan drie zijden blootgesteld aan brand.	$\frac{\text{aluminiumomtrek} - b}{\text{oppervlakte aluminiumdoorsnede}}$
	Holle bekleding met uniforme dikte, aan drie zijden blootgesteld aan brand.	$\frac{2h+b}{\text{oppervlakte aluminiumdoorsnede}}$



(a) 5083-H112



(b) 6060-T66

Figuur 24 Invloed van de dikte van de vuurvaste plaat tegenover de thermische geleidbaarheid [3]

2.4.1.12 *Interne aluminiumconstructies in een afgesloten ruimte, afgeschermd door hitteschermen*

De hieronder gegeven bepalingen zijn van toepassing op de volgende gevallen:

- aluminiumelementen in een afgesloten ruimte begrensd door een vloer aan de bovenzijde en een horizontaal hitteschermd aan de onderzijde;
- aluminiumelementen in een afgesloten ruimte begrensd door verticale hitteschermen aan beide zijden.

Voor interne aluminiumconstructies afgeschermd door hitteschermen behoort de berekening van de aluminiumtemperatuuroename $\Delta\theta_{al}$ gebaseerd te zijn op de van toepassing zijnde methode gegeven in de Eurocode waarbij de temperatuur van de omringende gassen θ_t gelijk is genomen aan de gastemperatuur in de afgesloten ruimte.

De eigenschappen en het gedrag van de hitteschermen behoren te zijn bepaald met een van de toepassing zijnde beproevingsprocedures volgens EN 13381-1 of EN 13381-2.

De temperatuurontwikkeling in de afgesloten ruimte waarin de aluminiumelementen zich bevinden, behoort te zijn bepaald uit één van de van toepassing zijnde standaardbrandproeven volgens EN 13381-1 of EN 13381-2, of berekend met een goedgekeurde methode.

Als alternatief voor de waarde voor de warmte-overdrachtscoëfficiënten voor convectie en straling (respectievelijk α_c en α_r) in EN 1991-1-2, mogen in de berekening van $\Delta\theta_{al}$ de waarde, bepaald uit de van toepassing zijnde proeven volgens EN 13381-1 of EN 13381-2, zijn gebruikt.

2.4.1.13 *Externe aluminiumconstructies*

Bij het bepalen van de temperatuur in externe aluminiumconstructies, behoort met het volgende rekening te zijn gehouden, onder de aanname dat er geen warmteoverdracht door straling is naar die zijden die zijn afgeschermd door de hitteschermen:

- De warmtestroomdichtheid door straling vanuit het brandcompartiment;
- De warmtestroomdichtheid door straling en de warmtestroomdichtheid door convectie van de vlammen die uit openingen slaan;
- Het warmteverlies door straling en convectie van de aluminiumconstructie naar de omgeving;
- De afmetingen en posities van de constructieve elementen.

Hitteschermen mogen zijn toegepast aan één, twee of drie zijden van een extern aluminiumelement om bescherming te bieden tegen warmteoverdracht door straling.

Hitteschermen behoren ofwel:

- Rechtstreeks te zijn geplaatst aan die zijde van het aluminiumelement dat moet zijn beschermd;
- Groot genoeg zijn om deze zijde volledig af te scherm van de verwachte warmtestroomdichtheid door straling.

Hitteschermen behoren onbrandbaar te zijn en een brandwerendheid te hebben van ten minste EI 30 volgens EN ISO 13501-2. Zie bijlage B voor meer info. Berekeningen mogen gebaseerd worden op een evenwichtssituatie horend bij een stationaire warmtebalans bij gebruik van de methode in bijlage B.

2.4.1.14 *Geavanceerde berekeningsmodellen*

Geavanceerde berekeningsmethoden werden al eerder besproken. Deze berekeningsmethoden behoren te zijn gebaseerd op fundamenteel fysisch gedrag zodanig dat ze leiden tot een betrouwbare

benadering van het verwachte gedrag van de van toepassing zijnde constructieve componenten onder brandomstandigheden.

Elke mogelijke bezwijkvorm die niet is meegenomen in de geavanceerde berekeningsmethoden (inclusief plooiën en bezwijken door afschuiven) behoort te zijn voorkomen door geschikte maatregelen. Geavanceerde berekeningsmethoden behoren berekeningsmodellen te omvatten voor de bepaling van:

- De ontwikkeling en verspreiding van de temperatuur van constructie-elementen (thermisch responsmodel);
- Het mechanische gedrag van de constructie of elk gedeelte daarvan (mechanisch responsmodel).

Geavanceerde berekeningsmethoden mogen worden toegepast in combinatie met elke brandkromme, mits de materiaaleigenschappen bekend zijn voor het van toepassing zijnde temperatuurgebied. Geavanceerde berekeningsmethoden mogen worden toegepast voor elk type doorsnede.

2.4.1.15 Geavanceerde berekeningsmodellen: thermische respons

Geavanceerde berekeningsmethoden voor de thermische respons behoren gebaseerd te zijn op geaccepteerde beginselen en aannamen van de theorie voor warmteoverdracht.

Het thermische responsmodel behoort in rekening te brengen:

- De relevante thermische belastingen gespecificeerd in EN 1991-1-2;
- Het verloop van de thermische eigenschappen van het materiaal als functie van de temperatuur.

Er mag rekening worden gehouden met de effecten van niet-uniforme thermische blootstelling en met de warmteoverdracht naar aangrenzende gebouwelementen, indien van toepassing.

De invloed van vocht, in welke hoeveelheid dan ook, en van elk vochttransport in het brandwerende bekledingsmateriaal mag als veilige benadering worden verwaarloosd.

2.4.1.16 Geavanceerde berekeningsmodellen: mechanische respons

Geavanceerde berekeningsmethoden voor de mechanische respons behoren gebaseerd te zijn op geaccepteerde beginselen en aannamen van de theorie van de mechanica van constructies, rekening houdend met het verloop van de mechanische eigenschappen als functie van de temperatuur.

Er hoort rekening gehouden te zijn met thermische rekken en spanningen ten gevolge van temperatuurstijging en temperatuurverschillen.

Het model voor de mechanische respons behoort ook rekening te houden met:

- De gecombineerde effecten van mechanische belastingen, geometrische imperfecties en thermische belastingen;
- De temperatuurafhankelijke mechanische materiaaleigenschappen;
- Geometrische niet-lineaire effecten;
- De effecten van niet-lineaire materiaaleigenschappen, inclusief de gunstige effecten van belasten en ontlasten op de constructieve stijfheid.

Voor een metaaltemperatuur boven 170 °C voor een periode van meer dan 30 minuten dient er expliciet aandacht besteed te zijn aan de invloed van tijdelijke thermische kruip.

De vervormingen in de uiterste grenstoestand volgend uit de berekeningsmethode behoren te zijn beperkt opdat de samenhang tussen alle delen van de constructie is verzekerd.

Bij het ontwerp en de berekening dient rekening gehouden te worden met de uiterste grenstoestand waarbij bij het overschrijden daarvan de berekende vervormingen van de constructie bezwijken zouden veroorzaken ten gevolge van het verlies van voldoende oplegging van één van de elementen. De berekening van elementen die onderhevig zijn aan knik worden uitgevoerd door toepassing van een sinusvormige initiële imperfectie met een maximumwaarde in het midden volgens de maximum toegestane afwijkingen gespecificeerd in EN 1090-3.

2.4.2 Validatie van geavanceerde berekeningsmodellen

Een validatie van de nauwkeurigheid van de berekeningsmethoden behoort te zijn uitgevoerd op basis van relevante proefresultaten. Berekeningsresultaten mogen worden uitgedrukt in temperaturen, vervormingen en tijden voor de brandwerendheid. De kritische parameters behoren door middel van een gevoeligheidsanalyse te zijn gecontroleerd om ervan verzekerd te zijn dat het model voldoet aan correcte ingenieursprincipes. Kritische parameters mogen betrekking hebben op bijvoorbeeld de kniklengte, de afmetingen van de elementen en het belastingniveau. Deze methodiek zal ook gehanteerd worden in latere proeven.

2.5 Brandreactie van aluminium in kaart gebracht

Aluminium verliest zijn sterkte tussen de 200 – 350 °C. Het is dus belangrijk om te voorkomen dat het aluminium deze temperatuur bereikt [35]. Voor de veiligheid is het dus van belang dat het aluminium goed beschermd is tegen oplopende temperaturen voorbij deze kritische grens.

2.5.1 Voordelen van aluminium

Constructies uitgevoerd in aluminium leiden vaak tot een beperking van het eigen gewicht met 50-30% [17]. Het soortelijk gewicht van aluminium bedraagt 2755 kg/m^3 terwijl staal een soortelijk gewicht heeft van 7800 kg/m^3 [17]. Eveneens is aluminium ook recyclebaar zonder dat het zijn kwaliteit inboet en aluminium is beter bestand tegen corrosie [16].

Doordat aluminium profielen geëxtrudeerd worden, kunnen er ingewikkeldere toepassingen mee uitgevoerd worden met o.a. zeer performante knopen en verbindingen.

2.5.2 Aluminium legeringen

Aluminium is een onedel metaal, dit wil zeggen dat het makkelijk kan oxideren [37]. Om aluminium sterker of beter toepasbaar te maken voor specifieke doeleinden gaat men over tot het legeren. Hierbij kunnen andere elementen tot wel 15 massaprocent uitmaken van de legering [37]. Aluminium legeringen zijn sterke en buigzame metalen, en hebben veel gelijkheden met structureel staal [37]. Deze legeringen bestaan vaak uit: ijzer, koper, magnesium, silicium en zink [37]. Het toevoegen van één van deze elementen geeft het aluminium betere eigenschappen, in onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van de soorten legering en toegevoegde waarde [38]. In de bouw wordt vooral gewerkt met het type 6xxx legeringen, deze zijn vaak ook thermisch gehard. Voor de Materiaaleigenschappen van aluminiumlegeringen is een opsomming gemaakt in tabel 6.

Tabel 6 Aluminium legeringen: eigenschappen en toepassingen [38]

Groep	Toegevoegd element	Sterkte	Vervormbaarheid	Corrosie weerstand	Lasbaarheid	Toepassingen
1xxx	99% ongelegeerd aluminium	laag	Zeer goed	Zeer goed	Zeer goed	Verpakkingen, reflectoren, warmtewisselaars, keukengerei
2xxx	Koper + magnesium	hoog	redelijk	matig	slecht	Constructie, machinebouw, automobiel sector
3xxx	mangaan	laag	goed	goed	goed	Dakbedekking, rolluiken, warmtewisselaars, meubels, scheidingswanden, sandwichpanelen, golfplaten
4xxx	silicium	gemiddeld	Zeer goed	goed	Zeer goed	Gietstukken, lasmateriaal,
5xxx	magnesium	Gemiddeld tot hoog	Goed tot matig	goed	goed	Scheepsbouw, constructie, gevelbekleding, kozijnen/ raamprofielen
6xxx	Silicium + magnesium	gemiddeld	goed	goed	goed	Scheepsbouw, constructie, carosseriedelen, roldeuren, hekwerken
7xxx	zink	hoog	Redelijk tot goed	Matig tot redelijk	Matig tot goed	Luchtvaart, transport, dynamisch belaste constructies
8xxx	Niet veel over gekend, nieuw ontwikkeld maar bleek een lage E-modulus te hebben en zeer plastisch te zijn.					Lucht- en ruimtevaart

Op vlak van brandveiligheid kan er geen conclusie getrokken worden uit deze tabel. Aluminiumlegeringen met een belangrijk gehalte aan zink van het type 7xxx lijken een goede sterkte te hebben, maar deze legeringen verliezen bij 100 °C een groot deel van hun sterkte volgens figuur 8. Andere aluminium legeringen verliezen percentueel minder snel hun sterkte, dit maak legeringstypes van 6xxx en 5xxx toepasbaar in de bouw, zie figuur 6, 8 en 9 bij puntje 2.3.3.

2.5.3 Volgens de Ramberg-Osgood methode

Om op een meer accurate wijze de evolutie van de mechanische eigenschappen te interpreteren voor een aluminium constructie waarvan de temperatuur toeneemt [2]. Verwijst het onderzoek naar de Ramberg-Osgood wet [2]. Deze beschrijft het niet lineair gedrag van materialen dat vaak voorkomt vlak voor de vloeigrens [2].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K * \left(\frac{\sigma}{f_{0.2}}\right)^n$$

Waarin:

ε = rek

E = Young's modulus

σ = spanning

K = de sterktecoëfficiënt van het materiaal, meestal = 0,002

$f_{0.2}$ = vloeispanning

n = rekverhardingscoëfficiënt

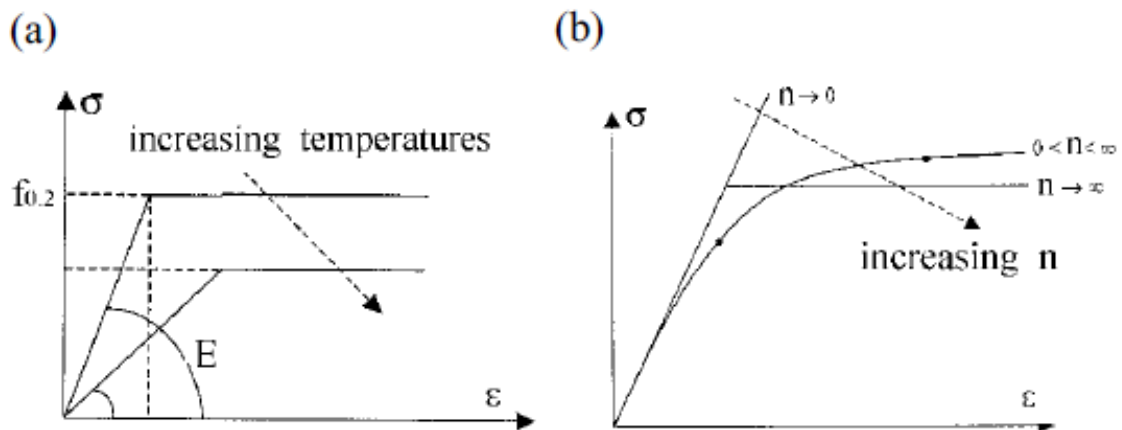
$$n = \frac{\log \frac{0,002}{\varepsilon_u}}{\log \frac{f_{0.2}}{f_t}}$$

Waarin:

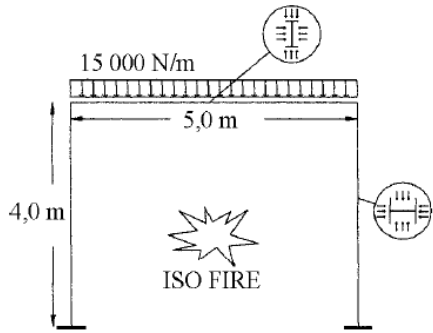
f_t = absolute spanning

ε_u = absolute rek

De n-waarde meet de rekverharding van de aluminium legering. Deze bepaald de vorm van de curve in de post elastische fase [2]. Wanneer de n-waarde de nul nadert dan geeft de wet van Ramberg-Osgood een oneindig elastisch gedrag weer (figuur 25) [2]. Terwijl voor grote n-waarden een elastisch-plastisch gedrag wordt bekomen [2].



Figuur 25 Spannings-rek diagrammen voor aluminium (a) normaal elastisch (b) Ramberg-Osgood [2]



ALLOY	$f_{0,2,d}$ (N/mm ²)	Column HEB	Beam IPE
3003-O	45	160	450
3003-H14	145	160	300
5052-O	90	160	330
5052-H34	215	160	240
5454-O	117	160	300
5454-H32	207	160	240
5083-O	145	160	300
5086-O	117	160	300
6061-T6	283	160	240
6063-T6	220	160	240
7075-T6	517	160	240

Figuur 26 Onderzoek "behaviour of aluminium alloy structures under fire" [2]

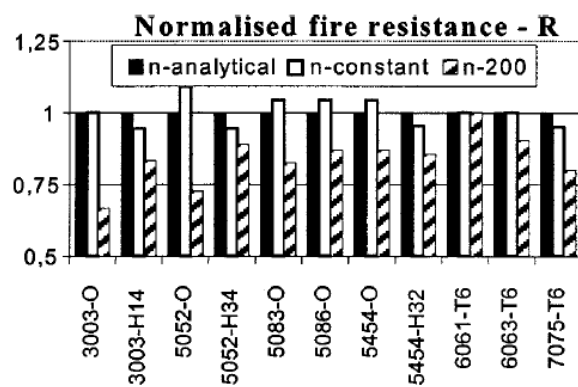
In het verslag van "behaviour of aluminium alloy structures under fire" wordt er onderzoek gedaan naar de spanningsverharding van aluminium constructies onderhevig aan brand (figuur 26) [2]. Voor dit onderzoek werden er verschillende aluminium portaal structuren onderworpen aan een brandproef en werden de reacties van de verschillende aluminium legeringen beoordeeld [2]. Uit dit onderzoek konden enkele interessante conclusies getrokken worden [2]. Zo bleek de n waarde voor onbehandelde aluminiumlegeringen (type o) juist een stijging te hebben van 50% voor de spanningsverharding [2]. Terwijl de legering types die behandeld zijn (H en T types) een daling hadden voor hun spanningsverharding [2]. Echter lag de klemtoon van dit onderzoek op het bepalen van de evolutie van de spannings verharding bij hoge temperaturen en niet bij het optimaliseren van de brandweerstand van aluminium constructies [2].

In dit onderzoek zijn er met verschillende waarden voor n in de Ramberg-Osgood wet de spannings-tek diagrammen in kaart gebracht per aluminium legering die worden toegepast in de bouw [2]. De hieruit bekomen waarde wordt vermeld in figuur 27 [2]. Analytisch is de n -waarde waarbij ze rekening

houden met de variatie van de andere parameters per temperatuurstijging zoals $f_{0,2,T}$, $\epsilon_{u,T}$ en $f_{t,T}$, in het onderzoek nemen ze dus de effectieve N waarde [2]. Bij n -constant wordt er gekeken naar de waarde van n bij de constante omgevingstemperatuur en bij n -200 wordt n gelijkgesteld aan 200, dat representatief is voor een elastisch-plastisch gedrag (figuur 28) [2].

ALLOY	Fire resistance (min)		
	n -analytical	n -constant	n -200
3003-O	6	6	4
3003-H14	6	5,40	5
5052-O	7,20	8	5,20
5052-H34	6	5,40	5,20
5083-O	7,40	8	6,20
5086-O	7,40	8	6,40
5454-O	7,40	8	6,40
5454-H32	7	6,40	6
6061-T6	5,20	5,20	5,20
6063-T6	7	7	6,20
7075-T6	6,40	6,20	5,20

Figuur 27 Brandweerstand van verschillende aluminium legeringen [2]



Figuur 28 Brandweerstand van aluminium legeringen met afwisselende waarde voor n [2]

2.5.4 Spanningcorrosie

Spanningcorrosie is een vorm van corrosie die bij alle metalen kan voorkomen. Vaak gebeurt dit bij civiele constructies waar sprake is van contact met chloride en nitraten, zoals zwembaden. In het materiaal ontstaan kleine scheurtjes, in combinatie met trekspanning kan dit een brose breuk als gevolg hebben. Het risico op spanningscorrosie neemt toe wanneer de temperatuur stijgt.

2.6 Brandveilige aluminium structuren

In dit deel wordt een overzicht gemaakt over de regels die van toepassing zijn op brandveilige aluminium structuren. Eveneens de procedures en criteria die getest moeten worden komen aan bod. Net zoals de eigenschappen van aluminium, die ondertussen goed gekend zijn.

Aluminium wordt al veel gebruikt in de marine wereld. Maar het product wordt vandaag de dag ook steeds vaker toegepast op constructies aan het vaste land. Zo kan aluminium voor verschillende voordelen zorgen, zoals beperking van gewicht, beperking van installatie kosten en onderhoud. Echter zijn er wel enkele aandachtspunten in verband met brandveiligheid.

Bij het testen van de brandveiligheid van een materiaal zijn er twee grote hoofdgroepen.

- 1) Het brandgedrag van het materiaal zelf wordt bestudeerd.
In dit geval maakt dit voor aluminium niet veel uit aangezien aluminium zelf niet brandbaar is.
- 2) De weerstand die het materiaal kan bieden tegen brand om het verspreiden ervan te voorkomen. Dit is echter een belangrijk aspect om te onderzoeken bij de brandveiligheid van aluminium. De stevigheid en de thermische weerstand van de constructie zijn hierbij belangrijk.

2.6.1 Vergelijking aluminium met staal bij brand

De richtlijnen voor aan brand blootgestelde constructies komen aan bod voor staal in EN 1993-1-2 en voor aluminium in EN 1999-1-2. Deze normen hanteren dezelfde bezwijkmechanismes als bij het ontwerp bij normale temperaturen. Er wordt geen rekening gehouden met de verandering van materiaaleigenschappen ten gevolge van de blootstelling aan hoge temperaturen. Zo kan een thermische uitzetting resulteren in grote vervormingen, of wanneer deze vervormingen worden verhinderd resulteert dit in hoge interne spanningen. Eveneens heeft visco-plastisch materiaal gedrag, dit is het gedrag van een materiaal dat zich deels in vaste vorm en deels in vloeibare vorm bevindt, een direct resultaat op de materiaalsterkte en kan dit resulteren in grote vervormingen en/of spanningsrelaxatie. De faalwijzen van aluminium constructies bij brand worden in EN 1999-1-2 onderscheiden [15]:

- De weerstand van de dwarsdoorsnede kan overschreden worden door een combinatie van dwarskrachten, deze dwarskrachten kunnen het gevolg zijn van buitenaf toegevoegde krachten, al dan niet accidenteel (bezwijken van constructie delen). Of ze kunnen ontstaan door thermische uitzetting;
- Verbindingen tussen elementen die het begeven;
- Vervormingen kunnen op zodanige schaal optreden dat de verschillende constructie onderdelen niet meer samenwerken zoals voorzien. Dit kan het gevolg zijn van kruip, thermische uitzetting, de ontwikkeling van plastische scharnieren, vermindering van de stijfheid van materiaal of verbindingen en thermische uitzetting;
- Knikken kan optreden wanneer delen geheel of gedeeltelijk in druk zijn. Knik kan opgedeeld worden in tussen knik van het gehele lid of knik ter plaatse van de dwarsdoorsnede.

EN 1999-1-2 geeft eenvoudige berekeningsmodellen voor afzonderlijke componenten weer [15]. Bij de beoordeling van afzonderlijke onderdelen moet men alleen rekening houden met thermische vervormingseffecten als gevolg van thermische gradiënten in de dwarsdoorsnede [15]. Bovendien mag worden aangenomen dat de randvoorwaarden ter plaatse van de steunen en uiteinden van een onderdeel ongewijzigd blijven tijdens de duur van de blootstelling aan brand [15]. De eenvoudige berekeningsmodellen in EN 1999-1-2 bestaan uit analytische vergelijkingen die de bezwijkmechanismen van onderdelen bestrijken [15]. EN 1999-1-2 biedt ook de mogelijkheid om geavanceerde rekenmodellen toe te passen om een afzonderlijk onderdeel, een deel van de constructie of zelfs de gehele constructie te controleren [15]. In dit geval moet rekening worden

gehouden met de relevante bezwijkmodus tijdens blootstelling aan brand, de temperatuurafhankelijke materiaaleigenschappen en stijfheid van de constructieonderdelen, en eveneens met de effecten van thermische uitzetting en vervorming [15]. Bij het brandontwerp moeten de door de berekeningsmethode bepaalde vervormingen in de uiterste grenstoestand worden beperkt om ervoor te zorgen dat de samenwerking tussen alle delen van de constructie behouden blijft [15].

Aluminium is, net als staal, onbrandbaar [17]. Maar dit enkel wanneer het zich niet in poeder of vlokken vorm bevindt. Staalwol kan zo bijvoorbeeld wel in brand worden gestoken [17]. Staal smelt bij een temperatuur van 1500 °C terwijl aluminium al smelt bij 650°C [17]. Het verhogen van de temperatuur beïnvloedt ook de draagkracht van beide materialen [17].

De thermische geleidbaarheid/warmtegeleidingscoëfficiënt is een materiaalconstante die aangeeft hoe goed een materiaal warmte geleidt. Voor aluminium is dit ongeveer vier keer hoger dan staal [17]. De specifieke warmtecapaciteit, het vermogen van een materiaal om warmte op te slaan, is voor aluminium ongeveer het dubbele dan dat van staal [17]. De reflectie-index geeft weer hoeveel licht een materiaal reflecteert. Dat van aluminium is tot negentien keer die van staal, aluminium wordt ook gebruikt bij de productie van spiegels [17].

In tabel 7 is een samenvatting van de verschillen tussen staal en aluminium. In dit voorbeeld wordt aluminium type 6082-T6 gebruikt, dit is een aluminium met een gemiddelde sterkte en de beste presterende aluminium in de 6xxx categorie (silicium + magnesium legering). Voor staal is het type S355 toegepast, wat een van de sterkere staalsoorten is.

Tabel 7 Overzicht eigenschappen aluminium 6082-T6 en staal S355 [17]

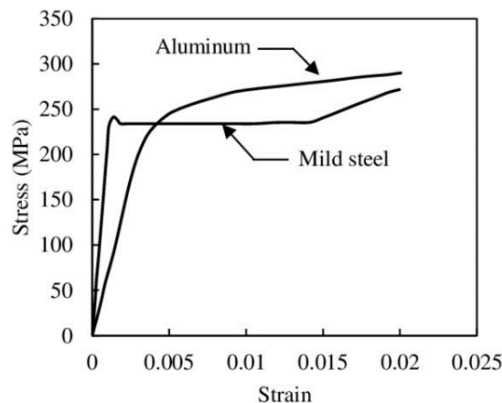
EIGENSCHAP	WAARDE ALUMINIUM	WAARDE STAAL
ELASTICITEIDSMODULUS IN MPA	70000	210000
TREKSTERKTE TOT BEZWIJKEN IN MPA	310	420
TREKSTERKTE TOT VLOEIGRENS IN MPA	290	350
SMELTPUNT IN °C	660	1425-1540
SPECIFIEKE WARMTECAPACITEIT IN (0-100°C)(J/G.°C)	0.9	0.47
WARMTEGELEIDINGSCOEFFICIENT (0-100°C)(W/M K)	170	44-52
LINIEARE UITZETTING (0-100°C) (*10 ⁻⁶ /°C)	23.5	12
ELEKTRISCHE WEERSTAND BIJ 20 °C (*10 ⁻⁶ Ω CM)	3.32	17
MASSADICHTHEID (g/cm ³)	2.7	7.8
REFLECTIECOEFFICIENT/REFLECTIEVERMOGEN (%)	55-90	40-60
EMISSIVITEIT/WARMTESTRALING	0.09 (platen)	0.8 verweerd

De meeste aluminiumlegeringen verliezen al bij 200°C ongeveer 50% van hun draagvermogen bij kamertemperatuur. Ook al verliest aluminium sneller zijn sterkte tijdens brand ten opzichte van staal kunnen de andere eigenschappen van aluminium wel als een voordeel werken bij brand. Door de hoge reflectiecoëfficiënt zal aluminium minder warmte opnemen dan staal. De warmte die wel opgenomen wordt zal door de hoge warmtegeleidingscoëfficiënt sneller verspreid worden, weg van de warmtebron zelf. Eveneens is de emissie van aluminium veel lager dan bij staal. Dit wil zeggen minder warmtestraling en dus zal aluminium minder snel de omgeving opwarmen. Aluminium structuren hebben dus een betere thermische efficiëntie dan stalen structuren. Door temperatuurschommelingen is het uitzetten van aluminium twee maal zo groot als dat van staal. Omwille van een lage elasticiteitsmodulus zijn de temperatuurspanningen in een aluminiumconstructie slechts twee derde van die van staal.

Voor de berekening van brandveilige staal constructies zijn vele studies beschikbaar. Echter voor aluminiumconstructies zijn de regels van staal gekopieerd en blijken deze in werkelijkheid

onvoldoende te zijn. Door de grotere kwetsbaarheid bij brand zijn er meer verfijnde modellen vereist om het mechanisch gedrag van aluminium te analyseren [15].

Echter een belangrijk verschil tussen staal en aluminium is de spanningsrek kromme (figuur 29) [15]. Het resultaat verschilt per type legering van aluminium [15]. Zo is per legeringstype een verschil te merken op vlak van grenssterkte, rekbaarheid en vorm van de spanningsrek kromme. Ten gevolge van de chemische samenstelling en het mogelijke type van de toegepaste warmtebehandeling [15]. Ook zijn de mechanische eigenschappen van aluminium bij hoge temperaturen complex en moeilijk te generaliseren [15]. In grote lijnen kan er een verschil opgemerkt worden tussen aluminium en staal [15]. Zo is het spanning-rekdiagram bij aluminium niet lineair en er vindt ook geen vloeispanning plaats [15].



Figuur 29 Vergelijking van de spannings-rek diagrammen van staal en aluminium [39]

2.6.2 Actieve en passieve brandbescherming

2.6.2.1 Actieve brandbescherming

Actieve brandbeveiliging is het proces van het beschermen van een gebouw tegen brand [14]. Deze systemen kunnen automatisch zijn of handmatig werken, maar ze vereisen een activering bij brand [14].

Een paar voorbeelden van actieve brandbeveiliging zijn een sprinklerinstallatie of brandmeldsysteem [14]. Deze systemen zijn een uiterst belangrijk onderdeel bij het beschermen van eigendommen en het redden van levens [14]. Actieve brandbeveiliging is van vitaal belang om levens te beschermen en een snelle reactie te garanderen via automatische of menselijke tussenkomst [14].

2.6.2.2 Passieve brandbescherming

Passieve brandbeveiliging is een cruciaal element voor elk gebouw [14]. Het speelt een preventieve rol en het vertegenwoordigt alle constructiemethoden waardoor een constructie gedurende een bepaalde tijd brand kan weerstaan [14]. (Dit wordt bepaald door de regelgeving met betrekking tot specifieke soorten gebouwen) en omvat:

- Het verspreiden van rook en gassen voorkomen;
- Het verspreiden van vuur voorkomen;
- Temperatuur in het getroffen gebied onder controle houden;
- Stabiliteit van structurele elementen handhaven.

Deze methoden staan bekend als "passief" omdat ze werken zonder menselijke tussenkomst of externe energiebron [14]. Ze zijn bedoeld om de evacuatie van mensen en de interventie van hulpdiensten mogelijk te maken, waarbij brand zo lang mogelijk in een gecompartmenteerde ruimte wordt beperkt [14].

Voor staalconstructies is dit verdeelt in twee grote groepen:

- Bescherming van de staalconstructie: opschuimende coatings, echter zouden deze niet altijd toepasbaar zijn op aluminium;
- Brandwerende afdichtingen: schuimen, kitten en andere afdichtingsoplossingen.

Voor aluminium zijn er ook enkele toepassingen voor dit soort brandbescherming die al worden toegepast in de scheepsbouw, hier wordt wel enkel gewerkt met opties die het aluminium niet in gewicht doen verzwaren, omdat anders een van de belangrijkste eigenschappen terug teniet wordt gedaan [17]. Mogelijke materialen hiervoor zijn:

- Zacht materiaal:
Hiermee wordt vooral isolatiemateriaal bedoeld zoals minerale wol. Deze wol biedt een goede weerstand tegen brand, rotswol tot 800 °C en keramische wol tot 1200°C. Ze voegen geen extra gewicht toe en zijn flexibel in plaatsing en vormgeving;
- Opzwellende verfsystemen:
Ook voor aluminium kunnen er opzwellende verven gebruikt worden. Bij temperaturen rond de 200 a 250 °C zwellen deze verven op en vormen ze een goede isolerende laag. Deze isolerende laag bestaat uit slecht geleidende koolstof;
- Bekleding:
Men kan de aluminium structuur ook omkleden met een brandwerend materiaal zoals calciumsilicaatplaten of brandwerende gipskarton platen.

Veel vraagstukken in verband met het structureel gedrag van aan brand blootgesteld aluminium moeten nog worden opgelost om de ontwerper in staat te stellen nauwkeurige procedures toe te passen voor een veilige beoordeling van aluminiumelementen en -constructies. Dit heeft betrekking op zowel het gebruik van meer realistische materiaalmodellering voor de constructieberekening en de werkelijke reactie van aluminium bij verhoogde temperaturen. Tot op heden werden slechts een paar studies uitgevoerd op een aan brand blootgestelde aluminiumconstructie en er is helemaal geen ervaring geweest met aluminiumconstructies in echte branden [15]. De hoeveelheid berekeningsmodellen die in de Eurocode voor het brandontwerp van aluminiumconstructies, EN 1999-1-2, is daarom beperkt en vele berekeningsmodellen zijn niet gecontroleerd met experimentele gegevens. Voor enkele belangrijke falingsmechanismen, zoals het falen van verbindingen en lokale knik, zijn geen rekenmodellen in de code opgenomen [15]. De Eurocode stelt twee hoofdtaken vast met betrekking tot het brandontwerp van aluminiumlegeringen constructies.

De eerste taak is de specificatie van de beoordelingsmethode voor brandwerende materialen. Tot heden is er geen specifieke methode in de EN 13381 om met brandwerende materialen om te gaan. Daarom zou verder onderzoek moeten worden verricht bij toepassing op aluminium constructieve constructiedelen.

De tweede taak is de algemene validatie van de eenvoudige berekeningsmethode van EN 1999-1-2 die voornamelijk voor staalconstructies zijn ontwikkeld. Slechts een klein aantal van deze berekeningsmethodes zijn gevalideerd aan de hand van brandwerendheidstestresultaten die zijn uitgevoerd op constructies met aluminiumlegeringen.

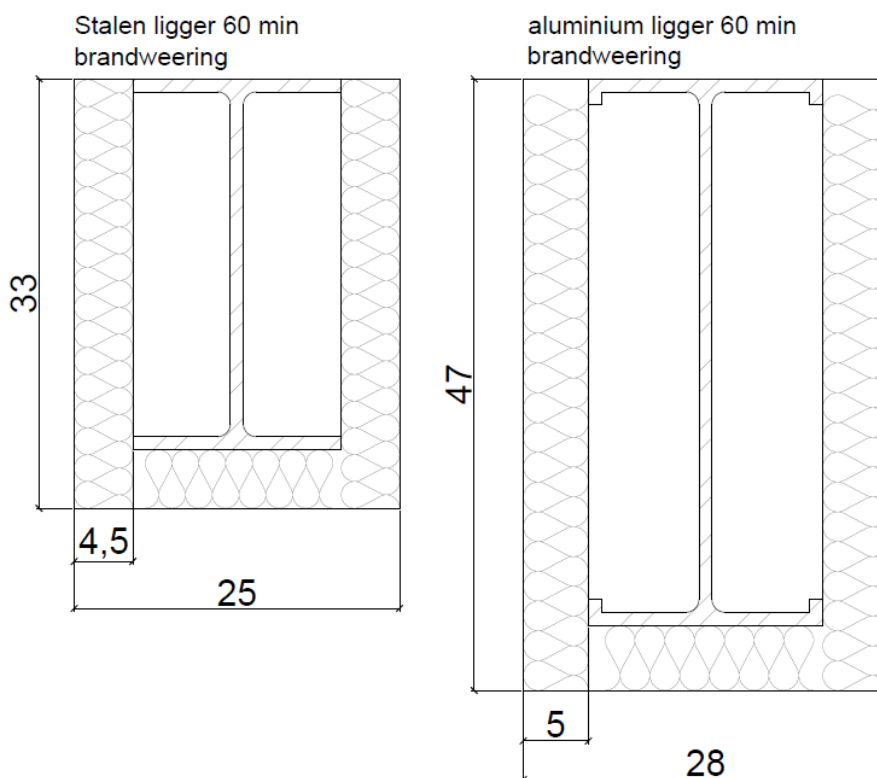
De huidige hoge prioriteit ligt dus bij de validatie die moet worden uitgevoerd tussen de gehele reeks berekeningsmethoden en testen op echte constructies [15].

2.6.2.3 Passieve brandbescherming staal vs. aluminium

Om een vergelijking te maken van de verschillende brandwerende mogelijkheden en hun toepassing bij staal en aluminium moeten enkele zaken mee in rekening gebracht worden [17].

Staal is zwaarder dan aluminium en heeft een betere brandweerstand [17]. Bij aluminium, dat lichter is, moet dus meer brandbescherming voorzien worden dan bij staal [17]. Hierdoor is de toevoeging van gewicht ook groter. Om dit perspectief beter in kaart te brengen wordt er een vergelijking gemaakt door een staal profiel en aluminium profiel beide te voorzien van een brandwerende bescherming [17].

Een stalen I profiel en een aluminium I profiel worden vergeleken in figuur 30 [17]. Beide hebben eenzelfde draagcapaciteit en een zelfde brandweerstand [17]. De twee profielen worden per lopende meter gecontroleerd op hun eigengewicht [17]. Voor het staalprofiel is dit een massa van 50 kg en voor het aluminium profiel een massa van 20 kg [17]. Om een brandweerstand van R 60 te bekomen moet het staalprofiel bekleed worden met een rotswolisolatie van 45 mm dik met een massadichtheid van 64 kg/m^3 , dit komt neer op een extra $2,88 \text{ kg/m}^2$ [17]. Voor het aluminium komt er een rotswolisolatie van 50 mm dik met een massadichtheid van 70 kg/m^3 , dit zorgt voor een extra van $3,5 \text{ kg/m}^2$ [17]. De correcte toepassing van de dwarsdoorsneden van het aluminium profiel is bekomen door Ir. Cyriel Clauwaert.



Figuur 30 Links: Staalprofiel met brandweerstand 60 min. Rechts: Aluminium profiel met brandweerstand 60 min [17]

Bij het staalprofiel zal er een extra gewicht van 2,6 kilo bijkomen per lopende meter en bij de aluminium constructie een extra van 4,3 kilo de lopende meter [17]. Totaal brengt dit de aluminium constructie op 24,3 kilo de lopende meter en de staalconstructie op 52,6 kilo de lopende meter [17]. Dus ondanks het extra gewicht door de betere brandwerende isolatie, blijft het verschil in gewicht voordeliger voor aluminium [17].

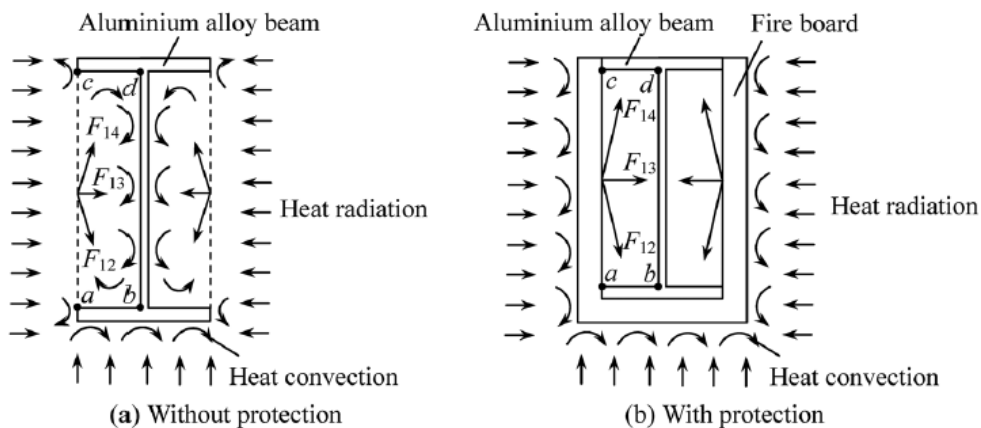
In een voorgaand onderzoek van Y.Q. Zheng en Z.Zhang is er een test gedaan met een aluminium I-profiel van het legeringstype 5xxx met als afmetingen een breedte van 200 mm een hoogte van 400

mm, een flensdikte van 20mm, en een lijfdikte van 12mm. Beide profielen zijn identiek, enkel is een profiel voorzien van een omkasting uit calcium silicaat panelen (figuur 31) [3]. Deze panelen hebben een dikte van 40 mm. In het onderzoek van Y.Q.Zheng en Z.Zhang veronderstellen ze dat calcium silicaat met een dichtheid van ρ_p tussen 500 en 1000 kg/m^3 , een thermische geleidbaarheid van $\lambda_p =$ tussen 0.1 en $0.25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ en een specifieke warmte van $c_p = 1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ heeft. Voor het onderzoek hebben ze volgende eigenschappen gebruikt: $\rho_p = 500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_p = 0.125 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ en $c_p = 1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ [3]. Ook kunnen deze platen een vochtpercentage tussen de 3% en 5% hebben. Eveneens is er gewerkt met een vochtpercentage van 4% [3].

$$\begin{cases} \rho'_p c'_p = \rho_p (c_p + p * c_w) & 25^\circ\text{C} \leq \theta_{al} \leq 90^\circ\text{C} \\ \rho'_p c'_p = \rho_p \left\{ c_p + p \left[(1 - \xi_w) c_w + \frac{d\xi_w}{d\theta_{al}} \Delta H_w \right] \right\} & 90^\circ\text{C} \leq \theta_{al} \leq 120^\circ\text{C} \end{cases}$$

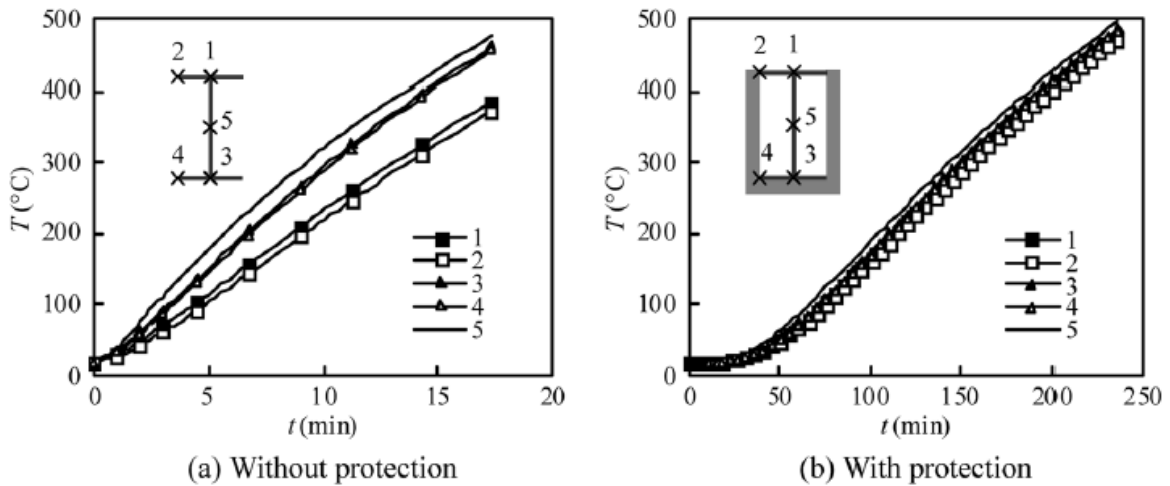
Waarin:

- ρ_p = dichtheid in kg/m^3
- c_p = specifieke warmte in $\text{J/kg}^\circ\text{C}$
- ρ'_p = dichtheid met vocht in kg/m^3
- c'_p = specifieke warmte met vocht in $\text{J/kg}^\circ\text{C}$
- P = vocht inhoud
- c_w = specifieke warmte van water = $4190 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
- ΔH_w = verdampingswarmte van water = 2.27 MJ/kg
- ξ_w = voortgangsvaariabele variabele voor de verdamping van water



Figuur 31 Aluminium profielen 5xxx onderhevig aan brandtest volgens Y.Q. Zheng en Z. Zhang [3]

Deze resultaten werden in een grafiek weergegeven, let wel op dat de x-as die het tijdsverloop presenteert een verschillende schaal heeft [3]. Het profiel is opgedeeld in verschillende punten. Op figuur 32 kan er ook opgemerkt worden dat de temperatuur het hoogste wordt op punt 5, dit is het midden van het lijf [3]. Na 17 minuten stijgt de temperatuur in punt 5 naar 14°C voor het beschermde profiel en naar 89°C voor het onbeschermde profiel [3]. Daarmee is dit hoger dan punten 1 en 3, ook is de temperatuur in het midden van de flenzen lichtjes hoger dan aan de buitenkanten [3]. Punten 1 en 4 blijven goed beschermd, zo verschillen deze na 180 minuten maar 5,3% met het center punt [3].

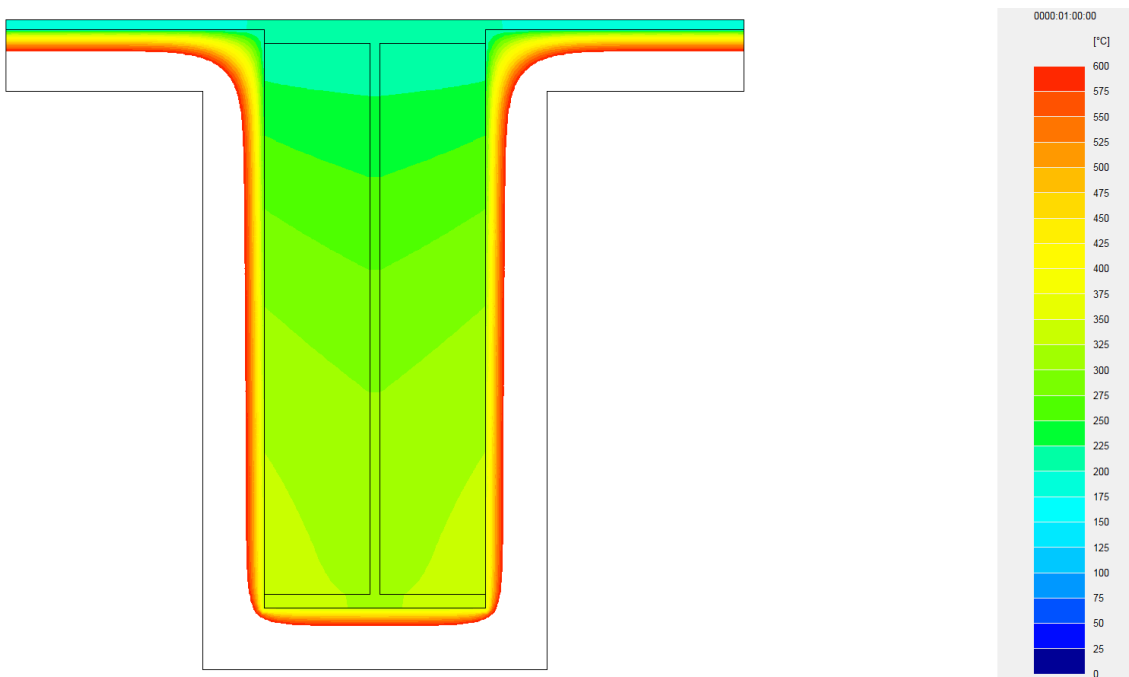


Figuur 32 Resultaten proef Y.Q.Zheng en Z.Zhang [3]

2.6.2.4 *Verschillende soorten passieve brandbescherming bij aluminium, enkele voorbeelden uit de offshore constructies*

Je kan een aluminium structuur op verschillende manieren beschermen, hieronder een voorbeeld van twee methodes. Bij een methode wordt de constructie ingepakt met een aluminium deken. Bij de andere methode wordt er een hardboard omkasting rond de constructie gebouwd [17].

Een van de voorbeelden is wanneer het aluminium profiel ingepakt is met een brandwerende zachte isolatie. Deze zal als bescherming dienen om de warmte die is opgewekt door het vuur te verhinderen om tot het aluminium profiel te komen en deze te verwarmen. In het voorbeeld hieronder is gebruik gemaakt van FireMaster Marine Plus blanket 50mm voor de doorsnede behandeld in 1.6.2.3 passieve brandbescherming staal vs. Aluminium [17]. Na een uur heeft het aluminium een temperatuur van 350° Celsius bereikt (figuur 33). De berekening is gemaakt door Ir. Cyriel Clauwaert via het programma Bistra.



Figuur 33 FireMaster Marine Plus blanket in simulatie via Ir Cyriel Clauwaert

Een ander voorbeeld is de aluminium structuur te beschermen door het aanbrengen van een brandwerende omkasting [17]. Deze omkasting moet alzijdig worden uitgevoerd. Deze omkasting kan bestaan uit een calcium silicaat board. De brandweerstand kan bereikt worden door het toepassen van meerdere lagen [17].

2.6.2.5 Conclusie passieve brandbestrijding aluminium

Vooraf de lage dichtheid, het lage smeltpunt en de hoge thermische geleidbaarheid zorgen ervoor dat aluminium constructies brandgevoelig zijn [15]. De meeste thermische eigenschappen van aluminiumlegeringen zijn goed bekend, maar de meeste mechanische eigenschappen worden bepaald in testen met een constante toestand [15].

Testen waarbij de temperatuur tijdens de test stijgt tot de kritische temperatuur wordt bereikt, en de belasting wordt uitgeoefend vanaf het begin van de verhitting, geven een betere benadering van het werkelijke gedrag van aan brand blootgestelde materialen [15].

De EN 1999-1-2 geeft een beperkt aantal berekeningsmodellen waarvan de meeste niet zijn gecontroleerd door middel van experimenten [15]. Soms worden voor sommige belangrijke bezwijkmechanismen (zoals bezwijken van verbindingen, lokale knik) in de code helemaal geen berekeningsmodellen verstrekt [15]. Wegens de gevoeligheid van aluminium voor brandomstandigheden is vaak een realistische benadering van het effectieve gedrag noodzakelijk [15]. Bovendien vereisen de ontwerpbepalingen voor brandwerendheid enkele bijkomende verbeteringen, met inbegrip van de identificatie van geschikte actieve beschermingssystemen (b.v. sprinklers), die het globale gedrag van vele belangrijke structuren (b.v. grote spanwijdte daken, beglazingssystemen, enz.) kunnen verbeteren [15]. Tenslotte zou een bijgewerkte code de bestraffing van aluminium in concurrentie met andere constructiematerialen moeten verminderen [15].

2.7 Basisnormen brandveiligheid

Een publicatie van Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB) stelt dat naar aanleiding van de recente rampen in het buitenland de brandveiligheidswet dient aangepast te worden [40]. Alle informatie uit dit hoofdstuk komt uit deze publicatie van het WTCB of het Koninklijk Besluit basisnormen mits anders vermeld [41].

Het koninklijk besluit “basisnormen brandveiligheid” is gepubliceerd op 30 juli 1979. Dit besluit moet de burgers beter beschermen tegen brand en ontploffingen en de verplichte burgerlijke aansprakelijkheidsverzekering. Deze staan vermeld onder de “basisnormen brandpreventie”.

Het heeft dan wel de naam “norm” maar wordt in België gehanteerd als een wet en is dus bindend en opgenomen in een Koninklijk Besluit (KB). Deze basisnormen zijn vooral van toepassing op nieuwe gebouwen, niet zo zeer renovaties. Het basisreglement bepaalt de minimumvoorwaarde waaraan het ontwerp, de inrichting en het gebouw zelf aan moeten voldoen om het ontstaan, de ontwikkeling en de uitbreiding van een brand te voorkomen. Ook moet de veiligheid van personen verzekerd worden en de tussenkomst van de brandweer vergemakkelijkt. Ook de strengere eisen voor zalen, winkel- of handelscomplex en collectieve keukens wordt besproken.

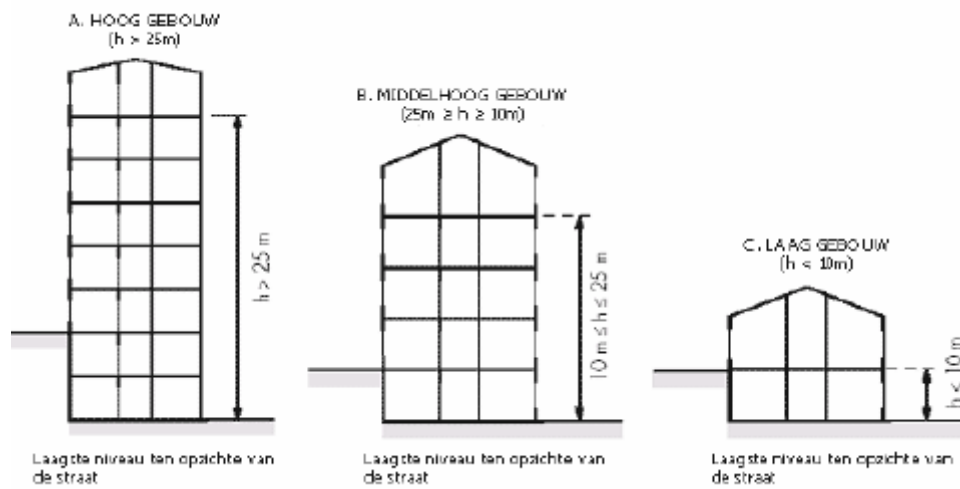
In het KB worden ook de regels omtrent compartimenteringen en evacuatie besproken. Ook de bezettingsgraad van een gebouw bepaald mee de eisen. Zo worden er meerdere uitgangen verwacht indien de bezetting meer dan 100 personen bedraagt. Ook worden er strikte eisen gesteld omtrent doorvoeringen door wanden, valse plafonds en de nodige breedte en maximale lengte voor

vluchtwegen zoals trappenhallen. De nodige aanwezige brandbestrijdingsmiddelen komen eveneens aan bod. De basisnorm behandelt ook de inplanting en toegangswegen. De graad van zelfredzaamheid speelt ook een rol. Zo is er een onderverdeling in 3 types:

- Type 1: niet zelfredzaam (ziekenhuis, rusthuis, gevangenis, ...)
- Type 2: zelfredzaam en slapend (hotel, appartement, ...)
- Type 3: zelfredzaam en wakend (kantoorgebouwen, magazijn, school, sporthal, ...)

De hoogte van het gebouw en de gebruikslast van het gebouwen bepalen mee welke regels er gehanteerd moeten worden. In deze basisnorm wordt een onderscheid gemaakt tussen verschillende types gebouwen, namelijk (figuur 34):

- Lage gebouwen: met een hoogte kleiner dan 10m
- Middelhoge gebouwen: met een hoogte tussen 10 en 25 meter
- Hoge gebouwen: met een hoogte groter dan 25 meter



Figuur 34 Onderscheidt gebouwen van WTCB en de basisnormen brandveiligheid

Dit onderscheid in hoogte bepaalt mee de richtlijnen voor evacuatie en dus de vereiste REI waarde (vroeger Rf). Dit is van veel verschillende aspecten afhankelijk. In het koninklijk besluit van 7 juli 1994 wordt dit uitgebreid besproken.

2.7.1 Laagbouw

De structurele elementen beschikken, in functie van hun situatie, over een brandweerstand zoals weergegeven in tabel 8, waarin Ei het laagst gelegen evacuatiενiveau voorstelt.

In grote lijnen geldt voor laagbouw van slechts een verdieping een REI30, dit wil dus zeggen dat de structuur het 30 minuten moet volhouden bij een brand. Voor laagbouw met meer dan een bouwlaag geldt een REI60. Eengezinswoningen of gebouwen met maximaal 2 verdiepingen en een kleinere oppervlakte hebben dan 100 m² zijn vrijgesteld van de basisnorm.

Tabel 8 Waarden voor de vereiste brandreactie volgens KB basisnorm, laagbouw

	Structurele elementen van het dak	Overige structurele elementen	Wanden (tussen compartimenten)
Boven Ei			
Eén bouwlaag	R 30	R 30	EI 30
Meerdere bouwlagen	R 30	R 60	EI 60

Onder Ei met inbegrip van de vloer van Ei	Niet van toepassing	R 60	EI 60
---	---------------------	------	-------

De structurele elementen voor laagbouw hebben:

1. $R_f \frac{1}{2} h$ voor gebouwen met één bouwlaag. Dit voorschrift is echter niet van toepassing voor het dak indien het aan de binnenkant beschermd is door middel van een bouwelement met $R_f \frac{1}{2} h$;
2. Voor gebouwen met meer dan één bouwlaag : $R_f 1 h$ boven het niveau Ei. De structuur van het dak heeft een stabiliteit bij brand van $\frac{1}{2} h$. Dit voorschrift is niet van toepassing indien het dak aan de binnenkant beschermd is door een bouwelement met $R_f \frac{1}{2} h$;
3. De structurele elementen in de kelderverdiepingen, met inbegrip van de vloer van het niveau Ei hebben $R_f 1 h$.

2.7.2 Middelhoge gebouwen

Bij middelhoogbouw, wat in België het meeste voorkomt in de steden, is een REI60 vereist. Er wordt ook een reeks aan maatregelen opgelegd om verspreiding langs de gevel te verhinderen. Ook moeten gevelonderdelen onbrandbaar zijn. Waardes worden gegeven in tabel 9.

Tabel 9 Waarden voor de vereiste brandreactie volgens KB basisnormen, middelhoge bouw

	Structurele elementen	Wanden (tussen compartimenten)
Boven Ei	R 60	EI 60 (deuren EI 30)
Onder Ei met inbegrip van de vloer van Ei	R 120	EI 60

2.7.3 Hoge gebouwen

Voor hoogbouw, wat eerder zeldzaam is in België, wordt een REI van 120 tot 240 verwacht. Dit wil zeggen dat de constructie tot 2 uur weerstand moet kunnen bieden aan een brand. Ook moeten gevelonderdelen onbrandbaar zijn.

2.7.4 Industriegebouwen

Voor industriegebouwen wordt gewerkt met een gebouwklasse:

- Klasse A $q_{f,cl} \leq 350 \text{ MJ/m}^2$
- Klasse B $350 \text{ MJ/m}^2 < q_{f,cl} \leq 900 \text{ MJ/m}^2$
- Klasse C $900 \text{ MJ/m}^2 < q_{f,cl}$

Als een industriegebouw uit meerdere compartimenten bestaat, kan voor ieder compartiment afzonderlijk de overeenstemmende maatgevende brandbelasting of klasse worden bepaald en blijven de bijhorende voorschriften beperkt tot het desbetreffende compartiment. De benodigde R waardes worden gegeven in tabel 10. De benodigde EI waardes worden gegeven in tabel 11.

Tabel 10 Toelaatbare oppervlakte in m² voor industriegebouwen met slechts een bouwlaag of voor de compartimenten daarvan

Brandweerstand structurele elementen				
Klasse gebouw	Zonder sprinklers		Met sprinklers	
	Geen R bepaald	R 30 of meer	Geen R bepaald	R 30 of meer
A	25 000	25 000	150 000	150 000
B	5 000 (*)	10 000	40 000	60 000
C	2 000 (*)	5 000	7 000 (*)	30 000
Opslagplaats klasse C	5 000 (*)	5 000 (*)	12 500 (*)	30 000

Tabel 11 Minimale brandweerstand van de compartimentwanden

Klasse gebouw	Minimale brandweerstand compartimentwanden
A	EI 60
B of C	EI 120

2.8 Methoden om de brandweerstand te verbeteren

In elk gebouw worden maatregelen voor brandveiligheid genomen. Zo zullen er brandmelders, blusdekens en vrijgehouden vluchtwegen voorzien zijn. Naast deze actieve brandpreventie zijn er nog andere zaken die men in het oog kan houden. Het toepassen van branddeuren kan een gebouw veel veiliger maken en geeft mensen de mogelijkheid op een veilige manier het gebouw te kunnen verlaten. Bij de toepassing van branddeuren zijn er enkele aandachtspunten:

- Zorgen dat de deur en het kader voldoende brandweerstand bieden door middel van testen;
- Zorg dat de deur en frame dikte volgens de richtlijnen van de fabrikant zijn uitgevoerd;
- Zorg dat de deur zelfsluitend is;
- Indien een deur correct geplaatst is mogen er geen latere aanpassingen aan gebeuren.

De meeste gebouwen beschikken vaak ook over grote glaspartijen, deze kunnen bij brand ook zorgen voor een uitslaande brand en voor brandoverslag naar bovenliggende verdiepingen. Daarom is het belangrijk om ook glas brandwerend uit te voeren:

- Brandwerend glas moet voorzien zijn van een stempel met de gegevens van de fabrikant;
- Het brandwerend glas moet compatibel zijn met het constructie element waar het in staat. Een raam/gevel profiel moet dus voorzien zijn op het brandwerend glas om een goede werking te bekomen;
- Brandwerende beglazing nooit bewerken.

Het grootste gedeelte van een gebouw bestaat uit wanden, deze zijn samengesteld uit plaatmateriaal en isolatie. Vaak is hier een draagstructuur bij voorzien. Deze draagstructuur kan met aluminium worden uitgevoerd. Daarom is het belangrijk dat de brandwerende schil (zoals een brandwerende gipskartonplaat) voldoende bescherming biedt aan de achterliggende structuur. Indien er leidingen door deze schil gaan dient dit brandwerend afgedicht te worden.

De praktijk wijst uit dat bouwproducten vaak fout worden gebruikt als gevolg van foutieve detaillering en ondeskundige montage. Zorg ervoor dat de aansluitingen met wanden, plafonds en vloeren goed

afgewerkt zijn met de juiste brandveilige materialen. Bij brand kunnen juist op deze aansluitingen eenvoudig lekken ontstaan die 'verborgen' materialen tot ontbranding kunnen doen brengen. Plaats voldoende bevestigingsmiddelen (schroeven, pluggen, lijm, kit) en plaats deze onderling niet verder dan de op voorgeschreven afstand uit elkaar. Bij brand gaan materialen vervormen. Door gebruik van voldoende bevestigingen wordt de vervorming beperkt.

2.8.1 Brandwerende verven en coatings

Een muur of plafond, stalen frame of een vloer kan voorzien worden van een brandwerende verf of coating. Deze laag schuimt op wanneer het een bepaalde temperatuur bereikt. De schuimlaag die ontstaat dient als een thermische isolatie om de onderliggende structuur te beschermen tegen de oplopende temperaturen. Aandachtspunten zijn:

- Laat brandwerende verf en coatings altijd aanbrengen door de fabrikant zelf of door experts;
- Controleer of de verfsystemen intact zijn en nergens scheuren vertonen;
- Bij schade dient deze zorgvuldig weggewerkt te worden.

2.8.2 Brandwerende doorvoeren

Vaak bestaan grote gebouwen uit meerdere brandcompartimenten. Deze compartimenten worden afgebakend met brandscheidingsconstructies die intact moeten blijven. Indien er openingen moeten voorzien worden voor doorvoeren, moeten deze achteraf terug brandwerend worden afgedicht. Hiervoor dienen ook steeds de juiste producten gebruikt te worden.

2.8.3 Manieren om aluminium te beschermen voor brand

Ook zijn er voor aluminium constructies verschillende toepassingen om de brandwerendheid te verbeteren:

- Aanbrengen van een brandwerende omkasting: dit kan door middel van gipsvezelplaten, brandwerende isolatiedekens, of beton storten rondom het profiel;
- Aanbrengen van een brandwerende coating: verf of spuitmortel;
- Aluminium buizen met water vullen;
- Over dimensioneren van de constructie (verbeteren van de verhouding massa/oppervlakte) is een optie maar zal leiden tot groter eigengewicht.

Belangrijk is dat de gebruikte materialen een vlamdichtheid hebben en geen bijdragen leveren aan de brand zelf. Ze mogen dus niet brandbaar of vlam doorlatend zijn. Eveneens is het belangrijk dat het isolatiemateriaal zelf niet kan smelten. Hiervoor hanteert men een brand-, rook- en druppelklasse [42].

De brandklassen worden gebaseerd op de Europese brandvoortplantingsklassen NEN-EN 13501-1, onderdeel 'Classification criteria for construction products' [42]. Deze klassen lopen van A1 tot F en bespreken de reactie van het materiaal bij brand zoals vermeld in tabel 12.

Tabel 12 Brandklassen [42]

Klasse	Omschrijving	Voorbeeld
A1	Materialen in deze klasse dragen niet bij in elk stadium van de brand, ook niet bij een volledig ontwikkelde brand.	Calciumsilicaat beplating, steenachtige materialen zoals gips, baksteen en beton, keramische materialen zoals dakpannen, natuursteen, steenwol.
A	Materialen in deze klasse dragen bij een volledig ontwikkelde brand niet bij aan de vuurlast en de branduitbreiding. Praktisch onbrandbaar.	Gipskartonbeplating.
B	Moeilijk brandbare materialen, die een beperkte bijdrage leveren aan brandgevaar.	PVC vloerbedekking, sommige textiele vloerbedekking, geverfde gipsplaat, brandvertragend MDF, cementgebonden spaanplaat
C	Materialen in deze klasse vertonen een beperkte zijdelingse vlamuitbreiding wanneer ze blootstaan aan de hitte van vlammen ('single burning item'). Brandbare materialen, die een bijdrage leveren aan brandgevaar.	Zwaardere houtsoorten, gipsplaat met behang.
D	Materialen in deze klasse bieden langer weerstand tegen een klein vlamcontact zonder dat daarbij substantiële vlamuitbreiding plaatsvindt. Daarbij zijn ze ook in staat blootstelling aan de hitte van vlammen te doorstaan met voldoende vertraagde en beperkte warmte afgifte. Goed brandbare materialen, die een grote bijdrage leveren aan brandgevaar.	De meeste houtsoorten, onbehandeld multiplex, MDF, OSB, spaanplaat.
E	Materialen in deze klasse leveren een zeer hoge bijdrage aan de brand. De materialen zijn voor een korte periode bestand tegen brand zonder wezenlijke vlamuitbreiding. Zeer goed brandbare materialen, die een zeer grote bijdrage leveren aan brandgevaar.	Kunststof, brandvertragend EPS.
F	Materialen waarvoor geen reactie op brandvoorplantingseisen worden bepaald. Uiterst brandbare materialen.	Niet geteste materialen, EPS.

Eenzelfde tabel bestaat voor de rookklassen van een materiaal, zoals vermeld in tabel 13. De ontwikkeling van rook dient zoveel mogelijk beperkt te blijven om een veilige evacuatie te kunnen voorzien en om ervoor te zorgen dat hulpdiensten hun werk veilig kunnen uitvoeren. Ook op vlak van milieu dient de ontwikkeling van rook, vooral wanneer deze schadelijke stoffen kan bevatten, zoveel mogelijk beperkt te worden.

Tabel 13 Rookklassen [42]

Klasse	Omschrijving	Voorbeeld
S1	Geringe rookproductie.	Resolschuim (PF), steenwol, glaswol, gipskartonbeplating
S2	De totale rookafgifte en de toename van rookproductie zijn gelimiteerd.	Geïmpregneerd hout
S3	Geen begrenzing aan rookproductie vereist.	EPS, PUR

Alsook moet men rekening houden met de druppelvorming bij brand. Deze druppels kunnen gevaarlijk zijn voor mensen die onder de constructie doorlopen tijdens een evacuatie of voor de hulpverleners bij het uitvoeren van bluswerken. Hiervoor bestaat dus ook een druppelvormingsklassen die weergeeft of er vlammeende of gloeiende hete druppels kunnen ontstaan bij brand [42]. Dit wordt vermeld in tabel 14.

Tabel 14 Druppelvormingsklassen [42]

Klasse	Omschrijving	Voorbeeld
D0	Geen vlammeende druppels/ deeltjes	hout
D1	Geen vlammeende druppels / deeltjes langer dan 10 seconden	kunststof
D2	Geen begrenzing	polystyreen

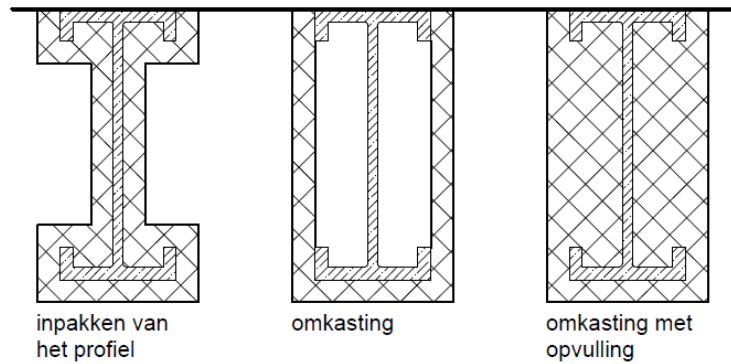
Bij de keuze van een geschikte brandwerende isolatie is het dus belangrijk dat men kijkt naar het brandgedrag van het materiaal. De meest geschikte materialen zullen dus een brandreactieklasse hebben van A1-S1,d0 of A2-S1,d0.

2.8.3.1 Omkasting

Het aluminium profiel kan voldoende bescherming krijgen doormiddel van een omkasting. Een omkasting zorgt ervoor dat het profiel thermisch beschermt is en er geen rechtstreeks contact is met de vlammen zelf of met de uitgestraalde warmte. Een omkasting kan op verschillende manieren zijn uitgevoerd afhankelijk van het gebruikte materiaal. Wanneer men kiest voor een omkasting bestaande uit gips of calcium silicaat platen zal er ook een structuur voorzien moeten worden waar dit materiaal aan bevestigd kan worden. In dit geval dient er dus een dragend skelet voorzien te worden rond het aluminium profiel. Wel zal de luchtlaag die hierdoor ontstaat in het voordeel werken van het beschermingsmateriaal. Zowel gips als calcium silicaat platen bestaan uit kristal gebonden water dat zal verdampen vanaf 100 °C. Door deze verdamping ontstaat er een soort thermisch plateau dat voor een bepaalde tijd, afhankelijk van de dikte van het gekozen beschermingsmateriaal, voor een constante temperatuur van 100 °C zal zorgen in deze luchtlaag. Hierdoor zal het langer duren voor het aluminium zijn kritieke temperatuur zal bereiken. Deze werking is bevestigd door Gyproc, een gipsplaat leverancier in België. Eveneens wordt hiernaar verwezen in de studie van Yong-Qian Zheng en Zheng Zhang [3].

2.8.3.2 Inpakken met isolatie

Het inpakken van een aluminium constructie met isolatie materiaal kan gebeuren op verschillende manieren. Een eerste methode is om de omtrek van het profiel te volgen. Deze methode zal voornamelijk gehanteerd worden voor flexibele isolatiematerialen zoals rotswol. Voor meer stijvere materialen kan gewerkt worden zoals een omkasting, dit zal vooral van toepassing zijn bij bijvoorbeeld cellenglas isolatie. Ook kan men er voor kiezen om met een flexibel isolatiemateriaal te werken en de ruimte tussen de flenzen op te vullen zoals afgebeeld in figuur 35.



Figuur 35 Verschillende methoden om het aluminium profiel met isolatie in te pakken

Ook hier kan met verschillende soorten isolatiemateriaal gewerkt worden. Zo heeft ieder materiaal weer zijn eigen werking. Zo zal rotwol versinteren bij verhoogde temperaturen, hierdoor stijgt de lambda waarde en eveneens de massadichtheid van het product. Deze versintering vormt een beschermende laag. Terwijl cellenglas juist zal smelten en meteen ook verglazen. Deze laag absorbeert warmte en vormt een beschermende laag.

2.8.3.3 Niet rechtstreekse bescherming

Wanneer het aluminium profiel geplaatst wordt in een zone die op zichzelf beschermt is tegen brand kan deze bescherming ook meewerken als bescherming voor het aluminium profiel zelf. Wanneer er dus een brandwerend verlaagd plafond geplaatst wordt beschermt deze ook meteen het aluminium profiel.

3 Simulaties

3.1 Voorbeeld van Hydro

Voor de simulaties baseert het onderzoek zich eerst op de studie van Hydro [17]. Hydro is een bedrijf dat zich specialiseert in het bouwen van schepen en andere offshore constructies. In deze “white paper” wordt er onderzoek gedaan naar de verschillende methodes om aluminium te beschermen. Deze paper baseert zich op de 2010 FTP code [17]. Dit is een code die testen van brandwerendheid verdeelt in twee categorieën. De reactie op vuur en de weerstand tegen vuur. Bij de reactie op vuur bekijkt men hoe het materiaal reageert als het in aanraking komt met vuur en of het een bijdragen levert aan de verspreiding van het vuur zelf. Aangezien aluminium onbrandbaar is zullen er geen testen van deze soort gebeuren. Wanneer men de weerstand tegen verhoogde temperaturen gaat bestuderen is gekend dat aluminium enkele nadelen heeft. Hier gaat het onderzoek verder op in.

In de paper van Hydro legt men de focus vooral op het beschermen van het aluminium met een passieve brandbescherming. In een voorbeeld vergelijken ze een staal profiel met een aluminium profiel. Er wordt gekeken naar de benodigde isolatie en de gewichtstoename van deze isolatie methoden. In een eerste voorbeeld isoleert men een stalen I profiel en een aluminium I vormig profiel. Beide constructies halen een REI 60 (figuur 36) [17]. Het stalen profiel heeft een gewicht van 50 kg de lopende meter en het aluminium profiel heeft een gewicht van 20 kg de lopende meter. Beide worden beschermt met een brandwerende isolatie [17]. Het stalenprofiel krijgt een deken van 45 mm dik en 64 kg/m^3 en het aluminium profiel van 50 mm dik en 70 kg/m^3 [17]. Volgens de studie van Hydro behaal je dus een 60% gewicht besparing op het aluminium profiel zonder isolatie en 54% inclusief isolatie [17].



Figuur 36 Links: Stalen I profiel REI 60; Rechts: Aluminium I-vormig profiel REI 60 [17]

Verder in de paper integreert men de boven flens van het profiel met het deck. Het stalen profiel krijgt een Firemaster Marine Blanket plus met een gewicht van 2.4 kg/m^2 en een dikte van 50 mm en het aluminium profiel krijgt een Firemaster Marine Plus blanket met een gewicht van 3.5 kg/m^2 en een dikte van 50 mm [17]. Zo kent het staalprofiel een gewichtstoename van 2,9 kg en het aluminium profiel kent een toename van 4,2 kg (figuur 37) [17]. Ook hier heeft het aluminium een voordeel met zijn gewicht. Zonder de brandwerende isolatie is dit een voordeel van 52% en met de brandwerende isolatie een voordeel van 46% [17].



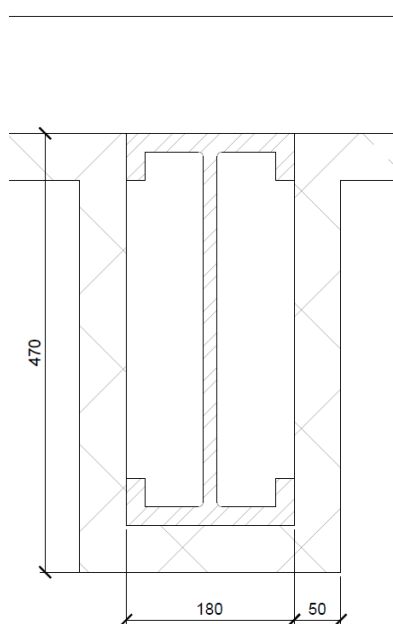
• Adds 2.9kg

• Adds 4.2kg

Figuur 37 Bescherming Stalen profiel en aluminium profiel met Firemaster Marine Blanket plus [17]

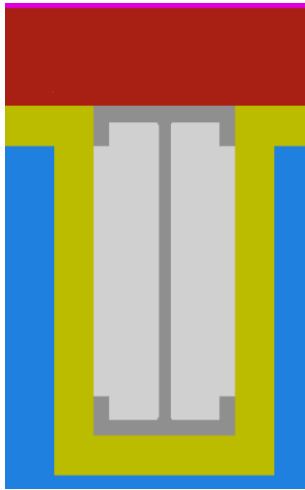
3.2 Methodiek simulaties

Om het resultaat van de studie van Hydro te controleren zal er gewerkt worden met verschillende software pakketten. Een eerste schets van de te controleren constructie wordt gemaakt via tekensoftware zoals Sketchup of Autocad. In de studie van Hydro zijn het aluminium profiel en stalen profiel beiden als een traditioneel I profiel getekend. Echter blijkt dit in de praktijk niet van toepassing bij aluminium I vormige profielen. Deze hebben namelijk verstijvers aan de flens zoals getoond in figuur 38. Deze zijn nodig om het profiel een zekere stijfheid te geven. Bij dit voorbeeld wordt een aluminium profiel onderzocht dat dient ter ondersteuning van een houten vloerplaat. Op deze aluminium plaat rust dus een reeks houten balken van 125mm dikte.



Figuur 38 I vormig aluminium profiel getekend in Autocad

Deze tekeningen worden opgeladen in Bisco. Dit is een programma van Physibel waarmee thermische eigenschappen van materialen gedefinieerd kunnen worden en er een controle kan uitgevoerd worden op U-waardes en koudebruggen. Voor dit onderzoek is dit ook belangrijk om een beeld te krijgen van bescherming van het profiel. Het Bisco model geeft een visuele controle op de constructie qua thermische doorlatendheid. De tekening wordt ingeladen en de vlakken worden geïdentificeerd. Op figuur 39 is te zien dat het profiel ingekleurd wordt. Op figuur 40 en 41 is te zien hoe de vlakken hun eigenschappen krijgen. Hier is het nog niet belangrijk dat de isolatie een exacte waarde heeft zoals vermeld op de technische fiches, dit dient enkel als visuele controle. Belangrijk is dat er een controle wordt uitgevoerd op de ingeladen tekening en dat er geen onverwachte aanpassingen gebeuren aan de schaal.



Figuur 39 Aluminium profiel in Bisco

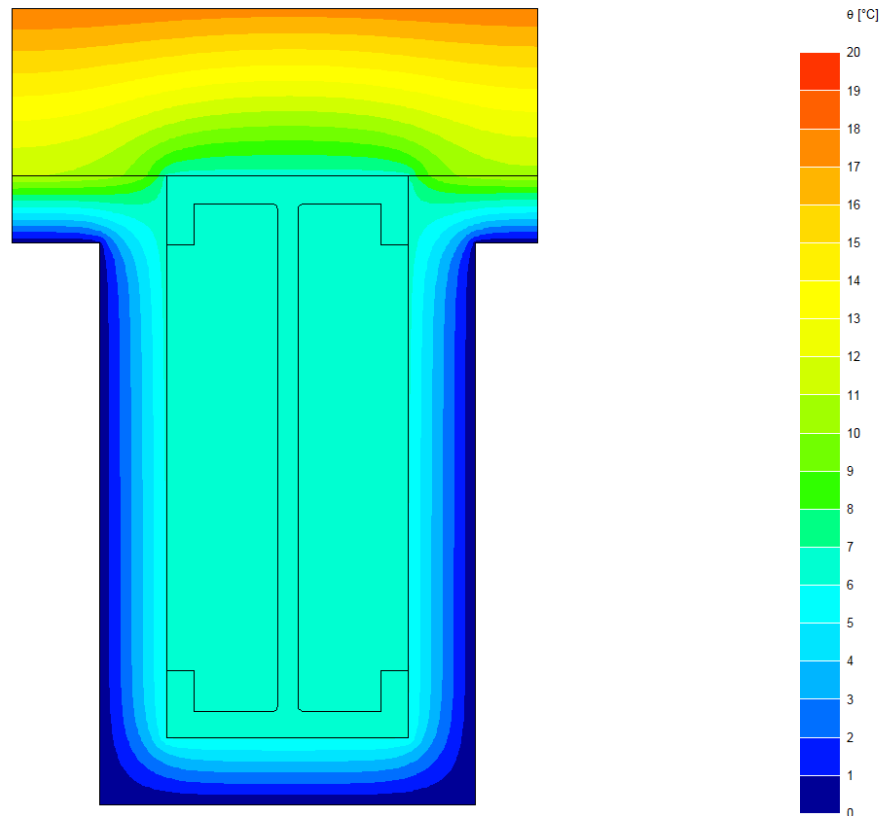
Col.	Width [pix.]	Width [m]	Height [pix.]	Height [m]	Area [pix.]	Zones	Triang. [pix.]
	1	0.0010	1	0.0010			
All	393	0.3930	623	0.6230			5.00
8	180	0.1800	420	0.4200	15479		5.00
12	393	0.3930	125	0.1250	49125		5.00
151	393	0.3930	470	0.4700	61650		5.00
166	393	0.3930	8	0.0080	3144		
170	393	0.3930	440	0.4400	55320		
224	180	0.1800	379	0.3790	60121		5.00

Figuur 40 Controle op afmetingen in Bisco

Col.	Type	Subtype	Physical flow dir.	Geometrical flow dir.	Name	ϵ_1 / ϵ_2 [- / -]	λ [W/mK]	ϵ [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]	θ_a [°C]	hc [W/m²K]	P_c [W/m]	θ_r [°C]	Standard
8	MATERIAL				aluminium		160.000									
12	MATERIAL				hardwood		0.180									
151	MATERIAL				insulation 0.035 W/mK		0.035									
166	BC_SIMPL	HI	DOWN		indoors downwards heat flow				20.0	5.90	0					EN6946
170	BC_SIMPL	HE	HOR		exterior				0.0	25.00	0					EN10077
224	EQUIMAT	CAVITY_E	HOR	X	cavity slightly vent physical horizon	0.90 / 0.90	1.693									EN10077

Figuur 41 Definieren van de vlakken in Bisco

Bisco berekent de thermische doorlatendheid zoals te zien in figuur 42. Zo stelt het resultaat vast dat de warmte voornamelijk wordt doorgegeven via het aluminium profiel, wat correct is. Zo is een thermische versterking vast te stellen in de houten balken laag boven het profiel. Ook zijn er geen thermische lekken te zien.



Figuur 42 Resultaat Bisco berekening

Vervolgens wordt het BISCO model verwerkt in Bistra. Bistra is eveneens een programma van Physibel. In Bistra kunnen de eigenschappen van de materialen temperatuursafhankelijk variëren. Zo kan men in Bistra de temperatuursvoorwaarden opleggen bijvoorbeeld volgens de standaard brandkrommen. Wanneer de temperatuur stijgt veranderen de lambda waarden en de massa dichtheid van de omliggende materialen waaronder ook het dragend materiaal, aluminium. In bijlage B wordt verder ingegaan op deze grafieken.

Het aluminium I profiel wordt ingeladen in Bistra. De grafieken die de variatie van de lamda waarde en massadichtheid per temperatuurstijging presenteren (figuur 43) worden eveneens ingeladen en gekoppeld aan de gekleurde vlakken zoals te zien in figuur 39. Voor de luchtlaag rondom de constructie wordt een grafiek ingeladen die de temperatuurverandering per tijdseenheid presenteert. Deze verandering is gelijk aan de standaardbrandkrommen zoals vermeld in punt 2.2.2.1 en volgens EN 1991-1-2 [4].

No.	Ref.	Type	Filename	Prm.1	Prm.2	Prm.3	Prm.4	Prm.5	Prm.6
1	T01	FILE	FIRE_CURVE_I!						
2	L01	FILE	aluminium_1						
3	L02	FILE	hout						
4	L03	FILE	Fire master						
5	C01	FILE	aluminium_1						
6	C02	FILE	hout						
7	C03	FILE	fire master ter						

Figuur 43 Definiëren van de grafieken voor de simulatie

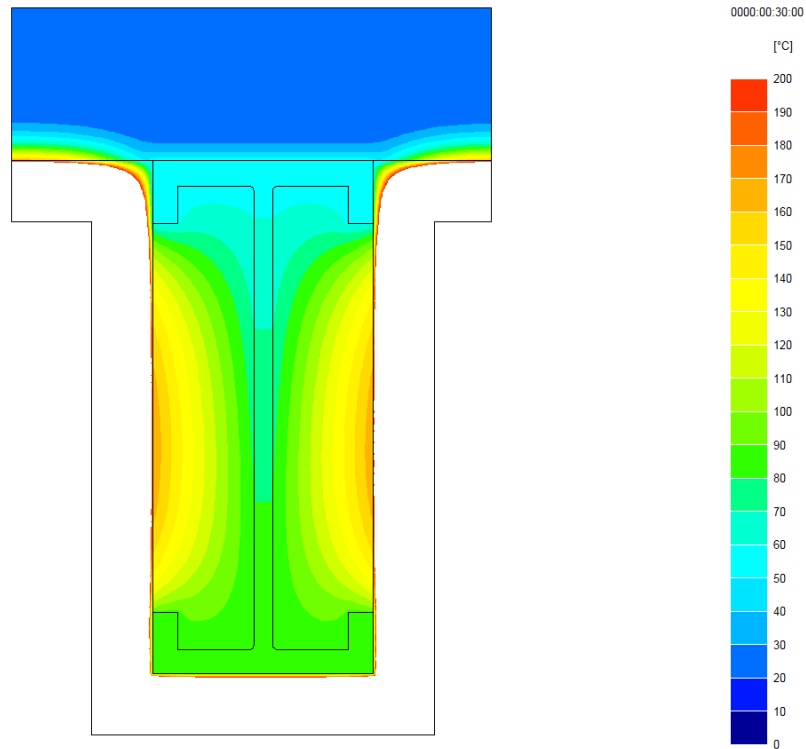
De T01 grafiek vertegenwoordigt de standaardbrandkrommen. De Lxx grafieken vertegenwoordigen de veranderende lambda waarde en de Cxx grafieken vertegenwoordigden de veranderlijke specifieke warmte (figuur 44). Meer hierover in bijlage B.

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]	θ_a [°C]	h_c [W/m²K]	P_c [W/m]	θ_r [°C]	C1	C2	C3	Sun	ρ_s [-]	τ_s [-]
8	MATERIAL		aluminium		L01	0.90	2800.0	C01											0.10	0.00
12	MATERIAL		hardwood		L02	0.90	700.0	C02											0.10	0.00
151	MATERIAL		Firemaster marine plus blanket		L03	0.90	30.0	C03											0.10	0.00
166	BC_SIMPL	NIHIL	indoors, downwards heat flow					20.0	5.90	0										
170	BC_SKY	NIHIL	exterior							0	T01	3.00		T01					NO	
224	EQUIMAT	- CEN_Xy_E	cavity slightly vent physical horizontal flow		0.166	0.90	1.2	1005.0							0.025	0.73	0.333333			

Figuur 44 Koppelen van de juiste grafiek aan het juiste materiaal

Hier is het wel belangrijk dat de juiste eigenschappen aan het juiste materiaal gekoppeld worden. De variërende materiaal eigenschappen zijn gekoppeld aan de correcte materialen en de buitenste luchtlaag heeft de waarde van de brandcurve gekregen. Voor dit onderzoek wordt bepaald om de simulatie 2,5 uur te laten draaien. De simulatie loopt vast wanneer hij langer duurt dan de temperatuur krommen gedefinieerd is of wanneer de temperaturen hoger worden dan de materiaal krommen vertegenwoordigen, aangezien het programma dan niet meer weet welke waarde hij moet nemen. De berekening gebeurt in stappen van 1 minuut zodat er een nauwkeurige bepaling gemaakt kan worden van de opwarming van het profiel, wat belangrijk is voor de bepaling van het draagvermogen gedurende de brand.

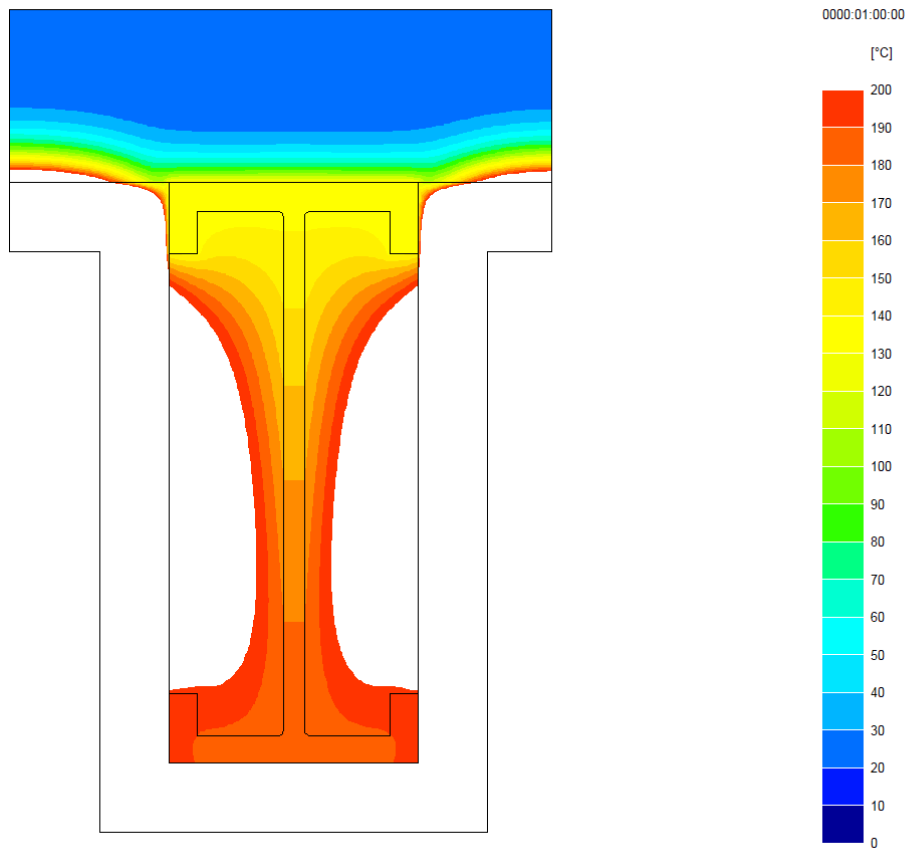
Op figuur 45 is te zien dat het profiel begint op te warmen en geeft een temperatuur van 100 °C weer. Hier moet wel verduidelijkt worden dat het programma is ingesteld dat wanneer een materiaal boven de 200 °C warm wordt dit als een wit vlak wordt gepresenteerd. Deze instelling dient om na te gaan in welke gebieden het aluminium profiel zijn sterkte begint te verliezen en zo doorsnede variaties te vergelijken met elkaar. Dit wil niet zeggen dat dit materiaal verdwenen is. Hierdoor mogen de luchtholtes rond het profiel nog beschouwd worden als gesloten luchtholtes.



Figuur 45 Test na 30 minuten

Het gebruikte isolatie materiaal smelt pas vanaf een temperatuur van 1200 °C. De buitenste schil isolatie bereikt deze waarde niet binnen onze 2,5 uur durende simulatie.

Figuur 46 toont het resultaat na 60 minuten. Het aluminium profiel is significant opgewarmd maar voorlopig nog onder de 200 °C. Het aluminium heeft dus nog niet zijn kritieke temperatuur bereikt. Het profiel is hier al wel verzwakt, hier wordt verder op in gegaan in 1.11.



Figuur 46 Test na 60 minuten

Na 63 minuten bereikt het aluminium zijn kritieke temperatuur ter plaatse van de onderste verstijvers (figuur 47).

BISTRA Calculation Results

BISTRA data file: tekening voor voorbeeld.bst
 Number of nodes = 8927

Time step 0000:01:03:00

Col.	Type	Name	tmin [°C]	tmax [°C]	ta [°C]	flow in [W/m]	flow out [W/m]
8	MATERIAL	aluminium	144.37	201.76			
12	MATERIAL	hardwood	20.00	311.57			
151	MATERIAL	Firemaster mari	120.55	951.72			
166	BC_SIMPL	indoors, downwa	20.00	20.02		0.00	0.01
170	BC_SKY	exterior	928.39	951.72		3082.49	1.05
224	EQUIMAT	cavity slightly	144.57	298.98			

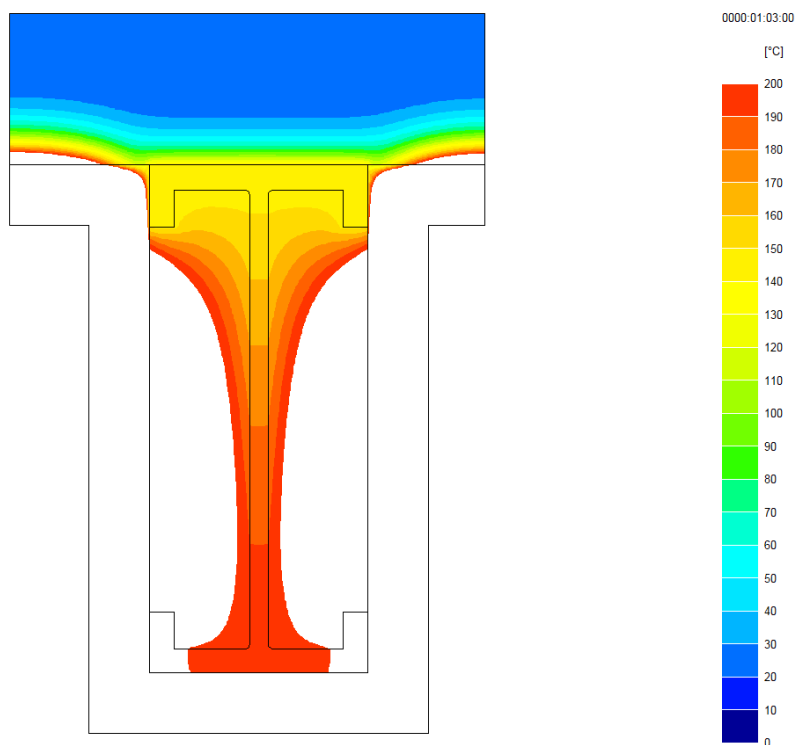
Figuur 47 Test na 63 minuten

Uit deze berekening kan dus geconcludeerd worden dat de geplubiceerd resultaten in de technische fiche van Hydro goed worden benaderd en dat een REI 60 kan bereikt worden voor aluminium profielen met een Firemaster Marine Plus blanket 50mm. Deze methode wordt vervolgens toegepast op verschillende methodes om het aluminium te beschermen. Dit kan zijn met:

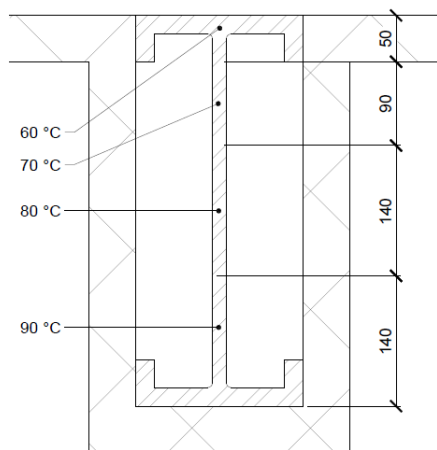
- Isolierend deken;
- Brandwerende omkasting;
- Brandwerende spuitmortel;
- Andere vormen van passieve brandbescherming zoals een brandwerend verlaagd plafond.

Brandwerende coatings en verven werken vaak pas vanaf 200 °C, dat maakt dat deze minder geschikt zijn voor een toepassing met aluminium.

Een reeks berekeningen kunnen uitgevoerd worden met variërende diktes en variërende beschermingsmiddelen. Eveneens kan de vorm van het aluminium profiel ook een invloed hebben op de resultaten. Zoals eerder vermeld in punt 2.4.1.2 is het belangrijk om de doorsnede classificatie van het profiel te bepalen. Wanneer er een doorsnede klasse 1 of 2 van toepassing is mag het profiel volgens de temperatuurgradiënt verdeeld worden in zones. Vervolgens wordt de weerstand van het profiel per zone bepaalt. Bij doorsnede klasse 3 moeten de maximale aanwezige temperatuur over het volledige profiel genomen worden. Doorsnede klasse 4 is te vermijden. Op figuren 45, 46 en 48 is te zien dat er een verschil in temperatuur is in het lijf. Wanneer er een doorsnede klasse 1 of 2 van toepassing is mag de nadelige invloed van de temperatuur per deel individueel bepaald worden. Dit wordt visueel voorgesteld in figuur 49 De figuur zal verdeeld worden in 4 vlakken zoals te zien op figuur 48.



Figuur 48 Test na 63 minuten



Figuur 49 Verdeling van temperatuur over I-vormig profiel na 30 minuten

De sterkte van een profiel wordt bepaald door de elasticiteitsmodulus en het traagheidsmoment. Volgens tabel 1 en tabel 3 met de gegevens van figuur 49 kan bepaald worden hoe sterk het profiel nog is ten opzichte van zijn originele sterkte in deze fase van de test.

Om de doorbuiging van een profiel te bepalen wordt volgende formule gebruikt.

$$\delta = \frac{5 * q_{ed} * L^4}{384 * E * I}$$

Waarin:

δ = doorbuiging

q_{ed} = verdeelde belasting

L = lengte van de overspanning

E = elasticiteitsmodulus

I = traagheidsmoment

Met I per rechthoekig deel gelijk aan:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

Om de weerstand tegen het buigmoment te bepalen gebruiken wordt volgende formule gebruikt [22]:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

Waarin:

M_{Ed} = het aanwezige buigmoment

M_{Rd} = het weerstandbiedend buigmoment

Met M_{Rd} gelijk aan [22]:

$$M_{c,Rd} = \alpha * W_{el} * \frac{f_0}{\gamma_{M1}}$$

Waarin:

α = vormfactor (bijlage A)

W_{el} = elastische doorsnede modulus (bijlage A)

f_0 = kritische waarde 0,2% rekgrens

γ_{M1} = veiligheidsfactor volgens NBN EN 1999-1

Voor meer details over de berekeningen zie bijlage A.

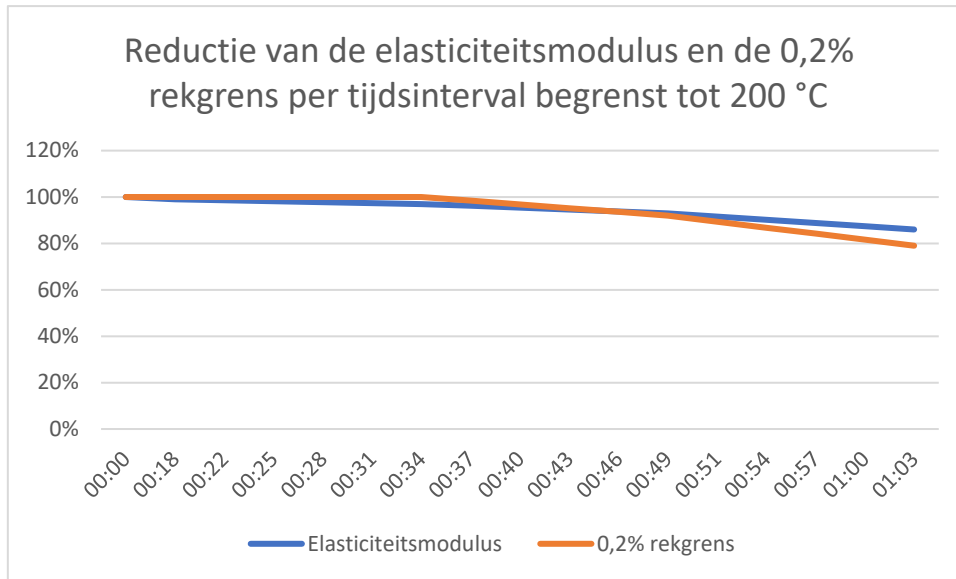
Het profiel heeft een E van 70000 N/mm^2 bij kamertemperatuur, een I van 430510000 mm^4 en een oppervlak van 15300 mm^2 . Deze berekeningen zijn terug te vinden in de bijlage A. Wanneer de temperatuur stijgt zal de elasticiteitsmodulus aangetast worden volgens tabel 3. De berekening loopt tot het aluminium profiel 200 graden Celsius bereikt. Tabel 15 geeft een samenvatting van de belangrijkste reductie die zal plaatsvinden in het aluminium profiel. In deze tabel wordt ook een tijdsverloop aangeduid, deze duidt op de duur van de proef. De temperatuur vermeld is de maximale temperatuur aanwezig in de doorsnede voor dit voorbeeld. Wanneer men in een momentopname de sterkte van het profiel wil bepalen moet er steeds een verdeling gebeuren over het oppervlak van de doorsnede per temperatuurgradiënt. Per verdeling dient de sterkte bepaald te worden. Wanneer men deze vervolgens terug bij elkaar voegt bekomt men de aangepaste sterkte van het profiel.

Tabel 15 invloed temperatuur op elasticiteitsmodulus en 0,2% rekgrens in voorbeeld oefening

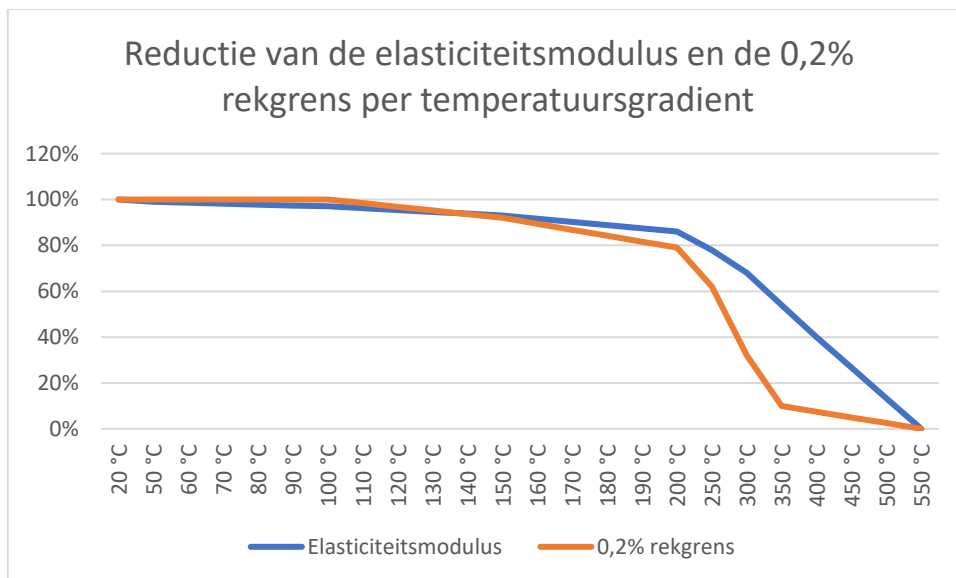
Tijd	Temperatuur	Elasticiteitsmodulus In N/mm ²	Reductie van de elasticiteitsmodulus in %	Reductie van de 0,2% rekgrens sterkte AW 6106 legering in %	0,2% waarde N/mm ² AW 6106 legering
00:00	20 °C	70000 N/mm ²	0%	0 %	200 N/mm ²
00:18	50 °C	69300 N/mm ²	1,00%	0 %	200 N/mm ²
00:22	60 °C	69000 N/mm ²	1,43%	0 %	200 N/mm ²
00:25	70 °C	68740 N/mm ²	1,80%	0 %	200 N/mm ²
00:28	80 °C	68460 N/mm ²	2,20%	0 %	200 N/mm ²
00:31	90 °C	68180 N/mm ²	2,60%	0 %	200 N/mm ²
00:34	100 °C	67900 N/mm ²	3,00%	0 %	200 N/mm ²
00:37	110 °C	67340 N/mm ²	3,80%	1,60%	196,8 N/mm ²
00:40	120 °C	66780 N/mm ²	4,60%	3,20%	193,6 N/mm ²
00:43	130 °C	66220 N/mm ²	5,40%	4,80%	190,4 N/mm ²
00:46	140 °C	65660 N/mm ²	6,20%	6,40%	187,2 N/mm ²
00:49	150 °C	65100 N/mm ²	7,00%	8,00%	184 N/mm ²
00:51	160 °C	64120 N/mm ²	8,40%	10,60%	178,8 N/mm ²
00:54	170 °C	63140 N/mm ²	9,80%	13,20%	173,6 N/mm ²
00:57	180 °C	62160 N/mm ²	11,20%	15,80%	168,4 N/mm ²
01:00	190 °C	61180 N/mm ²	12,60%	18,40%	163,2 N/mm ²
01:03	200 °C	60200 N/mm ²	14,00%	21,00%	158 N/mm ²
01:17	250 °C	54600 N/mm ²	22,00%	38,00%	124 N/mm ²
01:31	300 °C	47600 N/mm ²	32,00%	68,00%	64 N/mm ²
01:45	350 °C	37800 N/mm ²	46,00%	90,00%	20 N/mm ²
01:59	400 °C	28000 N/mm ²	60,00%	92,50%	15 N/mm ²
02:13	450 °C	18666 N/mm ²	73,33%	95,00%	10 N/mm ²
02:27	500 °C	9333 N/mm ²	86,67%	97,50%	5 N/mm ²
02:41	550 °C	0 N/mm ²	100,00%	100,00%	0 N/mm ²

Ook zal er een invloed op de 0.2% rekgrens plaatsvinden volgens tabel 1. Deze waarden zijn eveneens verwerkt in tabel 15.

In de grafiek bij figuur 50 is de reductie per elasticiteitmodulus en 0,2 rekgrens per tijdsverloop weergegeven. De grafiek toont aan dat de 0,2 rekgrens sneller verzwakt dan de elasticiteitsmodulus. Op figuur 48 is de reductie van de elasticiteitsmodulus en de 0,2 rekgrens vertegenwoordigt per temperatuurgradiënt. De reductie van de 0,2 rekgrens zal het snelste dalen en dus eerder maatgevend zijn dan die van de elasticiteitsmodulus. Let wel op dat de temperatuur in figuur 48 niet in gelijke intervallen opbouwt. Figuur 51 onderbouwt ook de stelling dat de sterkte van het aluminium profiel vanaf 200 °C drastisch zal dalen.



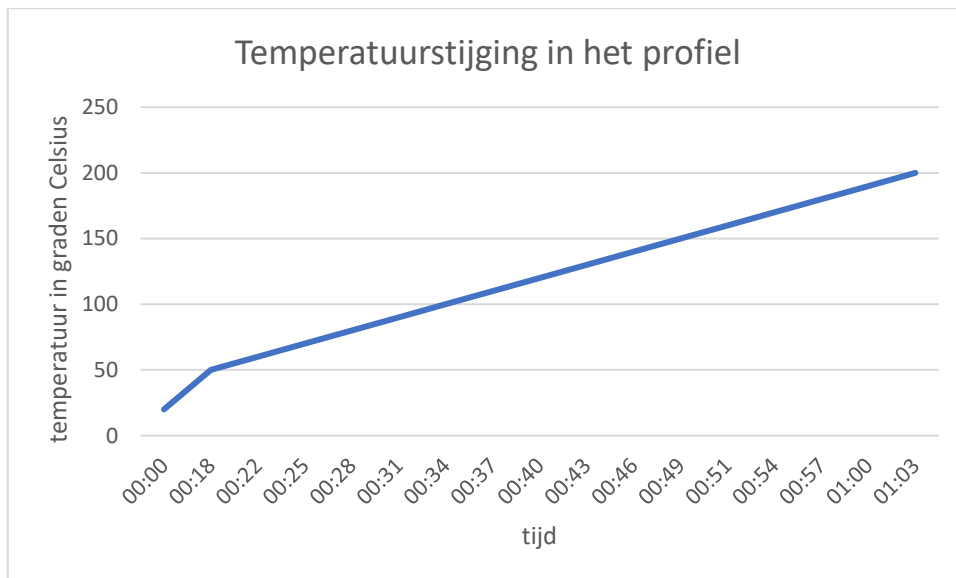
Figuur 50 Reductie van de elasticiteitsmodulus en de 0,2% rekgrens per tijdsverloop tot 200°C



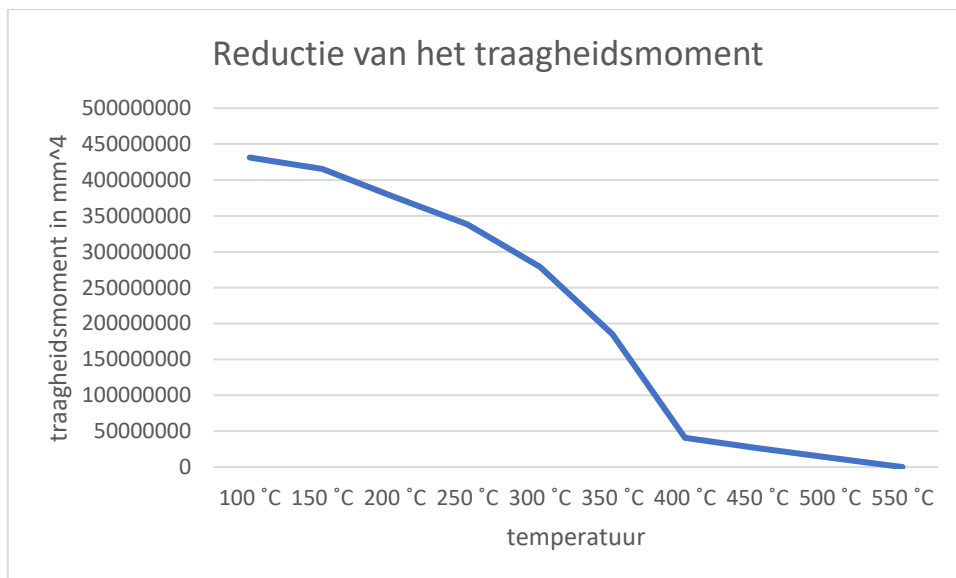
Figuur 51 Reductie van de elasticiteitsmodulus en de 0,2% rekgrens per temperatuurgradiënt

Eveneens is het een interessant gegeven om te zien dat de temperatuur in het profiel lineair stijgt tot de 200 °C, ondanks dat de buitenluchtlaag een standaardbrandkrommen volgt. Deze grafiek is opgesteld volgens de maximale temperatuur aanwezig in het aluminium profiel.

Ondanks de lineaire stijging van de temperatuur in het profiel zoals in figuur 52 neemt de sterkte van het profiel wel sterker af naarmate de temperatuur stijgt. Dit toont figuur 53. De daling neemt toe naarmate de temperatuur stijgt tot deze de 400 °C bereikt. Vanaf daar lijkt de daling terug lineair, maar dit komt vooral door de beperkte hoeveelheid gegevens die beschikbaar is over de reactie van aluminium boven de 400 °C. Ook is deze reactie afhankelijk van het legeringstype.

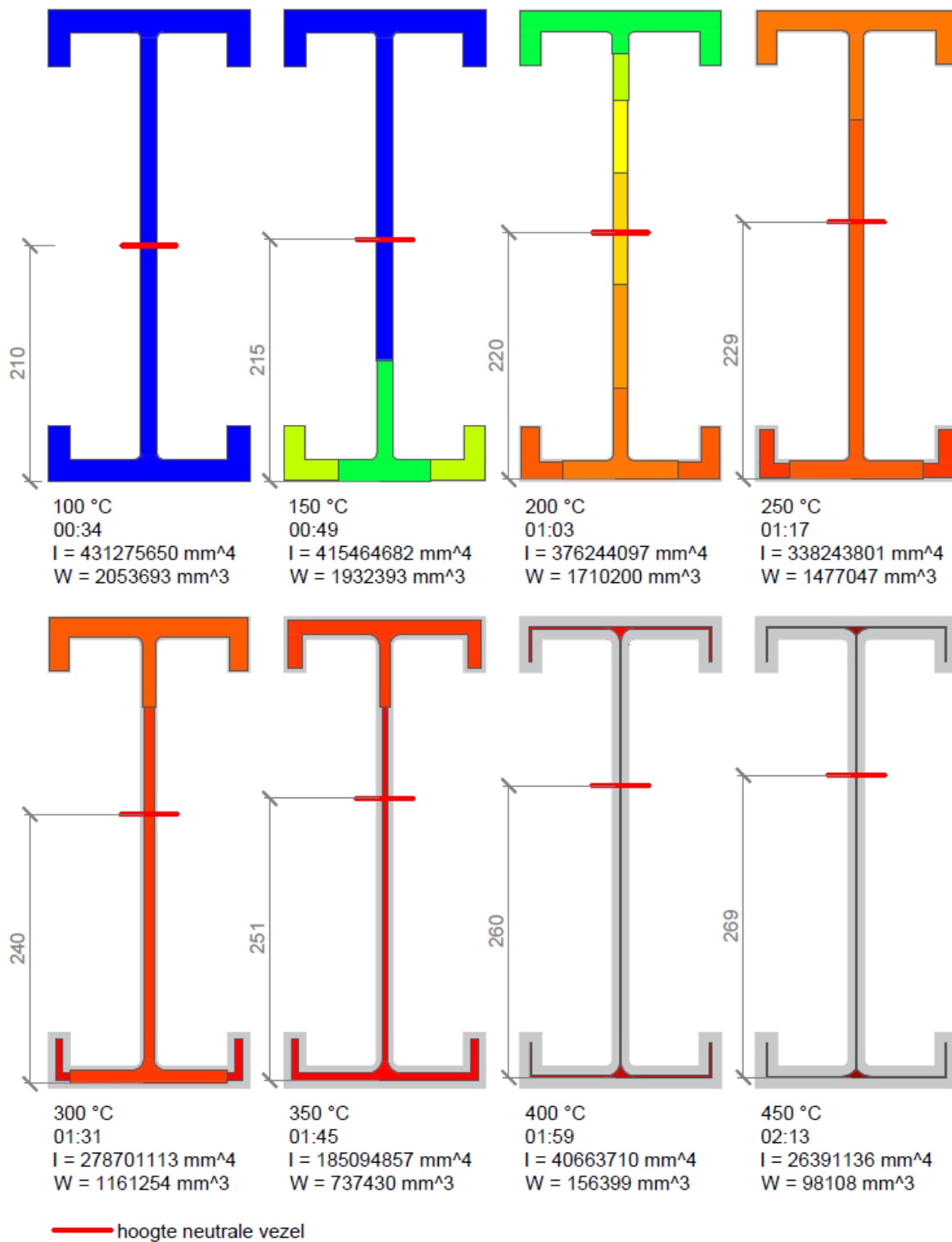


Figuur 52 Temperatuurstijging in het profiel



Figuur 53 Reductie van het traagheidsmoment

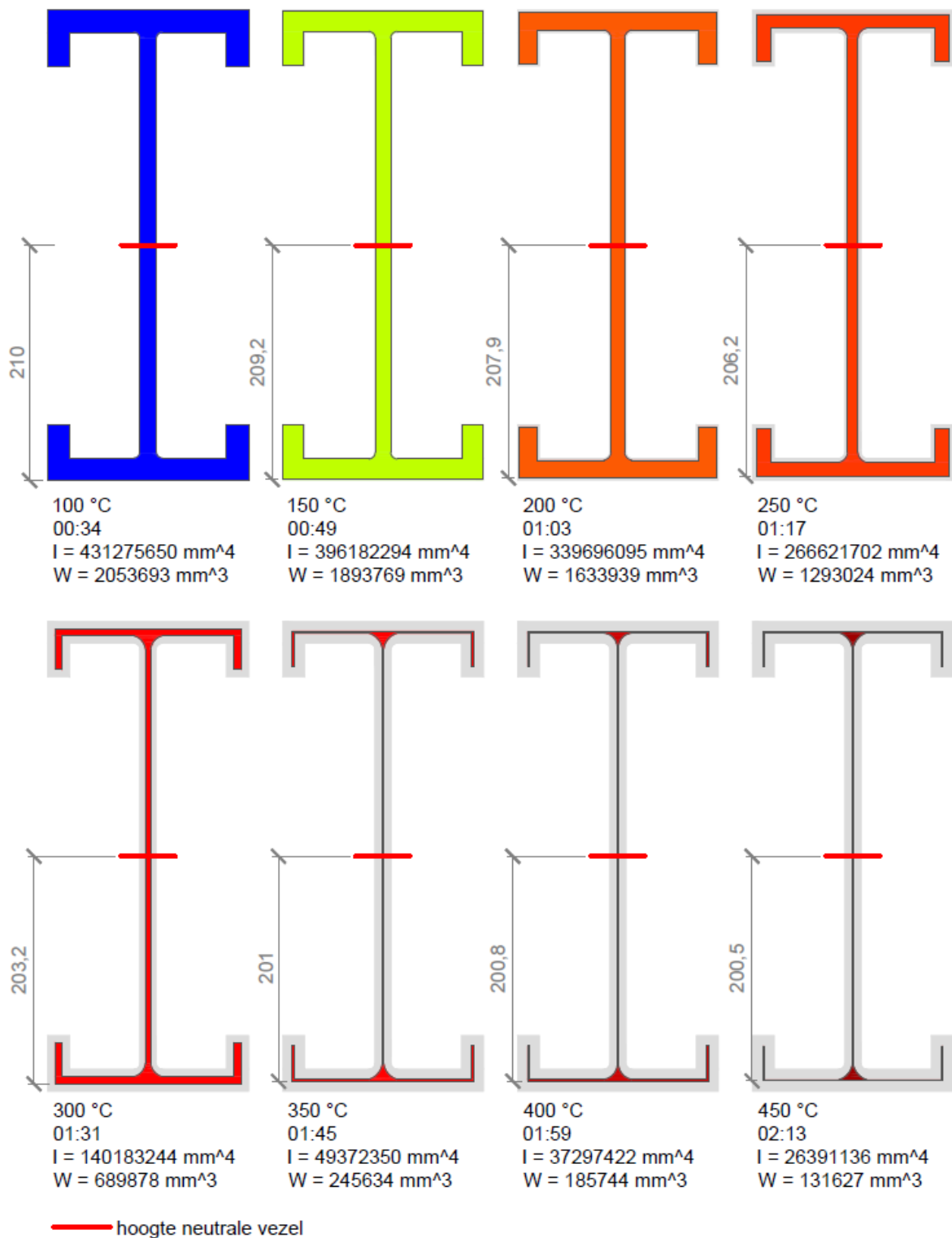
Voor doorsnedeklasse 1 en 2 wordt de reductie in sterkte, met dan voornamelijk de 0,2% rekgrens, gevisualiseerd door een vermindering van de doorsneden. Het grijze silhouet presenteert de originele doorsnede van het aluminium I-vormig profiel (figuur 54). Tot de 200 °C gebeurt de kleurenverdeling in stappen van 10 °C. Vanaf de 200 °C gebeurt de reductie in stappen van 50 °C, dit omdat de exacte sterkte niet meer relevant is vanaf dat de 200 °C grens bereikt is. Echter blijft de reductie na de 200 °C wel verder toenemen in extremere mate dan voor de 200 °C grens. Eveneens zal het zwaartepunt naar boven opschuiven en zal het traagheidsmoment (I) afnemen. Dit wordt gereflecteerd in het weerstandsmoment (W), die eveneens verzwakt. Zoals getoond in figuur 53 neemt de sterkte drastisch af naarmate de temperatuur stijgt.



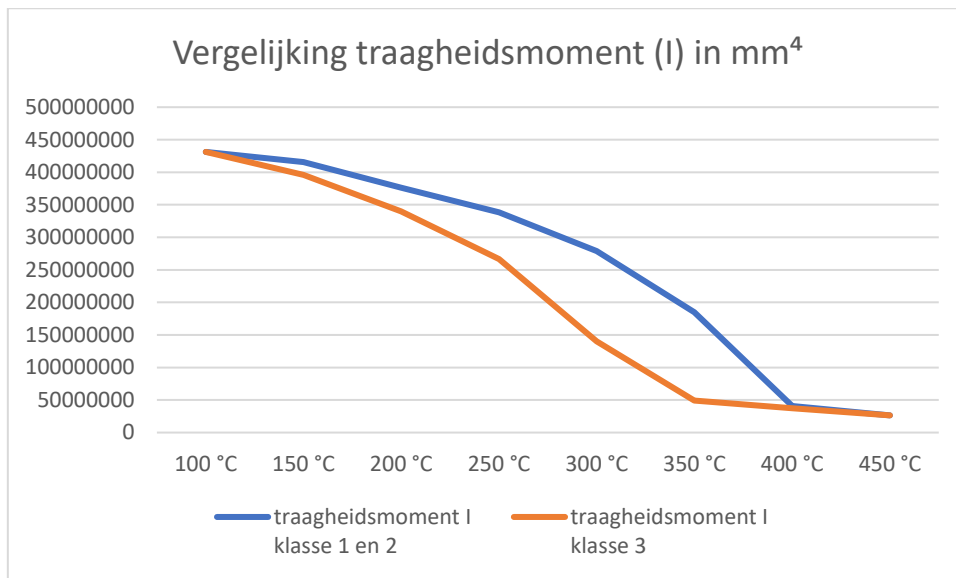
Figuur 54 Visuele voorstelling van de reductie per temperatuurstijging voor doorsnedeklasse 1 en 2

Voor profielen met een doorsnedeklasse 3 moet men steeds de maximale temperatuur nemen die aanwezig is in het profiel (figuur 55). Hierdoor zal de sterkte sneller afnemen dan bij een doorsnedeklasse 1 of 2. Echter, doordat de profielen hun symmetrie behouden zal het zwaartepunt in de midden blijven. Hierdoor zal het weerstandsmoment (W), die bepaald wordt door het traagheidsmoment (I) te delen door de verticale afstand van de neutrale vezel tot de meest getrokken

vezel, minder snel afnemen en zelfs verbeteren naarmate het profiel een hogere temperatuur bereikt en het traagheidsmoment nog maar beperkt afneemt, zoals te zien op figuur 56.

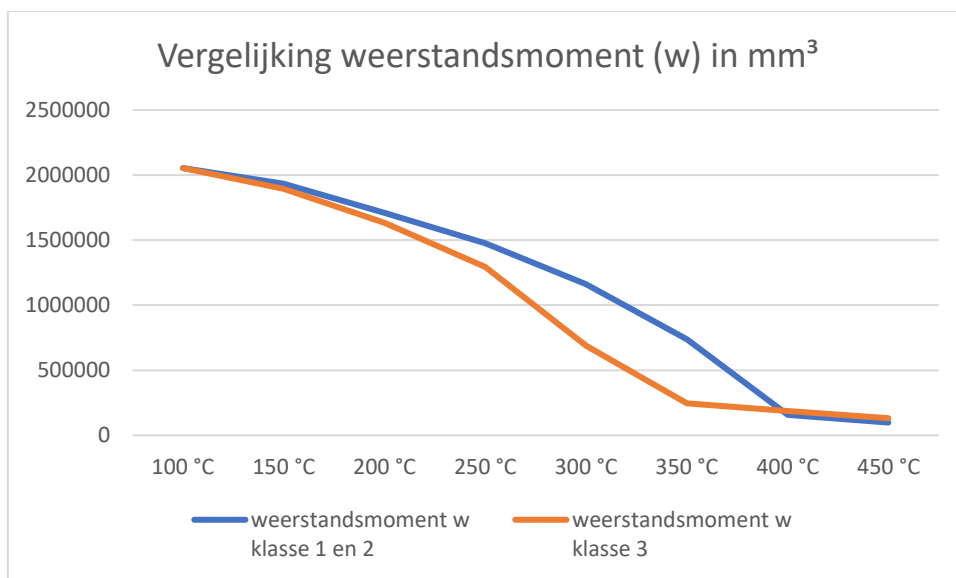


Figuur 55 Visuele voorstelling van de reductie per temperatuurstijging voor doorsnedeklasse 3



Figuur 56 Vergelijking traagheidsmoment per doorsnedeklasse

In figuur 56 is op te merken dat een profiel met doorsnedeklasse 3 sneller van sterkte zal reduceren dan een profiel met doorsnedeklasse 1 of 2. Dat de tabellen elkaar terug ontmoeten in de lagere waardes heeft deels te maken met de manier waarop de temperatuur veranderingen gemeten zijn. Tot de 200 °C zijn steeds sprongen van 10 °C gehanteerd omdat daar de focus op ligt. Boven de 200 °C zijn de sprongen verandert naar 50 °C. Ook neemt de reductie af naarmate het materiaal bijna geen sterkte meer heeft. Dezelfde trend is te zien in figuur 57.



Figuur 57 Vergelijking weerstandsmoment per doorsnedeklasse

Met deze gereduceerde waardes kan een nieuwe sterkte bepaald worden. Eveneens moet er een reductie gebeuren op de variabele belasting met een psi factor die afhankelijk is van het type gebouw zoals omschreven in de NBN EN 1991-1-1. $\psi_1 = 0.5$ en $\psi_2 = 0.3$ voor gebouwen uit categorie A en B. $\psi_1 = 0.7$ en $\psi_2 = 0.6$ voor categorie C en D. $\psi_1 = 0.9$ en $\psi_2 = 0.8$ voor gebouwen uit categorie E. Aangezien brand telt als accidentiele belasting zullen deze psi factoren zorgen voor een reductie van de variabele belasting. Deze PSI factoren reduceren de variabele belasting, aangezien deze gebaseerd is op gebruikslast van het gebouw, en dus de aanwezigheid van mensen. Deze psi factoren zouden ook van toepassing zijn zou er sneeuw en onderhoud meegerekend zijn, maar aangezien deze niet aanwezig kunnen zijn tijdens een brand worden deze verwaarloosd. De bedoeling is dat men evacueert

tijdens een brand, en dus wordt de variabele belasting vermindert. De veiligheids coëfficiënten die men gebruikt voor vaste en variabele belastingen vallen weg. Alle belastingen die als “gunstig” kunnen worden aanschouwd voor de structuur tijdens brand worden niet meegerekend. Zo zal de berekening van de belastingscombinatie bij brand bepaald worden:

$$= \sum_{i \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ of } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,1} Q_{k,i}$$

Waarin:

$G_{k,j}$	= karakteristieke waarde blijvende belasting j
P	= voorspankrachten (in deze masterproef = 0)
A_d	= rekenwaarde van buitengewone belasting (hier = 0)
$\psi_{1,1}$ en $\psi_{2,1}$	= factor in verband met de combinatiewaarde van variabele belastingen
$Q_{k,i}$	= karakteristieke waarde met gelijktijdig optredende variabele belasting

Met de gereduceerde I en W waardes wordt gecontroleerd of het bepaalde profiel na 60, 90 of 120 minuten nog steeds voldoet om de opgelegde belasting te dragen. Deze controle kan u terug vinden in bijlage C die in samenwerking met Ir Cyriel Clauwaert is opgesteld.

3.3 Grafieken

Voor de berekening in Bistra worden verschillende grafieken gebruikt. Er wordt een onderscheid gemaakt in drie verschillende grafiek soorten. Het eerste type is de Txx grafiek. Deze grafiek vertegenwoordigt de temperatuurstijging per tijdseenheid. Hier wordt bepaald welke temperatuur krommen van toepassing is voor de berekening. De Lxx grafieken vertegenwoordigen de variërende lamda waarde. Wanneer een materiaal warm wordt veranderen zijn eigenschappen, hetzelfde geldt voor de lambda waarden. Per materiaal is hier een andere fysische oorzaak verantwoordelijk voor. Vervolgens zijn er de Cxx grafieken, deze vertegenwoordigen de verandering in specifieke warmte tijdens een brand. In het onderzoek zullen er meerdere soorten isolatie getest worden. In Bijlage B volgt een opsomming van de gebruikte grafieken tijdens deze simulaties.

3.4 Proeven

Proeven zouden normaal gebeuren volgens de NBN EN 13381-4, ‘proeven ter bepaling van de bijdragen tot de vuurweerstand van dragende bouwdelen deel 4: vuurwering aangebracht op stalen bouwdelen’. De proeven zullen gebaseerd zijn op een zelf bepaalde situatie volgens de Eurocode of volgens EN ISO -834. Of er kunnen proeven gebeuren aan de hand van bestaande gebouwen zoals t’ Kuipke of de skyhall in Brussel.

Voor deze masterproef kunnen er geen proeven plaatsvinden in een laboratorium omwille van het beperkte budget.

4 Voorbeeld berekening

Voor de voorbeeld berekening zie bijlage A voor de bepaling van de normale toestand en bijlage C voor de bepaling bij brand. Voor de masterproef zullen er drie rekenvoorbeelden uitgevoerd worden. Alle methodes zullen worden uitgevoerd op een aluminium I-vormig profiel type 6106 T6 300x150 mm. Voor het onderzoek zullen er drie verschillende methodes van passieve brandbescherming gebruikt worden. Een flexibele rotswol isolatie, een gyproc omkasting en een harde cellenglas isolatie. Bij alle drie de simulaties wordt gewerkt met een lichtgewicht houten vloerafwerking.

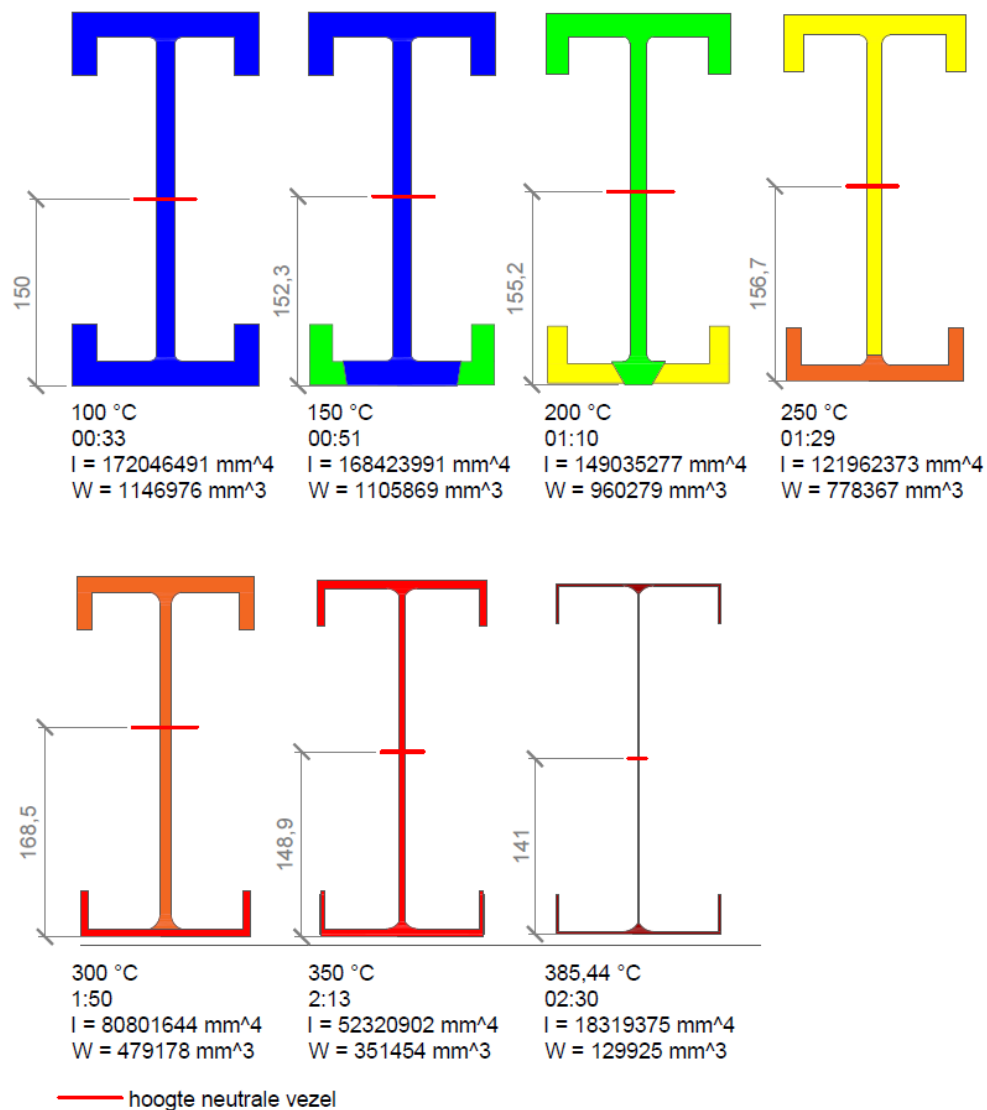
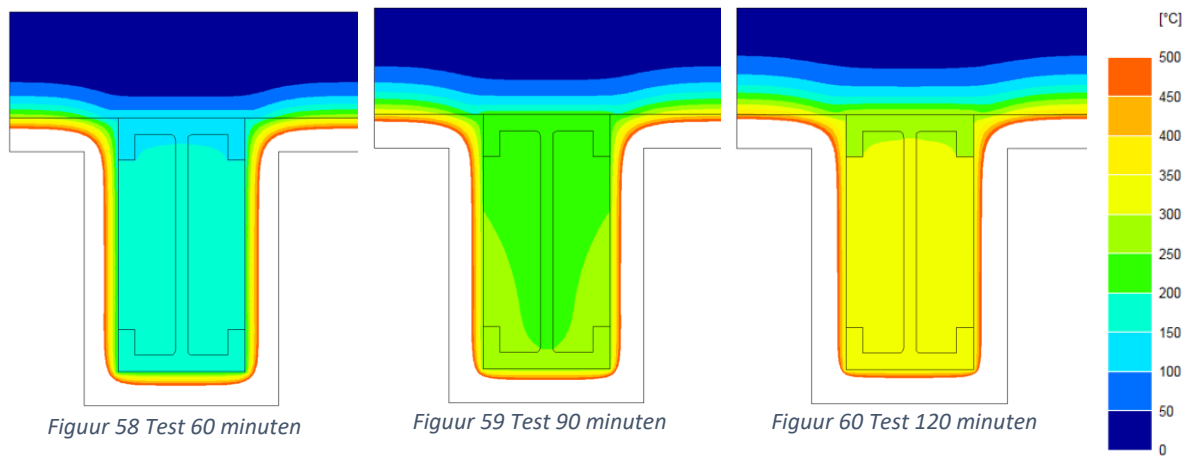
4.1 Flexibele rotswolisolatie

Voor de proef met de flexibele rotswolisolatie wordt er gebruik gemaakt van Rockwool. Er wordt een dikte van 40 mm genomen voor deze proefopstelling, de variërende waardes die worden gebruikt staan vermeld in bijlage B. Bij het verwerken van de simulaties zijn volgende gegevens verzameld. De proef duurt 2 uur en 30 minuten. Door het versinteren van de rotswol ontstaat er een beschermende laag die een beter weerstand geeft tegen de vlammen en stijgende temperatuur. De gebruikte rotswol heeft een dikte van 40 mm. De vermelde temperatuur in tabel 16 is de maximaal gemeten temperatuur in de doorsnede.

Tabel 16 Gegevens Bistra proef Rockwool 133 40 mm

Tijd	Temperatuur	Elasticiteitsmodulus In N/mm ²		0,2% waarde N/mm ²	
				AW 6106 legering	
00:00	20	70000	100,00%	200	100,00%
00:08	30	69766	99,67%	200	100,00%
00:12	40	69533	99,33%	200	100,00%
00:15	50	69300	99,00%	200	100,00%
00:19	60	69000	98,57%	200	100,00%
00:22	70	68740	98,20%	200	100,00%
00:26	80	68460	97,80%	200	100,00%
00:29	90	68180	97,40%	200	100,00%
00:33	100	67900	97,00%	200	100,00%
00:36	110	67340	96,20%	196,8	98,40%
00:40	120	66780	95,40%	193,6	96,80%
00:43	130	66220	94,60%	190,4	95,20%
00:47	140	65660	93,80%	187,2	93,60%
00:51	150	65100	93,00%	184	92,00%
00:54	160	64120	91,60%	178,8	89,40%
00:58	170	63140	90,20%	173,6	86,80%
01:02	180	62160	88,80%	168,4	84,20%
01:06	190	61180	87,40%	163,2	81,60%
01:10	200	60200	86,00%	158	79,00%
01:29	250	54600	78,00%	124	62,00%
01:50	300	47600	68,00%	64	32,00%
02:13	350	37800	54,00%	20	10,00%
02:30	385,44	30854	44,08%	19	9,54%

De resultaten van de Bistra test verklaren dat het profiel na 69 minuten de maatgevende 200 °C zal bereiken (figuren 58-60). Dit wil niet zeggen dat het profiel na 200 °C zijn sterkte zal beginnen te verliezen. In figuur 61 is de evolutie van de I waarde te zien. In tabel 17 staat de resterende sterkte vermeld rekening houdend met UGT en BGT controles. Bij brand wordt gewerkt met een UGT controle "accidentiele belastingen". Hierbij vallen de veiligheidsfactoren weg.



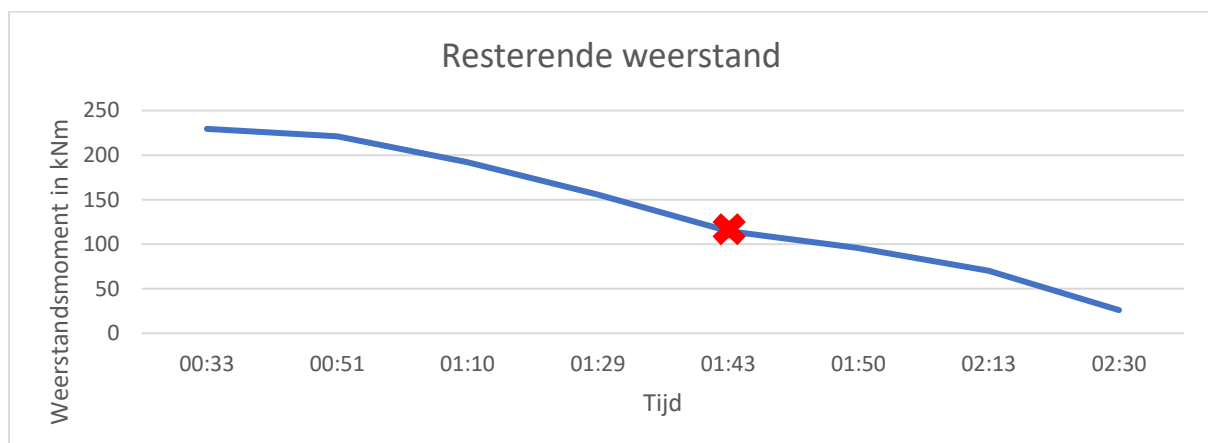
Figuur 61 Reductie van het profiel bij Rockwool 40 mm

Wanneer bovenstaand voorbeeld belast wordt met een permanente lijnlast van het eigengewicht, de bovenliggende structuur en een variabele belasting vastgesteld volgens de Eurocode wordt er een maximum moment van 157,8 kNm bekomen. Tijdens de brand wordt er gerekend met een maximaal moment van 114,6 kNm omwille van de wegvallende veiligheidscoëfficiënten en de psi factoren die van toepassing worden volgens de NBN EN 1990. Voor meer informatie over de berekening bekijk rekennota 1.

Tabel 17 Resterende weerstand

tijd	resterende weerstand	
00:41	229,4	kNm
00:58	222,32	kNm
01:09	193,21	kNm
01:18	155,67	kNm
01:25	111,110	kNm
01:28	96,96	kNm
01:39	70,29	kNm
01:50	17,11	kNm

Met de aanwezige belasting tijdens brand zal profiel bezwijken na 104 minuten. Deze situatie behaalt dus een weerstandseis van REI 90. Het rode kruis in de grafiek bij figuur 62 vermeldt het punt van bezwijken.



Figuur 62 Grafiek van simulatie Rockwool 133 40mm

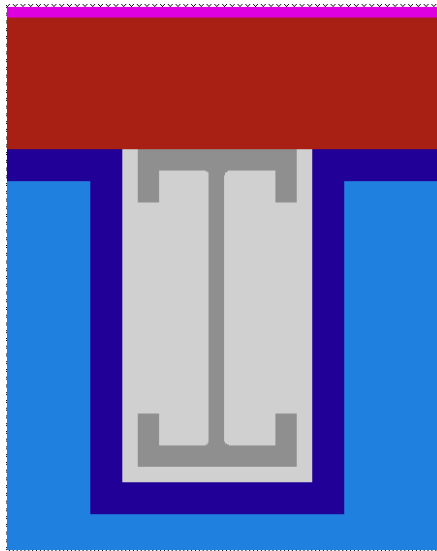
4.2 Gyproc omkasting

Voor de gyproc omkasting is er weer gebruik gemaakt van de grafieken uit bijlage B. Uit de Bistra berekening komen volgende resultaten (tabel 18). Voor de gyproc berekening is er gebruik gemaakt van de gypsum grafiek. Deze komt overeen met het thermisch plateau dat ontstaat omwille van de verdamping van gebonden kristalwater. De constructie bestaat uit twee brandwerende gipskarton platen die geschrinkt geplaatst worden tegen een aanwezig latwerk. Deze structuur kent geen isolerend effect, of is zeer beperkt. Maar voorziet wel voldoende bescherming vanaf een temperatuur van 100°C Door het verdampen van het gebonden kristalwater.

Tabel 18 Gegevens Bistra proef Gyproc 2*15mm

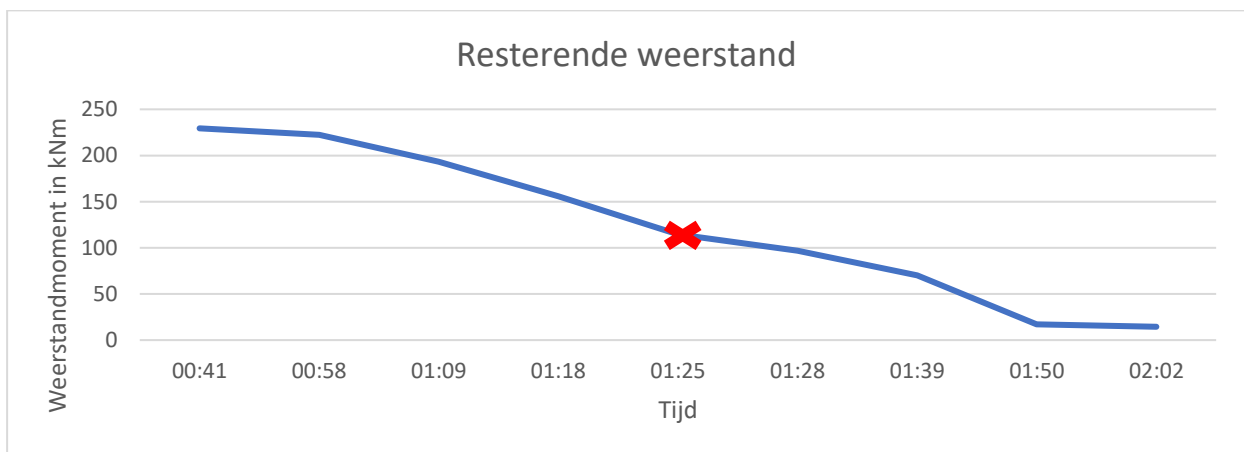
tijd	temperatuur	Elasticiteitsmodulus In N/mm ²		0,2% waarde N/mm ²	
				AW 6106 legering	
00:00	20	70000	100,00%	200	100,00%
00:12	30	69766	99,67%	200	100,00%
00:16	40	69533	99,33%	200	100,00%
00:20	50	69300	99,00%	200	100,00%
00:24	60	69000	98,57%	200	100,00%
00:29	70	68740	98,20%	200	100,00%
00:33	80	68460	97,80%	200	100,00%
00:37	90	68180	97,40%	200	100,00%
00:41	100	67900	97,00%	200	100,00%
00:44	110	67340	96,20%	196,8	98,40%
00:48	120	66780	95,40%	193,6	96,80%
00:51	130	66220	94,60%	190,4	95,20%
00:55	140	65660	93,80%	187,2	93,60%
00:58	150	65100	93,00%	184	92,00%
01:01	160	64120	91,60%	178,8	89,40%
01:03	170	63140	90,20%	173,6	86,80%
01:06	180	62160	88,80%	168,4	84,20%
01:08	190	61180	87,40%	163,2	81,60%
01:10	200	60200	86,00%	158	79,00%
01:18	250	54600	78,00%	124	62,00%
01:28	300	47600	68,00%	64	32,00%
01:39	350	37800	54,00%	20	10,00%
01:50	400	28000	40,00%	15	7,50%
02:02	450	18666	26,67%	10	5,00%
02:15	500	9333	13,33%	5	2,50%
02:28	550	0	0,00%	0	0,00%

Figuur 63 toont de simulatie die Bisco en Bistra zullen uitvoeren, rondom het profiel is een luchtlaag voorzien. Deze vertegenwoordigt de balkenlaag waar de Gyproc panelen aan verbonden zijn. De rekenwaardes en stappen zijn hetzelfde als in voorbeeld 3.1. Voor meer details zie rekennota 2.

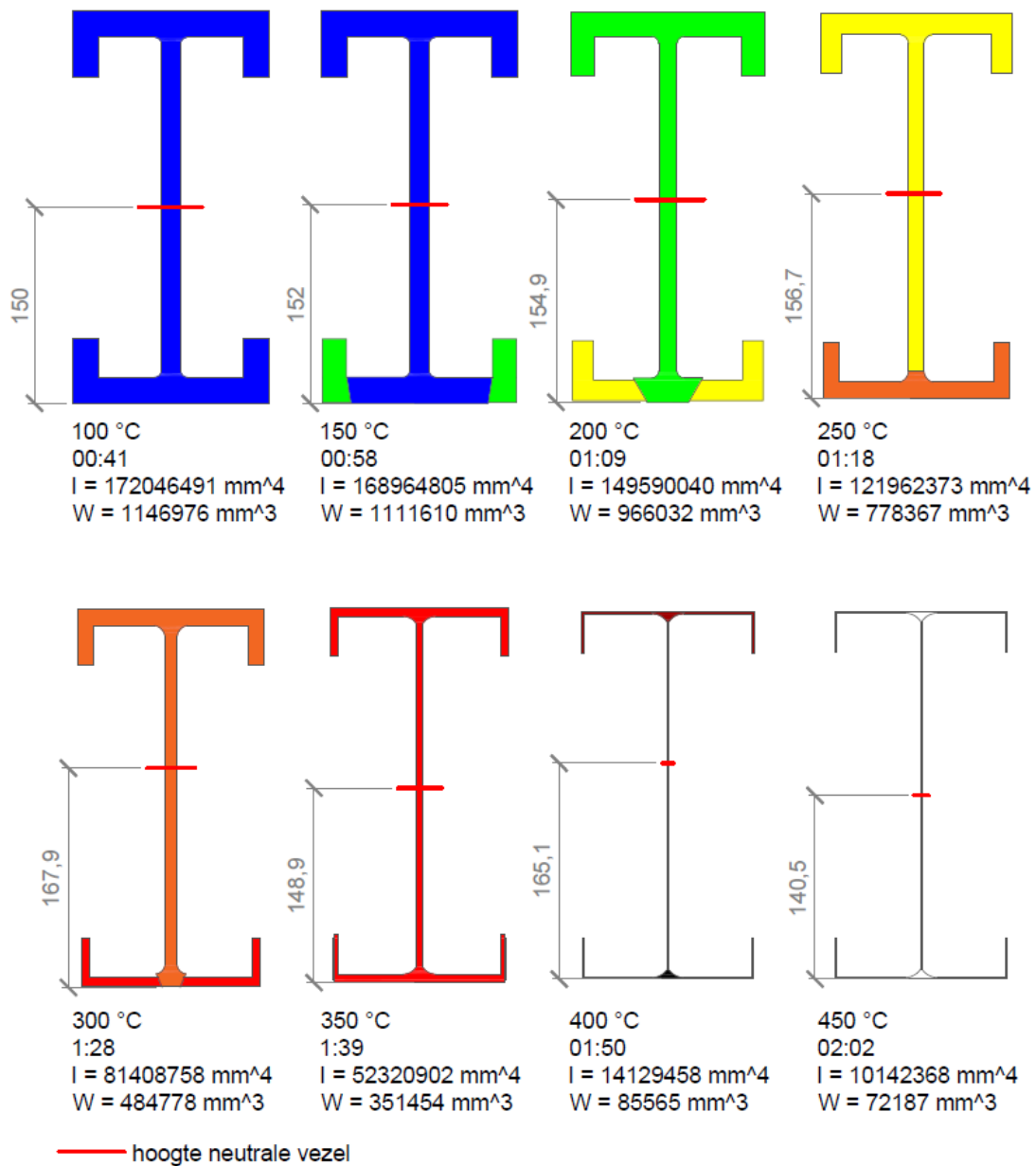


Figuur 63 Gyproc omkasting Bisco berekening

Figuur 64 toont de reductie van het weerstand biedende moment. Het rode kruis geeft aan wanneer het profiel bezwijkt. Het profiel houdt 1 uur en 25 minuten stand tegen de brand. Tabel 18 geeft de reductie van de sterkte per tijdseenheid weer. Een visuele voorstelling van de reductie is gegeven in figuur 65. Tabel 19 toont de resterende sterkte per tijdsverloop.



Figuur 64 Resterende weerstand bij gyproc 2 x 15mm



Figuur 65 Reductie van de doorsneden bij Gyproc 2x15 mm

Tabel 19 Verloop van de sterkte bij Gyproc panelen 2x15mm

tijd	resterende weerstand	
00:41	229,4	kNm
00:58	222,32	kNm
01:09	193,21	kNm
01:18	155,67	kNm
01:25	114,554	kNm
01:28	96,96	kNm
01:39	70,29	kNm
01:50	17,11	kNm
02:02	14,44	kNm

4.3 Cellenglas isolatieplaten

Voor deze proef maken wordt gebruik gemaakt van een cellenglas bescherming. Hier worden dezelfde grafieken gebruikt als vermeld in bijlage C. Het Cellenglas creëert een beschermende laag wanneer deze in contact komt met verhoogde temperaturen. Deze beschermende laag heeft een glas achtige structuur en door deze eigenschappen weerkaatst het de warmte beter. Hierdoor blijft de achterliggende constructie langer beschermt. Voor deze test is een Foamglass plaat van 50mm dik genomen, dit is de dunst verkrijgbare plaat bij Foamglass. De temperatuur in tabel 20 is de maximaal gemeten temperatuur in de doorsnede.

Tabel 20 Gegevens Bistra proef Foamglas T3+ 50 mm

Tijd	Temperatuur	Elasticiteitsmodulus In N/mm ²		0,2% waarde N/mm ²	
				AW 6106 legering	
00:00	20	70000	100,00%	200	100,00%
00:21	30	69766	99,67%	200	100,00%
00:34	40	69533	99,33%	200	100,00%
00:46	50	69300	99,00%	200	100,00%
00:59	60	69000	98,57%	200	100,00%
01:12	70	68740	98,20%	200	100,00%
01:25	80	68460	97,80%	200	100,00%
01:38	90	68180	97,40%	200	100,00%
01:51	100	67900	97,00%	200	100,00%
02:04	110	67340	96,20%	196,8	98,40%
02:18	120	66780	95,40%	193,6	96,80%
02:30	130	66220	94,60%	190,4	95,20%

De resultaten van de proef met Cellenglas zijn zichtbaar in figuur 66. Hier is te beoordelen dat na 3 uur het aluminium nog steeds beperkt is tot 137 °C. De constructie behaalt een REI 120. De reductie van het aluminium zal zeer beperkt blijven en tijdens de testperiode van 2,5 uur zal de constructie niet bezwijken.

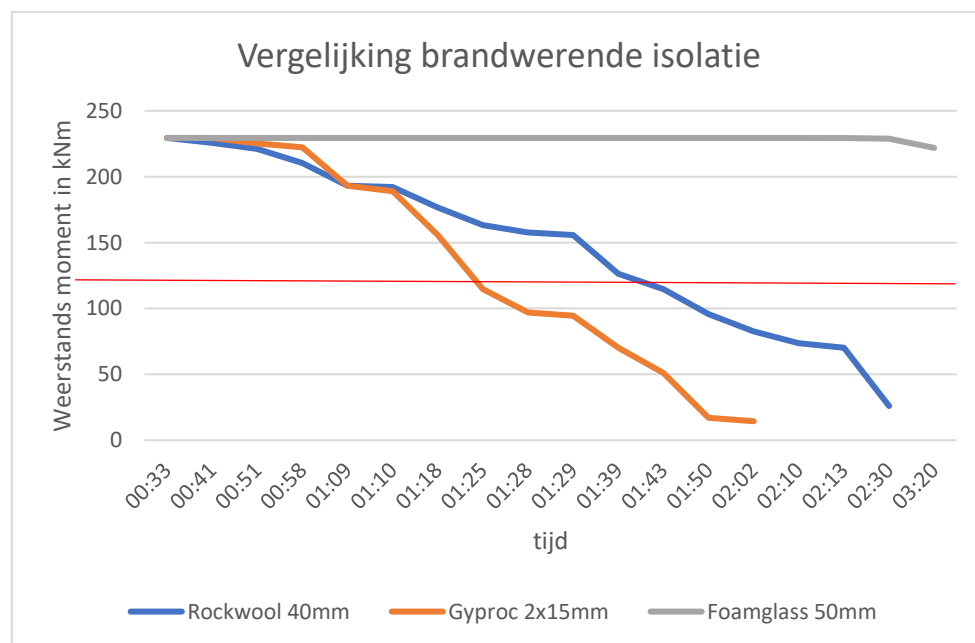
Time step 0000:03:00:00

Col.	Type	Name	tmin [°C]	tmax [°C]	ta [°C]	flow in [W/m]	flow out [W/m]
3	MATERIAL	Foamglass	98.35	1110.25			
8	MATERIAL	aluminium	124.11	137.28			
12	MATERIAL	hardwood	20.63	164.02			
170	BC_SKY	exterior	1105.63	1110.25		403.98	22.17
182	BC_SIMPL	indoors (reduce	20.63	21.53		0.00	2.17
208	EQUIMAT	cavity non-vent	124.22	165.01			

Figuur 66 Resultaat Foamglass na 3 uur

5 Resultaten

Alle drie de testen bewijzen dat er weldergelijk een aluminium constructie brandwerend gemaakt kan worden mits men de juiste maatregelen neemt. Voor de simulaties is een I vormig aluminium profiel gebruikt van het legerings type 6106 T6. Alle drie de brandwerende materialen voldoen aan minstens een REI 60. Echter mogen de drie materialen niet exact met elkaar vergeleken worden omdat er steeds een willekeurige dikte is genomen. Bij de Rockwool is er afgestemd op de 200 °C richtwaarde bij de eerste test, hier was uit te sluiten dat 30 mm voldoende zou zijn. Bij 40mm blijkt er voldoende te zijn voor een REI 90. Voor Gyproc was de richtwaarde ook om REI 60 te behalen, aan de hand van technische fiches is daarom besloten meteen met een dubbele Rf plaat van 15 mm te werken. Uit de testen blijkt hieruit dat het aluminium tot 1 uur en 25 minuten lang voldoende weerstand kon bieden. Voor de cellenglasplaat is de dunst mogelijke afmeting genomen die beschikbaar is op de markt. Figuur 67 toont de prestatie van de gebruikte materialen. De rode lijn toont de bezwijkwaarde van de constructie.



Figuur 67 Vergelijking van brandwerende isolatie

De grafiek op figuur 67 geeft een overzicht van de resultaten van de gemaakte simulaties. Er is gekozen om drie verschillende materialen te testen, samen met de Firemaster Marine Blanket plus uit het voorbeeld in punt 2.1 bepaald het onderzoek al 4 geschikte materialen. Deze materialen zijn verkrijgbaar in verschillende diktes en kunnen op verschillende manieren geplaatst worden. Deze resultaten geven een eerste richtwaarde vanaf welke diktes een REI 60 te behalen is.

6 Conclusie en toekomstvisie

In deze masterproef wordt de basis gelegd voor de bepaling van de sterkte van aluminium constructies bij brand. Zoals beschreven in punt 4 geven de resultaten een eerste idee van welke materialen geschikt zijn en welke diktes er nodig zijn om een REI 60 te behalen. In deze masterproef wordt bewijs geleverd over de mogelijke prestaties van aluminium bij brand. Al zijn er slechts 3 simulaties gemaakt, de mogelijkheden van verschillende combinaties lopen hoog op. Een variatie van profiel types, overspanningen, legeringen, profiel afmetingen, isolatie materialen, isolatie diktes, balken, verbindingen en kolommen zijn mogelijk. Wanneer al deze simulaties worden uitgevoerd kan men met behulp van grafieken en tabellen een overzichtelijke catalogus opstellen die per profiel en per isolatie materiaal de benodigde dikte vermelden om een REI 30, REI 60, REI 90 of REI 120 eis te behalen. Eveneens zijn laboproeven nodig ter verificatie van de simulaties en de gebruikte software.

Voor het bekomen van deze resultaten was een uitgebreid proces nodig met verschillende software pakketten. Om dit proces te vereenvoudigen voor de industrie zou er idealiter een catalogus opgesteld worden waar een duidelijk overzicht staat vermeld met het soort brandwerende isolatie en welke REI eisen deze kan behalen. Hiervoor moet boven vermeld proces herhaald worden met alle mogelijke variaties. Zo zullen overzichtelijke resultaten beschikbaar worden voor de industrie. Een verder onderzoek wordt dus geadviseerd.

Referenties

- [1] (2007). *Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part 1-2: General Rules-Structural fire design*.
- [2] B. F. G. D. M. R. L. F. M. Mazzolani, "Behaviour of aluminium alloy structures under fire," *Journal of civil engineering and management* vol. X, p. 190, 18 februari 2004 2004. 30 juni 2004.
- [3] Y. Q. Zheng and Z. Zhang, "The fire performance and fire-resistance design of aluminium alloy I-beams," *Fire and Materials*, vol. 40, no. 1, pp. 141-157, Jan-Feb 2016, doi: 10.1002/fam.2275.
- [4] (2003). *Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand (+ AC:2013)*.
- [5] Certilas. "Metalen en legeringen." Certilas. <https://certilas.nl/nl/content/metalen-en-legeringen> (accessed 2021).
- [6] Gent-Geprent. "Kuipke." <https://www.gent-geprent.com/bijzondere-gebouwen/gebouwen-k/kuipke> (accessed 2021).
- [7] Bouw&Wonen. "Opvallende plafondrealisatie in vernieuwde Skyhall op Brussels Airport." Bouw&Wonen. <https://www.bouwenwonen.net/artikel/Opvallende-plafondrealisatie-in-vernieuwde-Skyhall-op-Brussels-Airport/46712> (accessed 2021).
- [8] Lenntech. "Aluminium - Al." Lenntech. <https://www.lenntech.nl/periodiek/elementen/al.htm> (accessed 2021).
- [9] TUDelft. "Aluminium." TUDelft. <http://eduweb.eeni.tbm.tudelft.nl/TB141E/?aluminium> (accessed 2021).
- [10] A. Center. "Aluminium, een groen metaal in de bouw." *Bouw kronieken*. <https://www.bouwkroniek.be/article/aluminium-een-groen-metaal-in-de-bouw.5257> (accessed 2021).
- [11] C. M. e. F. Hogeschool. "Convectie, stroming." Joost De Vree. <https://www.joostdevree.nl/shtmls/convectie.shtml> (accessed december, 2021).
- [12] M. G. e. M. Roos. "straling, warmtestraling." Joost De Vree. <https://www.joostdevree.nl/shtmls/straling.shtml> (accessed december, 2021).
- [13] R. Hamerlinck, "Fire Safety Engineering met staal in Nederland," *Introductie van FSE met de Eurocodes en Juridische context*, powerpoint p. 43.
- [14] Nullifire. "Wat is het verschil tussen passieve en actieve brandbeveiliging?" nullifire. https://www.nullifire.com/nl_BE/technische-zone/kenniscentrum/actieve-en-passieve-brandbeveiliging/ (accessed december, 2021).
- [15] I. Č. Davor Skejić, Marija Jelčić Rukavina, "Behaviour of aluminium structures in fire - A review," *Applications of Structural Fire Engineering*, p. 6, 2015. [Online]. Available: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/asfe/article/view/3347>.
- [16] S. v. Leuven. "Aluminium bij hoge temperaturen." MCB campus. <https://www.mbcampus.nl/aluminium-bij-hoge-temperaturen/> (accessed december, 2021).
- [17] Hydro, "Fire safe aluminium structures," pp. 2-12, 2020.
- [18] D. I. K. Faes. "Friction stir lassen." Belgisch Instituut voor Lastechniek vzw. <https://bil-ibs.be/publicatie/friction-stir-lassen> (accessed 2021).
- [19] J. Maljaars and F. Soetens, "Strength of MIG welded connections in fire exposed aluminium structures," *Advanced Steel Construction*, vol. 5, no. 2, pp. 136-150, Jun 2009. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000266083600005.
- [20] V. S. Chevali et al., "Fire structural modelling and testing of welded aluminium plate," *Fire and Materials*, vol. 40, no. 1, pp. 48-64, Jan-Feb 2016, doi: 10.1002/fam.2267.
- [21] J. G. Kaufman, "Properties of aluminium alloys – Tensile, creep and fatigue data at high and low temperatures," 1999.
- [22] (2011). *Eurocode 9: Ontwerp en berekening van aluminiumconstructies - Deel 1-1: algemene regels*.
- [23] F. R. Shanley, Ed. *Inelastic column theory* (*Journal of the aeronautical sciences*. 1947, pp. 261 - 268.

- [24] N. K. Langhelle, Eberg, E., Amdahl, J. and Lundberg, S., *Buckling tests of aluminium columns at elevated temperatures*. Firenze, 1996.
- [25] N. K. Langhelle, "Experimental validation and calibration of nonlinear finite element models for use in design of aluminium structures exposed to fire," Ph.D., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1999.
- [26] J. Maljaars, "Local buckling of slender aluminium sections exposed to fire," Ph.D., Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2008.
- [27] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire: Part 2: Finite element models," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 11, pp. 1418-1428, 2009/11/01/ 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.06.003>.
- [28] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 11, pp. 1404-1417, Nov 2009, doi: 10.1016/j.tws.2009.02.008.
- [29] J. T. Maljaars, L. and Soetens, F., Ed. *Flexural buckling of fire exposed aluminium columns* (Fire Safety Journal. 2009, pp. 711 - 717.
- [30] O. R. van der Meulen, J. Maljaars, and F. Soetens, "Cross-sectional Classification of Aluminium Beams subjected to Fire," in *11th International Aluminium Conference (INALCO) on New Frontiers in Light Metals*, Eindhoven Univ Technol, Eindhoven, NETHERLANDS, Jun 23-25 2010, 2010, pp. 397-408, doi: 10.3233/978-1-60750-586-0-397. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000393222300042
- [31] O. R. Van der Meulen, J. Maljaars, F. Soetens, and L. Twilt, "Determining the Moment-Curvature Diagram of Aluminium Cross-Sections in Fire; A Numerical Code and Practical Examples," in *6th International Conference on Structures in Fire (SiF 10)*, E Lansing, MI, Jun 02-04 2010, 2010, pp. 1015-+. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000282623900123. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000282623900123
- [32] J. F. Cadorin, Pintea, D. and Franssen, J.M., "The design fire tool ozone V2.0 – Theoretical description and validation on experimental fire tests," 2004.
- [33] J. Maljaars and F. Soetens, "Experimental and numerical Analyses of Aluminium Frames exposed to Fire Conditions," in *11th International Aluminium Conference (INALCO) on New Frontiers in Light Metals*, Eindhoven Univ Technol, Eindhoven, NETHERLANDS, Jun 23-25 2010, 2010, pp. 201-212, doi: 10.3233/978-1-60750-586-0-201.
- [34] J. S. Maljaars, F. and Twilt, L., "Heating of aluminium members exposed to natural fire conditions," 2006.
- [35] J. Maljaars, Twilt, L., Fellingner, J. H. H., Snijder, H. H., & Soetens, F., "Aluminium structures exposed to fire conditions - an overview," paper vol. 2, p. 39, 2010.
- [36] J. Maljaars, L. Twilt, and F. Soetens, "Flexural buckling of fire exposed aluminium columns," *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 5, pp. 711-717, Jul 2009, doi: 10.1016/j.firesaf.2009.02.002.
- [37] I. R. Vennekens, "De indeling van de aluminiumlegeringen," *Metallerie*, informatief artikel vol. 49, no. deel 2, lasspecial, april 2003 2003.
- [38] MIFA. "De aluminium legering die het beste bij uw product past." MIFA Precision extrusion products. <https://mifa.eu/nl/specificaties/legeringen> (accessed 2021).
- [39] V. L. Patel, Qing & Hadi, Muhammad. " Numerical simulations of circular high strength concrete-filled aluminum tubular short columns incorporating new concrete confinement model." https://www.researchgate.net/publication/337322481_Numerical_simulations_of_circular_high_strength_concrete-filled_aluminum_tubular_short_columns_incorporating_new_concrete_confinement_model (accessed 2021).
- [40] WTCB, "Basisnormen brandpreventie," Norm Koninklijk besluit, 2016 1994.
- [41] (2016). *Koninklijk besluit van 7 juli 1994 tot vaststelling van de basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing waaraan de gebouwen moeten voldoen*.
- [42] *Materialen en brandveiligheid*, I. F. Veiligheid, online, December 2014 2014.

Bijlages

Bijlage A : Voorbeeld berekening profiel bij kamer temperatuur

Bijlage B : Gebruikte grafieken

Bijlage C : Voorbeeld berekening brand

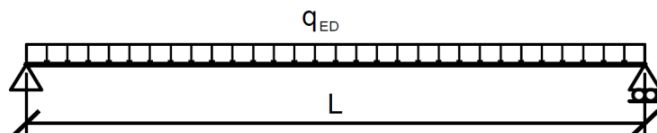
Rekennota 1: Voorbeeld berekening Rockwool 133 40 mm

Rekennota 2: Voorbeeld berekening met Gyproc 2 x 15mm

Bijlage A: Berekening van een aluminium I profiel bij brand

Dit excel tabblad dient voor de berekening van een aluminium I-vormig profiel scharnierend opgelegd op twee steunpunten. Gevolgklasse CC2 categorie A; woning.

Gegevens: woning 2 kN/m² variabele belasting
1,5 m afstand tussen de liggers



input
berekend
overdracht

L =	3 m		
UGT belasting	$Q_{ED} = 136,61$ kN/m	Klasse	CC2
BGT belasting	$Q_D = 100,86$ kN/m	γ_G	1,35
eigengewicht	0,36 kN/m	γ_Q	1,5
variabele belasting	3 kN/m	$Q_{ed} =$	4,5 kN/m
vaste belasting	65 kN/m ²		
vaste belasting lineair	97,5 kN/m	$G_{ed} =$	132,11 kN/m

CONTROLE BIJ OMGEVINGSTEMPERATUUR

UGT belasting	
steunpunt reacties	204,92 kN
Max moment	153,69 kNm
BGT belasting	BGT moment 113,47 kNm

Parameters aluminium profiel doorsnede en materiaal eigenschappen

Elasticiteitsmodulus $E =$	70000 N/mm ²
glijdingsmodulus $G =$	27000 N/mm ²
Coefficient van Poisson $\nu =$	0,3
lineaire thermische uitzettingscoefficient	2,3E-05 per °C
volumieke massa $\rho =$	2700 kg/m ³

Bepaling I , W en δ

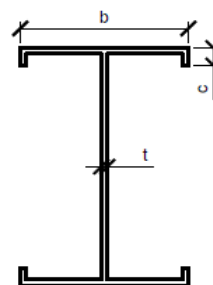
Naam van het profiel	I profiel met versterkte flenzen MP
hoogte	300 mm
dikte lijf	20 mm
breedte	150 mm
dikte flens	20 mm
hoogte verstijvers	50 mm

BGT Criterium doorbuiging	250
----------------------------------	------------

Max toegelaten doorbuiging 12 mm

Profiel krakteristieken bepaald in CAD pakket of andere

$I =$	179369824 mm ⁴	(AutoCAD)
$W =$	1195799 mm ³	symmetrisch
$A =$	13621 mm ²	(AutoCAD)
doorbuiging $\delta =$	8,472248718 mm	voldoet BGT !
gewicht =	36,7767 kg	
gewicht profiel =	110,3301 kg	



Bepaling doorsnede klassificatie

β lijf = 13,00
 β flens = 3,75
 Legering **EN AW 6106 T6**
 $f_0 = 200$ N/mm²
 $f_u = 250$ N/mm²

Lege- ring EN- AW	Product vorm	Toestand	Dikte t mm 1) 3)	f_0 1)	f_u 1)	A 5) 2)	$f_{0, haz}$ 4)	$f_{u, haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)
				N/mm ²	%	N/mm ²	$\rho_{0, haz}$	$\rho_{u, haz}$				
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20

- β bepaling:
- a) vlakke inwendige doorsnededelen zonder spanningsgradiënt of vlakke staanders zonder spanningsgradiënt of piekcompressie bij de teen $\beta = b/t$
 - b) inwendige doorsnededelen met een spanningsgradiënt die resulteert in een neutrale as in het centrum $\beta = 0,40 b/t$
 - c) interne delen met spanningsgradiënt en uitsteeksels met piekcompressie bij wortel $\beta = \eta b/t$

Tabel 6.2 - Slangheidsparameters β_1/ϵ , β_2/ϵ en β_3/ϵ

Materiaalclassificatie volgens tabel 3.2	Inwendig deel			Uitwendig deel		
	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
Klasse A, zonder lassen	11	16	22	3	4,5	6
Klasse A, met lassen	9	13	18	2,5	4	5
Klasse B, zonder lassen	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Klasse B, met lassen	10	13,5	15	3	3,5	4

$\epsilon = \sqrt{250/f_0}$, f_0 in N/mm²

$\epsilon = 1,12$ N/mm²

inwendig (lijf) $\beta \leq \beta_1$: class 1
 $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: class 2
 $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: class 3
 $\beta_3 < \beta$: class 4
 uitwendig (flens)

lijf = klasse 2

flens = klasse 2

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

Weerstand tegen het buigmoment

$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$ $M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_0 / \gamma_{M1}$ in iedere doorsnede

$\lambda_{M1} = 1,10$

$\lambda_{M2} = 1,25$

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

$M_{c,Rd} = \alpha * W_{el} * \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 249$ kNm >

154 kNm

voldoet

Tabel 6.4 – Waarden van de vormfactor α

Doorsnedeklasse	Geen lassen	Met langlassen
1	$W_{pl} / W_{el}^{*})$	$W_{pl, haz} / W_{el}^{*})$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl, haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff, haz} / W_{el}$

*) OPMERKING Deze formules zijn aan de veilige kant. Voor meer gedetailleerde waarden zijn aanbevelingen gegeven in bijlage F.

$$W_{pl} = 1,37E-03 \text{ m}^3 \quad W_{el} = 1,20E-03 \text{ m}^3 \quad a = 1,15$$

$$1195799 \text{ mm}^3$$

Het profiel voldoet voor het buigmoment

Weerstand tegen afschuiving

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} < 39 * \varepsilon \Rightarrow 25,33 < 43,6$$

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_0}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 545,86 \text{ kN} > 204,92 \text{ kN}$$

voldoet

$$A_V = \sum_{i=1}^n \left[\left(h_w - \sum d \right) * t_w - (1 - \rho_{0, haz}) * b_{haz} * (t_w) \right] = 5200 \text{ mm}^2$$

hw =	260 mm	(hoogte lijf tussen de flenzen)
d =	0 st	(diameter gaten in doorsneden)
tw =	20 mm	(dikte lijf)
n =	1 st	(aantal lijven)
$\rho_{(0, haz)}$ =	1	(hoogte HAZ - geen lassen=1)

Het profiel voldoet voor afschuiving

Combinatie buiging en afschuiving (enkel van toepassing bij kleine overspanningen)

buigspanning : 128,52 N/mm²

schuifspanning: 15,04 N/mm²

vergelijking spanning: 131,14 N/mm² OK 181,82 N/mm²

Torsie knik

$$h/b \leq 2 \Rightarrow 2$$

Geen torsie knik

Conclusie

Na deze berekening zien we dat het aluminium profiel voldoende bescherming heeft aan 40 mm rotswol om een REI 90 te behalen. Na 1 uur en 44 minuten zal de structuur bezwijken omdat het weerstandsmoment wordt overschreden.

gebruikte tabellen

Psi factor volgens NBN EN 1990

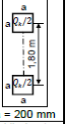
Tabel A1.1 — Aanbevolen waarden van ψ -factoren voor gebouwen

Belasting	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Voorgescreven belastingen in gebouwen, Categorie (zie EN 1991-1-1)			
Categorie A: woon-, verblijfsruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie B: kantoorruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie C: bijeenkomstruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie D: winkelruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie E: opslagruimtes	1,0	0,9	0,8
Categorie F: verkeersruimte, voertuiggewicht ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categorie G: verkeersruimte, 30 kN < voertuiggewicht ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categorie H: daken	0	0	0
Sneeuwbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-3)*			
Finland, IJsland, Noorwegen, Zweden	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H > 1000$ m boven de zeespiegel.	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H \leq 1000$ m boven de zeespiegel.	0,50	0,20	0
Windbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatuur (geen brand) in gebouwen (zie EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
OPMERKING De ψ -waarden kunnen zijn vastgesteld in de nationale bijlage.			
* Voor landen die hieronder niet zijn genoemd, zie de desbetreffende plaatselijke voorwaarden.			

Gevolgklasse volgens NBN EN 1990

Tabel B1 — Definitie van gevolgklassen

Gevolgklasse CC ¹⁾	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

Gebruiksklassen			Verticale belastingen			Horizontale belastingen				
			q_k [kN/m ²]	q_k [kN]	A (Q _v) [m ²]	q_k [kN/m]	Q_k [kN]	Q_k [kN]	A (Q _h) [m ²]	
Specifiek gebruik	Voorbeeld									
A	Zones voor huishoudelijke en residentiële activiteiten	Kamers in residentiële gebouwen en huizen; kamers en zalen in ziekenhuizen; slaapkamers in hotels en jeugdherbergen; keukens en toiletten	Vloeren	2,0	2,0	Vierkant met 50 mm breedte	0,5	1,0	0,5	
			Trappen	3,0	2,0					
			Balkons	4,0	2,0					
B	Kantoren		3,0 ⁽¹⁾	3,0			1,0	1,0	0,5	
C	Zones waar mensen kunnen samenkomen ²	C1 : Zones met tafels, enz.	Zones in scholen, cafés, restaurants, eetzalen, leeszalen, ontvangstruimtes	3,0 ⁽¹⁾	4,0 ⁽²⁾		Vierkant met 100 mm breedte	1,0	1,0	0,5
		C2 : Zones met vaste zitplaatsen	Zones in kerken, theaters, bioscopen, conferentiezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtzalen van de spoorwegen	4,0	4,0 ⁽²⁾					
		C3 : Zones zonder obstakels voor het verkeer van personen	Zones in musea, tentoonstellingsruimtes enz. en toegangszones in openbare en administratieve gebouwen, hotels, ziekenhuizen, voorpleinen van spoorwegstations	5,0	4,0					
		C4 : Zones waar lichamelijke activiteiten kunnen plaatsvinden	Danszalen, turnzalen, podia enz.	5,0 ⁽²⁾	7,0 ⁽³⁾					
		C5 : Zones waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden	Zones in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen, met inbegrip van slaantribunes, zittribunes en toegangszones, stationsperrons	5,0 ⁽⁴⁾	4,5					
D	D1 : Zones in gewone kleinhandelszaken D2 : Zones in grootwarenhuizen		5,0	4,0	Vierkant met 50 mm breedte		1,0	1,0	0,5	
			5,0	7,0						
E	E1 : Zones waar goederen kunnen worden gestapeld, inclusief toegangszones E2 : Industrieel gebruik	Zones voor opslag, inclusief opslag van boeken en andere documenten	7,5 ⁽⁶⁾	7,0	Vierkant met 50 mm breedte	2,0	1,0	0,5		
			5,0 ⁽⁶⁾	5,0						
F	Verkeers- en parkeerzones (≤ 30 kN totaal gewicht en ≤ 8 zitplaatsen zonder de chauffeur)	Garages, parkeerzones, parkeergarages...	2,5	20	 a = 100 mm a = 200 mm	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7				
G	Verkeers- en parkeerzones voor middelzware voertuigen (> 30 kN en ≤ 160 kN totaal gewicht, op 2 assen)	Toegangswegen; leveringszones; toegangszones voor brandweerwagens met een totaal gewicht ≤ 160 kN	5,0	90		Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7				
H	Daken enkel toegankelijk voor gewoon onderhoud en herstelling		0,8 ⁽⁵⁾	1,5	Vierkant met 50 mm breedte	-				
I	Toegankelijke daken van gebouwen met als activiteiten A tot G		Volgens klasse A-G							
K	Toegankelijke daken voor speciale diensten	Landingsplaatsen voor helikopters	Te bepalen (zie EN)							

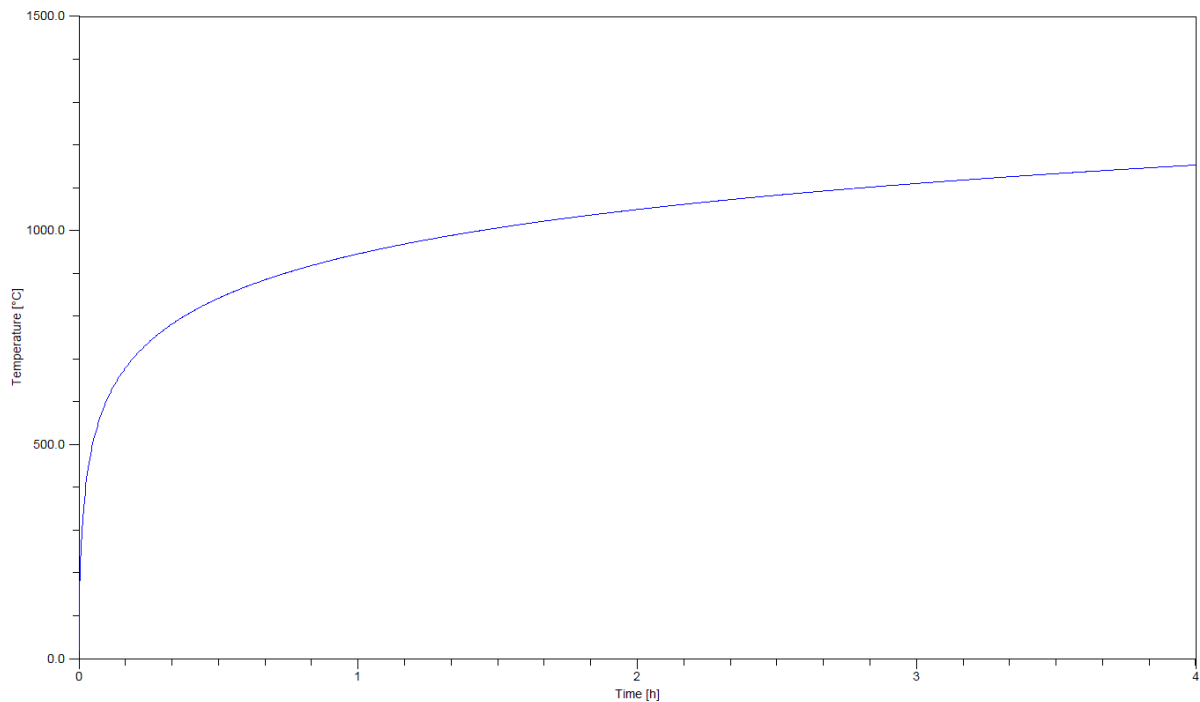
Profiel: Aluminium I-vormig profiel type 6106 T6 150x300 mm

Bijlage B: Grafieken

Voor de berekening in Bistra worden verschillende grafieken gebruikt. Deze grafieken zijn bekomen via ingenieur Cyriel Clauwaert of via Physibel tenzij anders vermeld. Data kan aangevuld zijn met behulp van technische fiches. Er wordt een onderscheid gemaakt in drie verschillende grafiek soorten. Het eerste type is de Txx grafiek. Deze grafiek vertegenwoordigt de temperatuurstijging per tijdseenheid. Hier wordt bepaald welke temperatuur krommen van toepassing is voor de berekening. De Lxx grafieken vertegenwoordigen de variërende lamda waarde. Wanneer een materiaal warm wordt veranderen zijn eigenschappen, hetzelfde geldt voor de lambda waarden. Per materiaal is hier een andere fysische oorzaak verantwoordelijk voor. Vervolgens zijn er de Cxx grafieken, deze vertegenwoordigen de verandering in specifieke warmte tijdens een brand. In het onderzoek zullen er meerdere soorten isolatie getest worden.

T01 standaardbrand kromme

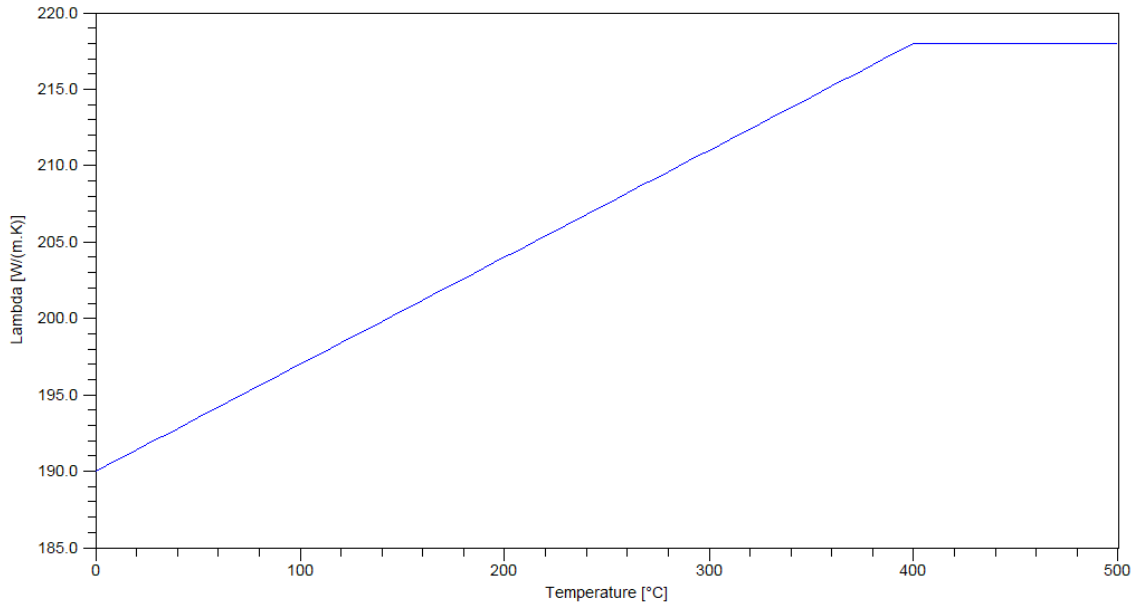
De 'T01' vertegenwoordigt de standaard brandkrommen zoals vermeld in de NBN EN 1991-1-2 [4]. Deze grafiek wordt gekoppeld aan de luchtlaag waar we de brand willen simuleren. Tijdens de berekening in Bistra zal het programma dus deze curve volgen om de buitenste luchtlaag op te warmen.



Figuur 1 T01 standaardbrand kromme volgens NBN EN 1991-2

L01 lambda waarde van aluminium in functie van de temperatuur

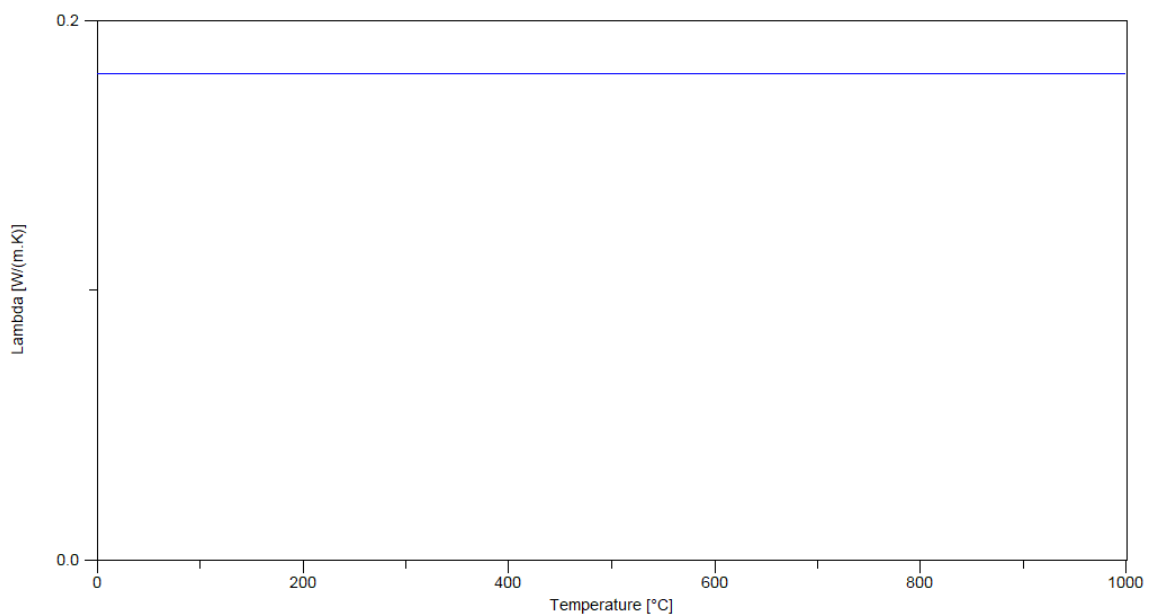
De lambda waarde van Aluminium kent een lichte stijging van zodra deze begint op te warmen. Dit heeft als voordeel dat het hoge temperaturen snellen zal wegleiden van de brand



Figuur 2 L02 Lambda waarde van aluminium

L02 lambda waarde van hout in functie van de temperatuur

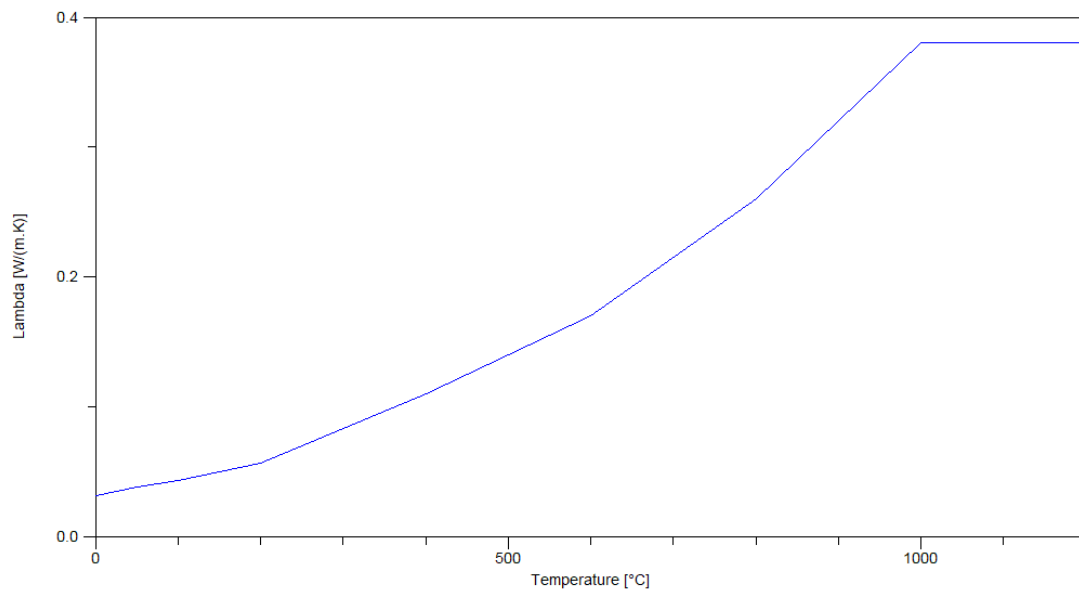
Hout wordt bij de masterproef gebruikt als vloerafwerking. Deze gaat geen meerwaarde leveren aan de simulatie maar word wel gemodelleerd voor de volledigheid.



Figuur 3 L02 Lambda waarde van hout

L03 lambda waarde van de Firemaster isolatie in functie van de temperatuur

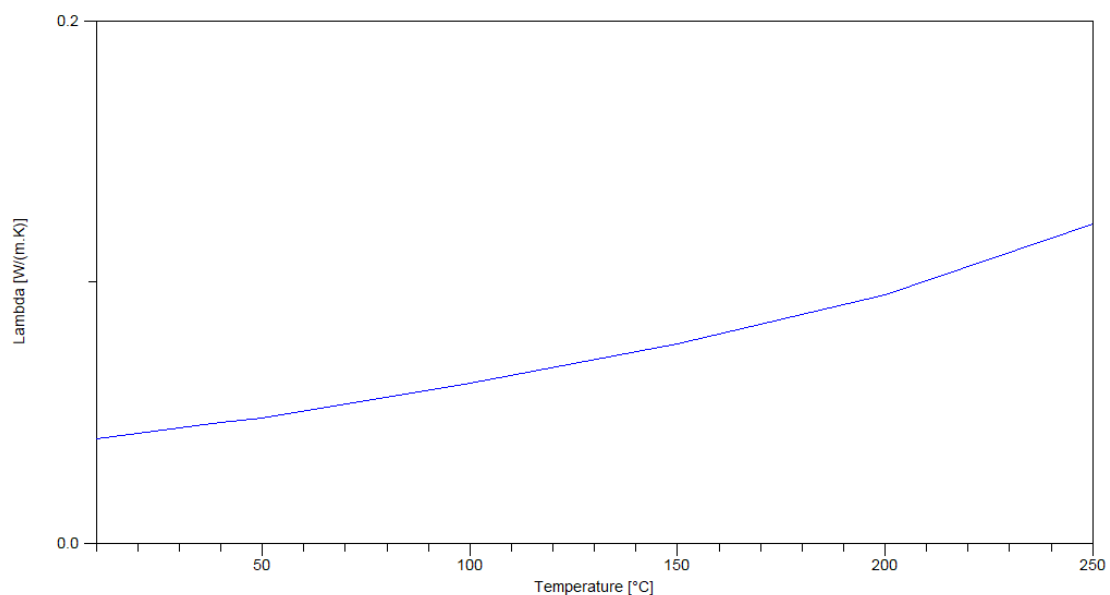
De lambda waarde van de Firemaster Marine Blanket Plus zal in het begin sterk stijgen. Dit is te danken aan de versintering van de brandwerend isolatie. Het materiaal begint samen te kruipen en wordt compacter, hierdoor vermindert de hoeveelheid opgesloten stilstaande lucht en zal als gevolg de lambda waarde stijgen.



Figuur 4 L03 Lambda waarde van Firemaster isolatie

L04 lambda waarde van rotswool isolatie in functie van de temperatuur

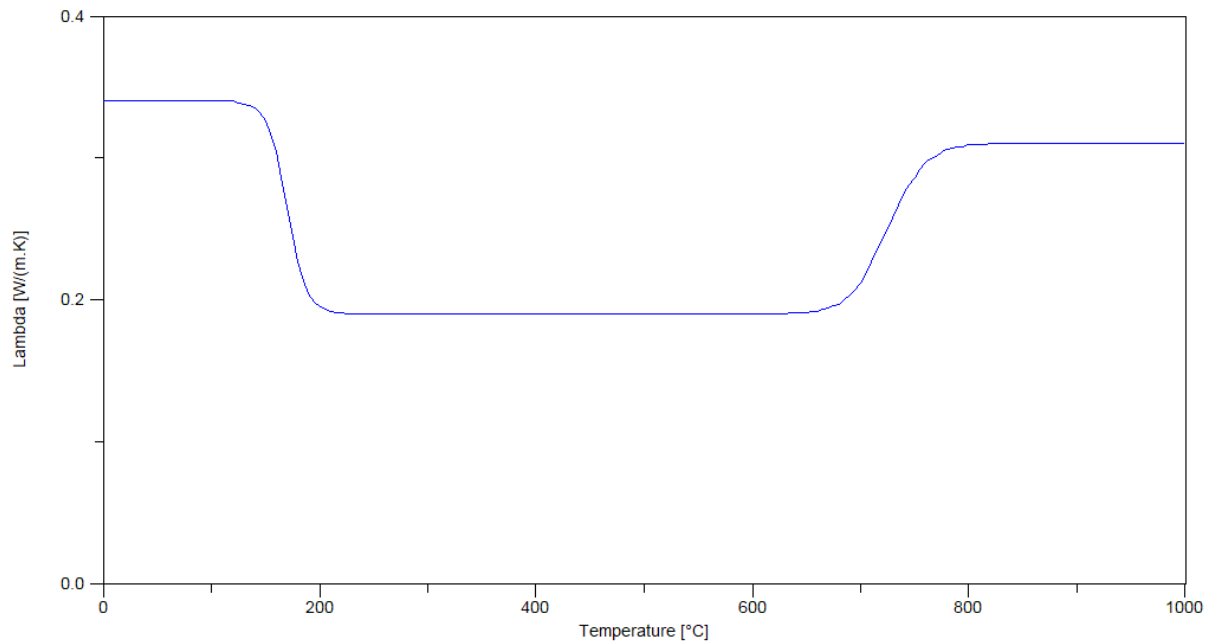
Hier hebben we hetzelfde proces als bij grafiek L03. Door het samentrekken van het materiaal zal de hoeveelheid opgesloten stilstaande lucht verminderen en dus zal de lambda waarde stijgen.



Figuur 5 L04 lambda waarde van rotswool

L05 lambda waarde van gyps/calciumsilicaat in functie van de temperatuur

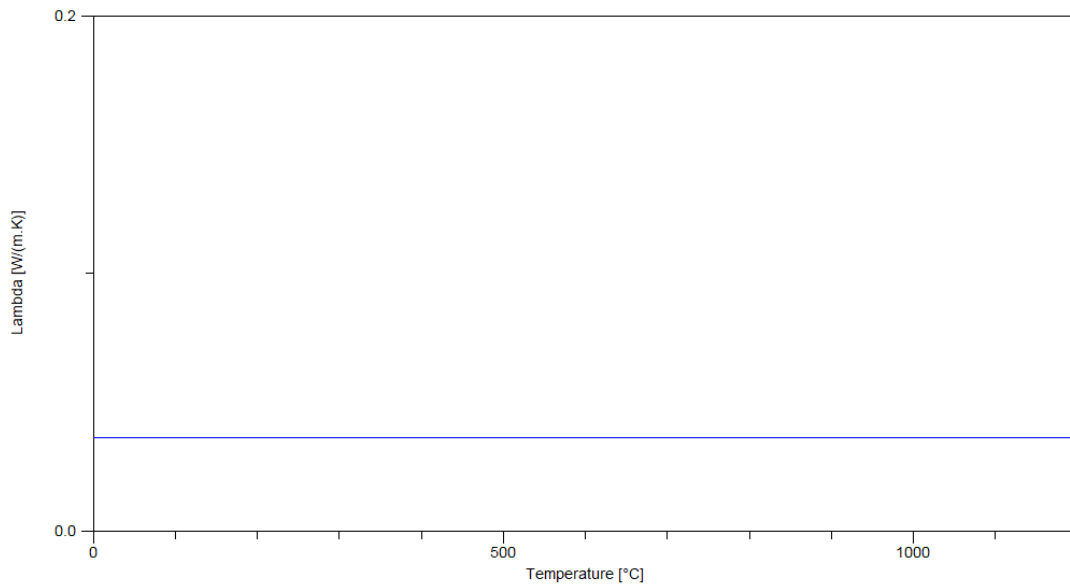
Bij de opwarming van Gyproc platen of calciumsilicaat panelen zal het kristal gebonden water in de platen beginnen condenseren vanaf 100°C. Deze condensatie zorgt ervoor dat er een thermisch plateau ontstaat. Hoe dikker de constructie hoe langer dit plateau zal duren. Van zodra al het kristalwater is weg verdampt zal de plaat terug zijn originele curve volgen.



Figuur 6 L05 lambda waarde van gypskarton

L06 lambda waarde van cellenglas in functie van de temperatuur

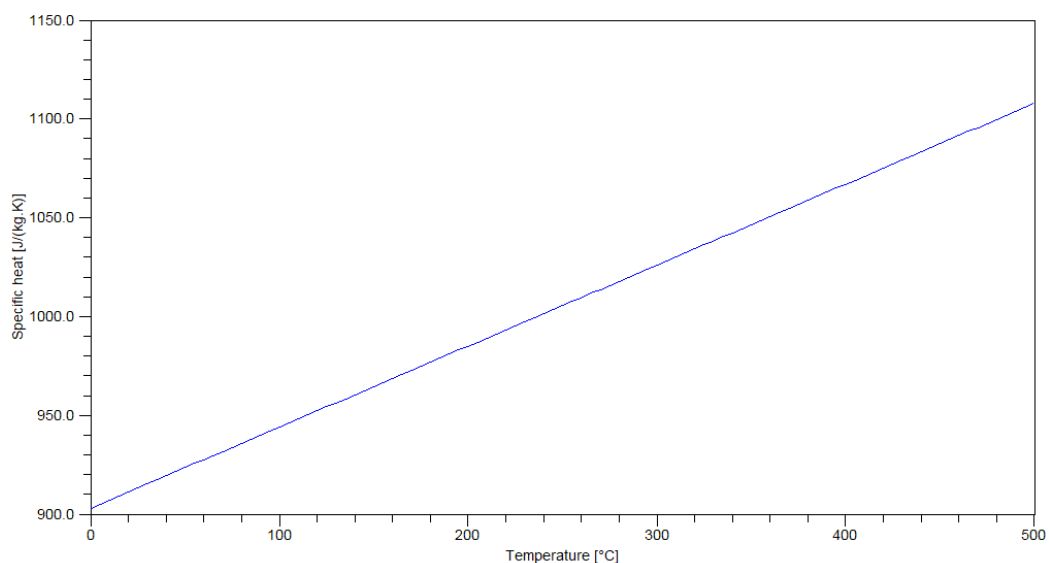
De lambda waarde van het Cellenglas wordt niet beïnvloed bij een brand. Wanneer het Cellenglas in contact komt met hoge temperaturen zal de buitenste laag smelten en een soort reflecterende glaslaag produceren. Deze reflecteert een groot deel van de hitte. Hierdoor blijft het materiaal achter deze smeltlaag goed beschermt.



Figuur 7 L06 lambda waarde van cellenglas

C01 specifieke warmte van aluminium in functie van de temperatuur

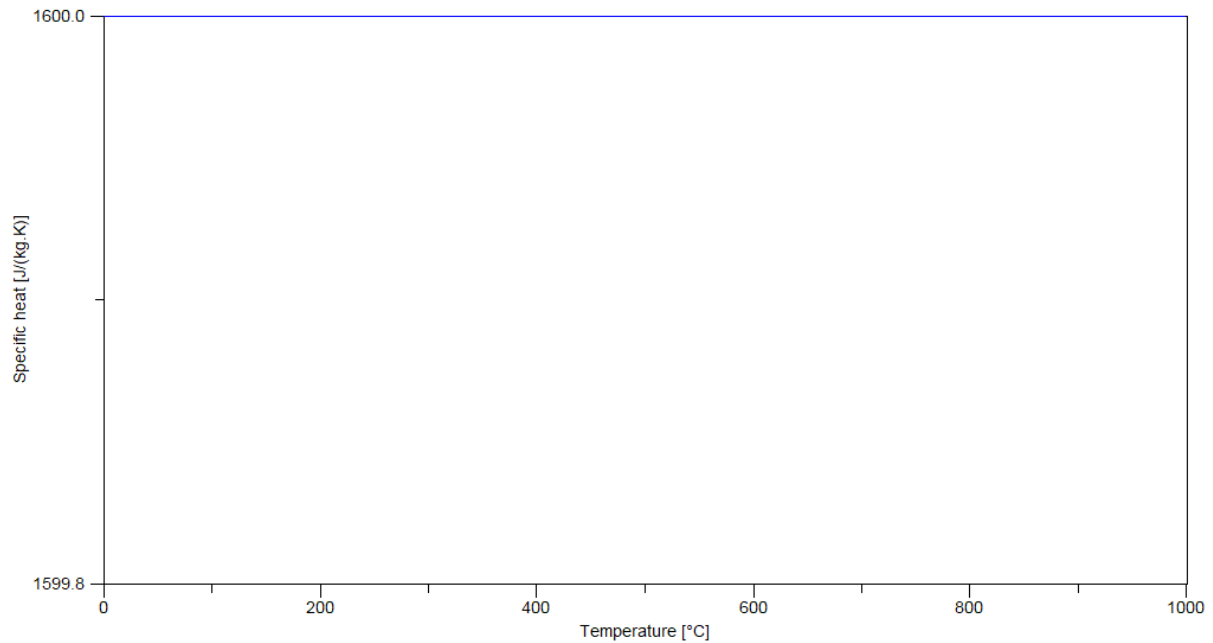
Ook bij de specifieke warmte zien we een stijging van de waarde. Wat logisch is, aangezien de warmte sneller weggeleid zal worden is er dus meer warmte nodig om een stukje van het materiaal met een graden Kelvin op te warmen.



Figuur 8 C01 specifieke warmte van aluminium

C02 specifieke warmte van hout in functie van de temperatuur

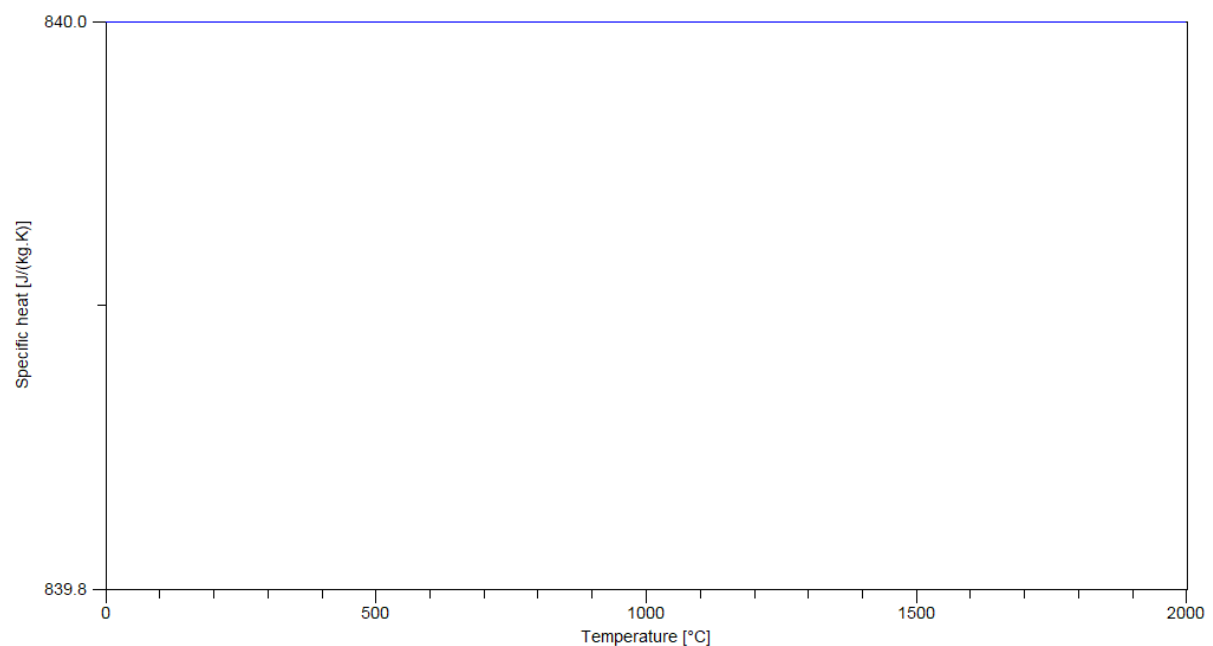
Hout wordt bij de masterproef gebruikt als vloerafwerking. Deze gaat geen meerwaarde leveren aan de simulatie maar wordt wel gemodelleerd voor de volledigheid.



Figuur 9 C02 specifieke warmte van hout

C03 specifieke warmte van Firemaster isolatie in functie van de temperatuur

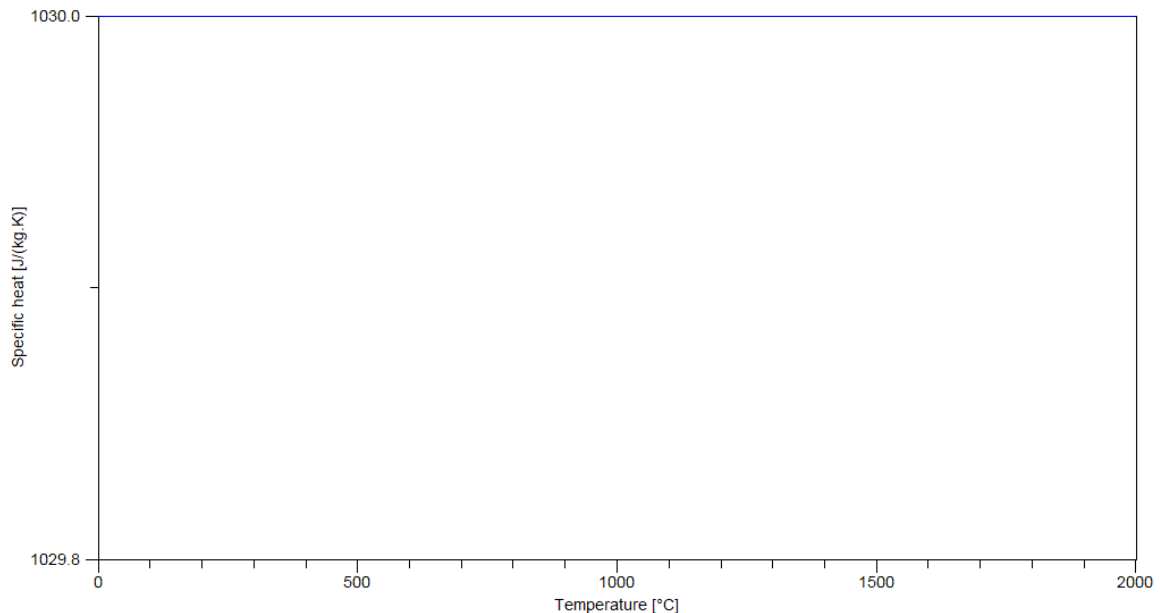
De specifieke warmte van dit isolatiemateriaal zal niet variëren tijdens de proef.



Figuur 10 C03 specifieke warmte van Firemaster isolatie

C04 specifieke warmte van rotswool isolatie in functie van de temperatuur

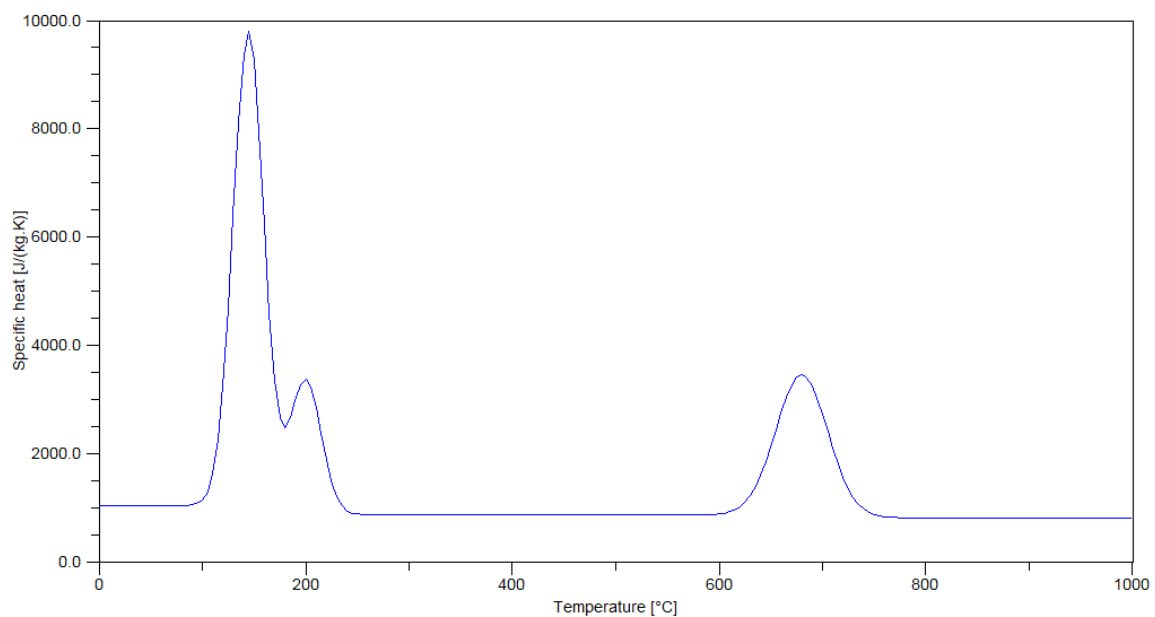
De specifieke warmte van dit isolatiemateriaal zal niet variëren tijdens de proef.



Figuur 11 C04 specifieke warmte van rotswol

C05 specifieke warmte van gyps/calciumsilicaat in functie van de temperatuur

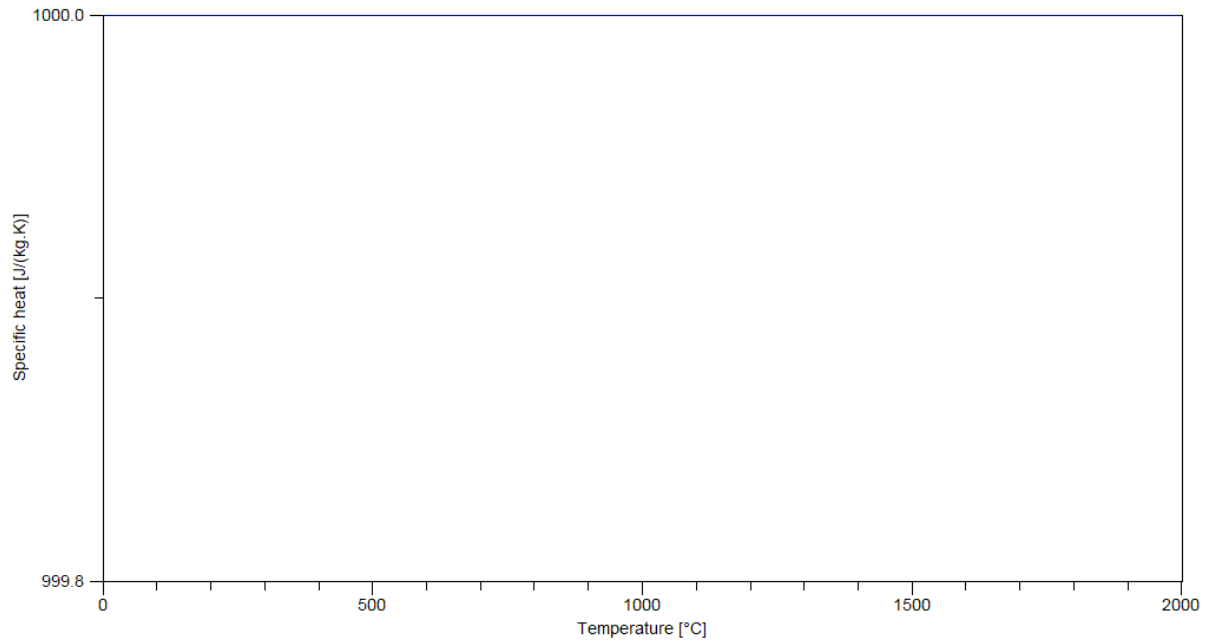
De specifieke warmte van Gyproc Zal tijdens de proef een sterke schommeling ondergaan. Dit is te danken aan het verdampen van het kristal gebonden water in de panelen. Wanneer deze panelen een 100°C bereiken zal dit water verdampen, doordat dit water dus uit de constructie gaat neemt de hoeveelheid energie die nodig is om het materiaal op te warmen toe.



Figuur 12 C05 specifieke warmte van gypskarton

C06 specifieke warmte van cellenglas in functie van de temperatuur

De specifieke warmte van dit isolatiemateriaal zal niet variëren tijdens de proef.

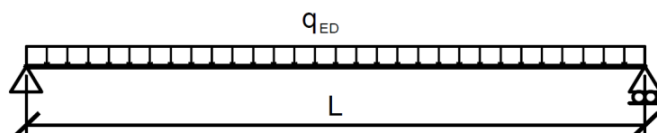


Figuur 13 C06 specifieke warmte van cellenglas

Bijlage C: Berekening van een aluminium I profiel bij brand

Dit excel tabblad dient voor de berekening van een aluminium I-vormig profiel scharnierend opgelegd op twee steunpunten. Gevolgklasse CC2 categorie A; woning. Er zal een bescherming van XX mm type XX worden aangebracht.

Gegevens: woning 2 kN/m² variabele belasting
1,5 m afstand tussen de liggers



input
berekend
overdracht

	L =	3 m		
UGT belasting	Q _{ED} =	136,61 kN/m	Klasse	CC2
BGT belasting	Q _D =	100,86 kN/m	γ _G	1,35
	eigengewicht	0,36 kN/m	γ _Q	1,5
	variabele belasting	3 kN/m	Q _{ed} =	4,5 kN/m
	vaste belasting	65 kN/m ²		
	vaste belasting lineair	97,5 kN/m	G _{ed} =	132,11 kN/m

CONTROLE BIJ OMGEVINGSTEMPERATUUR

UGT belasting	
steunpunt reacties	204,92 kN
Max moment	153,69 kNm
BGT belasting	BGT moment 113,47 kNm

Parameters aluminium profiel doorsnede en materiaal eigenschappen

Elasticiteitsmodulus E =	70000 N/mm ²
glijdingsmodulus G =	27000 N/mm ²
Coefficient van Poisson ν =	0,3
lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt	2,3E-05 per °C
volumieke massa ρ =	2700 kg/m ³

Bepaling I, W en δ

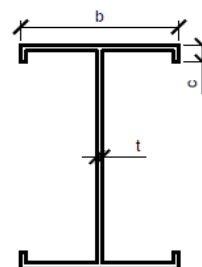
Naam van het profiel	I profiel met versterkte flenzen MP
hoogte	300 mm
dikte lijf	20 mm
breedte	150 mm
dikte flens	20 mm
hoogte verstijvers	50 mm

BGT Criterium doorbuiging	250
----------------------------------	------------

Max toegelaten doorbuiging 12 mm

Profiel krakteristieken bepaald in CAD pakket of andere

I =	179369824 mm ⁴	(AutoCAD)
W =	1195799 mm ³	symmetrisch
A =	13622 mm ²	(AutoCAD)
doorbuiging δ =	8,472250943 mm	voldoet BGT !
gewicht =	36,7794 kg	
gewicht profiel =	110,3382 kg	



Bepaling doorsnede klassificatie

β lijf = 13,00
 β flens = 3,75
 Legering **EN AW 6106 T6**
 $f_0 = 200$ N/mm²
 $f_u = 250$ N/mm²

Lege- ring EN- AW	Product vorm	Toestand	Dikte t mm 1) 3)	f_0 1)	f_u 1)	A 5) 2)	$f_{0, haz}$ 4)	$f_{u, haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)
				N/mm ²	%	N/mm ²	$\rho_{0, haz}$	$\rho_{u, haz}$				
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20

- β bepaling:
- a) vlakke inwendige doorsnededelen zonder spanningsgradiënt of vlakke staanders zonder spanningsgradiënt of piekcompressie bij de teen $\beta = b/t$
 - b) inwendige doorsnededelen met een spanningsgradiënt die resulteert in een neutrale as in het centrum $\beta = 0,40 b/t$
 - c) interne delen met spanningsgradiënt en uitsteeksels met piekcompressie bij wortel $\beta = \eta b/t$

Tabel 6.2 - Slankheidsparameters β_1/ϵ , β_2/ϵ en β_3/ϵ

Materiaalclassificatie volgens tabel 3.2	Inwendig deel			Uitwendig deel		
	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
Klasse A, zonder lassen	11	16	22	3	4,5	6
Klasse A, met lassen	9	13	18	2,5	4	5
Klasse B, zonder lassen	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Klasse B, met lassen	10	13,5	15	3	3,5	4

$\epsilon = \sqrt{250/f_0}$, f_0 in N/mm²

$\epsilon = 1,12$ N/mm²

inwendig (lijf) $\beta \leq \beta_1$: class 1
 $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: class 2
 $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: class 3
 $\beta_3 < \beta$: class 4
 uitwendig (flens)

lijf = klasse 2

flens = klasse 2

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

Weerstand tegen het buigmoment

$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$ $M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_0 / \gamma_{M1}$ in iedere doorsnede

$\gamma_{M1} = 1,10$

$\gamma_{M2} = 1,25$

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

$M_{c,Rd} = \alpha * W_{el} * \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 249$ kNm >

154 kNm **voldoet**

Tabel 6.4 – Waarden van de vormfactor α

Doorsnedeklasse	Geen lassen	Met langlassen
1	$W_{pl} / W_{el}^{*)}$	$W_{pl,haz} / W_{el}^{*)}$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$

*) OPMERKING Deze formules zijn aan de veilige kant. Voor meer gedetailleerde waarden zijn aanbevelingen gegeven in bijlage F.

$$W_{pl} = 1,37E-03 \text{ m}^3 \quad W_{el} = 1,20E-03 \text{ m}^3 \quad a = 1,15$$

$$1195799 \text{ mm}^3$$

Het profiel voldoet voor het buigmoment

Weerstand tegen afschuiving

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} < 39 * \varepsilon \Rightarrow 25,33 < 43,6$$

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_0}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 545,86 \text{ kN} > 204,92 \text{ kN} \quad \text{voldoet}$$

$$A_V = \sum_{i=1}^n \left[\left(h_w - \sum d \right) * t_w - (1 - \rho_{0,haz}) * b_{haz} * (t_w) \right] = 5200 \text{ mm}^2$$

hw =	260 mm	(hoogte lijf tussen de flenzen)
d =	0 st	(diameter gaten in doorsneden)
tw =	20 mm	(dikte lijf)
n =	1 st	(aantal lijven)
$\rho_{(0,haz)}$ =	1	(hoogte HAZ - geen lassen=1)

Het profiel voldoet voor afschuiving

Combinatie buiging en afschuiving (enkel van toepassing bij kleine overspanningen)

buigspanning : 128,52 N/mm²

schuifspanning: 15,04 N/mm²

vergelijking spanning: 131,14 N/mm² OK 181,82 N/mm²

Torsie knik

$$h/b \leq 2 \Rightarrow 2$$

Geen torsie knik

Benodigde W en I waarde omgevingstemperatuur en besluit

BELASTING onder UGT en BGT			Ratio
W	845287,2944 mm ³	profiel voldoet	71%
I	126638846,71 mm ⁴	profiel voldoet	71%

CONTROLE VAN HET ONTWERP BIJ BRAND en BEPALING BRANDWEERSTAND

Type gebouw volgens NBN EN 1990 tabel A1.1: A keuze PS PSI 1 = 0,5 PSI 2 = 0,3
aangenomen PSI waarde: 0,3

UGT belasting **98,76** kN/m maatgevend

Max moment bij brand **111,11** kNm

Benodigde W waarde bij aanvang van de brand

W **611082** mm³ profiel voldoet

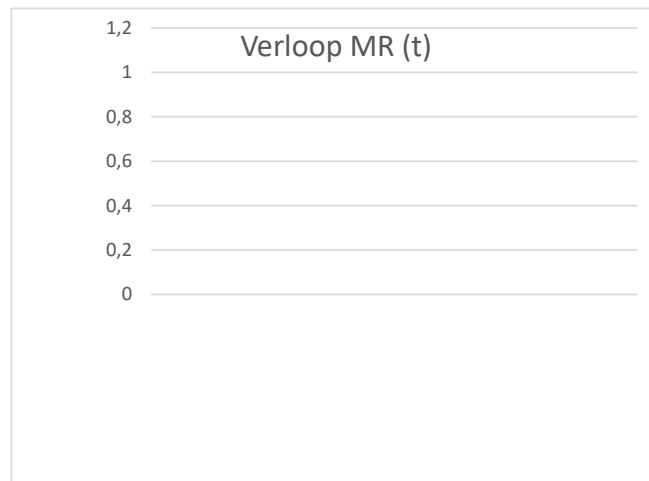
Ratio **51%**

Berekend weerstand biedend moment aan de hand van een thermische simulatie

Omschrijving

tijd	Weerstandbiedend moment
	kNm
	kNm
	kNm
	kNm
	kNm
	kNm
	kNm
AFGELEIDE BRANDWEERSTAND	

kies in tabel grenzen !



Conclusie

Na deze berekening zien we dat het aluminium profiel onvoldoende/voldoende bescherming heeft aan XX mm type XX (om een REI XX te behalen. Na XX minuten zal de structuur bezwijken omdat het weerstandsmoment wordt overschreden.)

gebruikte tabellen

Psi factor volgens NBN EN 1990

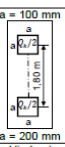
Tabel A1.1 — Aanbevolen waarden van ψ -factoren voor gebouwen

Belasting	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Voorgescreven belastingen in gebouwen, Categorie (zie EN 1991-1-1)			
Categorie A: woon-, verblijfsruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie B: kantoorruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie C: bijeenkomstruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie D: winkelruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie E: opslagruimtes	1,0	0,9	0,8
Categorie F: verkeersruimte, voertuiggewicht ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categorie G: verkeersruimte, 30 kN < voertuiggewicht ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categorie H: daken	0	0	0
Sneeuwbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-3)*			
Finland, IJsland, Noorwegen, Zweden	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H > 1000$ m boven de zeespiegel.	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H \leq 1000$ m boven de zeespiegel.	0,50	0,20	0
Windbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatuur (geen brand) in gebouwen (zie EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
OPMERKING De ψ -waarden kunnen zijn vastgesteld in de nationale bijlage.			
* Voor landen die hieronder niet zijn genoemd, zie de desbetreffende plaatselijke voorwaarden.			

Gevolgklasse volgens NBN EN 1990

Tabel B1 — Definitie van gevolgklassen

Gevolgklasse CC ¹⁾	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

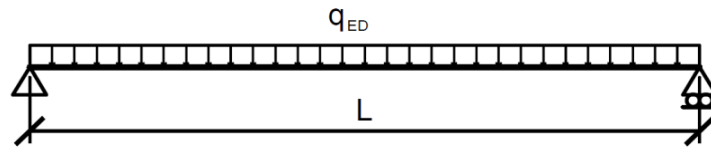
Gebruiksklassen			Verticale belastingen			Horizontale belastingen				
			q_k [kN/m ²] <small>(1)</small>	Q_k [kN]	A (Q _k)	q_k [kN/m] <small>(1)</small>	Q_k [kN] <small>(2)</small>	Q_k [kN] <small>(3)</small>	Q_k [kN] <small>(4)</small>	A (Q _k)
Specifiek gebruik	Voorbeeld									
A Zones voor huishoudelijke en residentiële activiteiten	Kamers in residentiële gebouwen en huizen; kamers en zalen in ziekenhuizen; slaapkamers in hotels en jeugdherbergen; keukens en toiletten	Vloeren	2,0	2,0	Vierkant met 50 mm breedte	0,5	1,0	0,5	Vierkant met 100 mm breedte	
		Trappen	3,0	2,0						
		Balkons	4,0	2,0						
B Kantoren			3,0 ⁽¹⁾	3,0		1,0	1,0	0,5		
C Zones waar mensen kunnen samenkomen ^(*)	C1 : Zones met tafels, enz.	Zones in scholen, cafés, restaurants, eetzalen, leeszalen, ontvangstruimtes	3,0 ⁽¹⁾	4,0 ⁽²⁾		Vierkant met 100 mm breedte	1,0	1,0		0,5
	C2 : Zones met vaste zitplaatsen	Zones in kerken, theaters, bioscopen, conferentiezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtzalen van de spoorwegen	4,0	4,0 ⁽²⁾						
	C3 : Zones zonder obstakels voor het verkeer van personen	Zones in musea, tentoonstellingsruimtes enz. en toegangszones in openbare en administratieve gebouwen, hotels, ziekenhuizen, voorpleinen van spoorwegstations	5,0	4,0						
	C4 : Zones waar lichamelijke activiteiten kunnen plaatsvinden	Danszalen, turnzalen, podia enz.	5,0 ⁽²⁾	7,0 ⁽³⁾						
	C5 : Zones waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden	Zones in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen, met inbegrip van slaantribunes, zittribunes en toegangszones, stationsperrons	5,0 ⁽⁴⁾	4,5						
D D1 : Zones in gewone kleinhandelzaken D2 : Zones in grootwarenhuizen			5,0	4,0		Vierkant met 50 mm breedte	1,0	1,0		0,5
E E1 : Zones waar goederen kunnen worden gestapeld, inclusief toegangszones E2 : Industrieel gebruik	Zones voor opslag, inclusief opslag van boeken en andere documenten		7,5 ⁽¹⁶⁾	7,0						
F Verkeers- en parkeerzones (≤ 30 kN totaal gewicht en ≤ 8 zitplaatsen zonder de chauffeur)	Garages, parkeerzones, parkeergarages...		2,5	20	 a = 100 mm	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7				
			5,0	90					a = 200 mm	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7
H Daken enkel toegankelijk voor gewoon onderhoud en herstelling			0,8 ⁽⁵⁾	1,5	Vierkant met 50 mm breedte	-				
I Toegankelijke daken van gebouwen met als activiteiten A tot G			Volgens Klasse A-G							
K Toegankelijke daken voor speciale diensten	Landingsplaatsen voor helikopters		Te bepalen (zie EN)							

Profiel: Aluminium I-vormig profiel type 6106 T6 150x300 mm

Bijlage C: Berekening van een aluminium I profiel bij brand

Dit Excel tabblad dient voor de berekening van een aluminium I-vormig profiel scharnierend opgelegd op twee steunpunten. Gevolgklasse CC2 categorie A; woning. Er zal een bescherming van 40 mm rockwol worden aangebracht.

Gegevens: **woning** 2 kN/m² variabele belasting
1,5 m afstand tussen de liggers



input
berekend
overdracht

	L =	3 m		
UGT belasting	$Q_{ED} =$	136,61 kN/m	Klasse	CC2
BGT belasting	$Q_D =$	100,86 kN/m	γ_G	1,35
	eigengewicht	0,36 kN/m	γ_Q	1,5
	variabele belasting	3 kN/m	$Q_{ed} =$	4,5 kN/m
	vaste belasting	65 kN/m ²		
	vaste belasting lineair	97,5 kN/m	$G_{ed} =$	132,11 kN/m

CONTROLE BIJ OMGEVINGSTEMPERATUUR

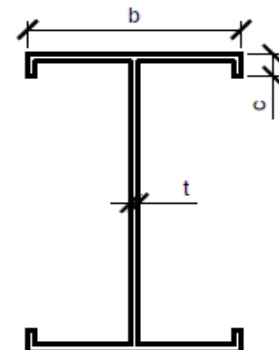
UGT belasting		
	steunpunt reacties	204,92 kN
	Max moment	153,69 kNm
BGT belasting		
	BGT moment	113,47 kNm

Parameters aluminium profiel doorsnede en materiaal eigenschappen

Elasticiteitsmodulus E =	70000 N/mm ²
glijdingsmodulus G =	27000 N/mm ²
Coefficient van Poisson $\nu =$	0,3
lineaire thermische uitzettingscoefficient	0,000023 per °C
volumieke massa $\rho =$	2700 kg/m ³

Bepaling I, W en δ

Naam van het profiel	I profiel met versterkte flenzen MP	
hoogte	300 mm	
dikte lijf	15 mm	
breedte	150 mm	
dikte flens	20 mm	
hoogte verstijvers	50 mm	
BGT Criterium doorbuiging	250	
Max toegelaten doorbuiging	12 mm	
Profiel krakeristieken bepaald in CAD pakket of andere		
I =	172046491 mm ⁴	(AutoCAD)
W =	1146977 mm ³	symmetrisch
A =	13622 mm ²	(AutoCAD)



Rekennota 1: 40mm Rockwool

doorbuiging $\delta = 8,832880878$ mm voldoet BGT !
 gewicht = 36,7794 kg
 gewicht profiel = 110,3382 kg

Bepaling doorsnede classificatie

β lijf = 6,93 Legering **EN AW 6106 T6**
 β flens = 3,75 $f_0 = 200$ N/mm²
 $f_u = 250$ N/mm²

Lege- ring EN- AW	Product vorm	Toestand	Dikte t mm 1) 3)	f_0 1)	f_u 1)	A 5) 2)	$f_{0,haz}$ 4)	$f_{u,haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)
				N/mm ²		%	N/mm ²		$\rho_{0,haz}$	$\rho_{0,haz}$		
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20

- β bepaling:
- a) vlakke inwendige doorsnededelen zonder spanningsgradiënt of vlakke standers zonder spanningsgradiënt of piekcompressie bij de teen $\beta = b/t$
 - b) inwendige doorsnededelen met een spanningsgradiënt die resulteert in een neutrale as in het centrum $\beta = 0,40 b/t$
 - c) interne delen met spanningsgradiënt en uitsteeksels met piekcompressie bij wortel $\beta = \eta b/t$

Tabel 6.2 - Slankheidsparameters β_1/ϵ , β_2/ϵ en β_3/ϵ

Materiaalclassificatie volgens tabel 3.2	Inwendig deel			Uitwendig deel		
	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
Klasse A, zonder lassen	11	16	22	3	4,5	6
Klasse A, met lassen	9	13	18	2,5	4	5
Klasse B, zonder lassen	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Klasse B, met lassen	10	13,5	15	3	3,5	4

$\epsilon = \sqrt{250/f_0} \cdot f_0$ in N/mm²

$\epsilon = 1,12$ N/mm²

inwendig (lijf) $\beta \leq \beta_1$: class 1 uitwendig (flens)
 $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: class 2
 $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: class 3
 $\beta_3 < \beta$: class 4

Volgens SCIA Engineer klasse 1

lijf = klasse 2

flens = klasse 2

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

Weerstand tegen het buigmoment

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_o / \gamma_{M1} \text{ in iedere doorsnede}$$

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

$$M_{c,Rd} = \alpha * W_{el} * \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 249 \text{ kNm} >$$

$$154 \text{ kNm}$$

voldoet

Tabel 6.4 – Waarden van de vormfactor α

Doorsnedeklasse	Geen lassen	Met langlassen
1	$W_{pl} / W_{el}^{*)}$	$W_{pl,haz} / W_{el}^{*)}$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$

*) OPMERKING Deze formules zijn aan de veilige kant. Voor meer gedetailleerde waarden zijn aanbevelingen gegeven in bijlage F.

$$W_{pl} = 1,37E-03 \text{ m}^3$$

$$W_{el} = 1,15E-03 \text{ m}^3$$

$$1146977 \text{ mm}^3$$

$$a = 1,19$$

Het profiel voldoet voor het buigmoment

Weerstand tegen afschuiving

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} < 39 * \epsilon \Rightarrow 25,33 < 43,6$$

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_o}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 409,39 \text{ kN} >$$

$$204,92 \text{ kN}$$

voldoet

$$A_V = \sum_{i=1}^n \left[\left(h_w - \sum d \right) * t_w - (1 - \rho_{0,haz}) * b_{haz} * (t_w) \right] = 3900 \text{ mm}^2$$

- hw = 260 mm (hoogte lijf tussen de flenzen)
- d = 0 st (diameter gaten in doorsneden)
- tw = 15 mm (dikte lijf)
- n = 1 st (aantal lijven)
- $\rho_{(0,haz)}$ = 1 (hoogte HAZ - geen lassen=1)

Het profiel voldoet voor afschuiving

Combinatie buiging en afschuiving (enkel van toepassing bij kleine overspanningen)

- buigspanning : 133,99 N/mm²
- schuifspanning: 15,04 N/mm²

vergelijking spanning: 136,50 N/mm² OK

$$181,82 \text{ N/mm}^2$$

Torsie knik

$$h/b \leq 2 \Rightarrow 2$$

Geen torsie knik

Rekennota 1: 40mm Rockwool

Conclusie

Na deze berekening zien we dat het aluminium profiel voldoende bescherming heeft aan 40 mm rotswol om een REI 90 te behalen. Na 1 uur en 44 minuten zal de structuur bezwijken omdat het weerstandsmoment wordt overschreden.

gebruikte tabellen

Psi factor volgens NBN EN 1990

Tabel A1.1 — Aanbevolen waarden van ψ -factoren voor gebouwen



Belasting	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Voorgescreven belastingen in gebouwen, Categorie (zie EN 1991-1-1)			
Categorie A: woon-, verblijfsruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie B: kantoorruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie C: bijeenkomstruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie D: winkelruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie E: opslagruimtes	1,0	0,9	0,8
Categorie F: verkeersruimte, voertuiggewicht ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categorie G: verkeersruimte, 30 kN $<$ voertuiggewicht ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categorie H: daken	0	0	0
Sneeuwbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-3)*			
Finland, IJsland, Noorwegen, Zweden	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H > 1000$ m boven de zeespiegel.	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H \leq 1000$ m boven de zeespiegel.	0,50	0,20	0
Windbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatuur (geen brand) in gebouwen (zie EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
OPMERKING De ψ -waarden kunnen zijn vastgesteld in de nationale bijlage.			
* Voor landen die hieronder niet zijn genoemd, zie de desbetreffende plaatselijke voorwaarden.			

Gevolgklasse volgens NBN EN 1990

Tabel B1 — Definitie van gevolgklassen

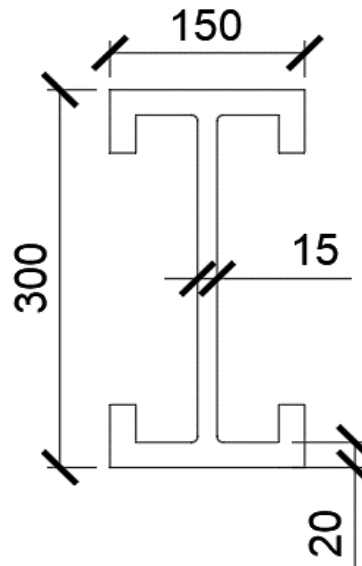
Gevolgklasse CC ¹⁾	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

Rekennota 1: 40mm Rockwool

Gebruiksklassen		Verticale belastingen			Horizontale belastingen				
		q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	A (Q _k) [m ²]	q_k [kN/m]	Q_k [kN]	Q_k [kN]	A (Q _k) [m ²]	
Specifiek gebruik	Voorbeeld								
A Zones voor huishoudelijke en residentiële activiteiten	Kamers in residentiële gebouwen en huizen; kamers en zalen in ziekenhuizen; slaapkamers in hotels en jeugdherbergen; keukens en toiletten	Vloeren	2,0	2,0	Vierkant met 50 mm breedte	0,5	1,0	0,5	
		Trappen	3,0	2,0					
		Balkons	4,0	2,0					
B Kantoren		3,0 ⁽¹⁾	3,0		1,0	1,0	0,5	Vierkant met 100 mm breedte	
C Zones waar mensen kunnen verzamelen ⁽⁸⁾	C1 : Zones met tafels, enz.	Zones in scholen, cafés, restaurants, eetzalen, leeszalen, ontvangstruimtes	3,0 ⁽¹⁾	4,0 ⁽¹²⁾	Vierkant met 50 mm breedte	1,0	1,0		0,5
	C2 : Zones met vaste zitplaatsen	Zones in kerken, theaters, bioscopen, conferentiezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtzalen van de spoorwegen	4,0	4,0 ⁽¹²⁾					
	C3 : Zones zonder obstakels voor het verkeer van personen	Zones in musea, tentoonstellingsruimtes enz. en toegangszones in openbare en administratieve gebouwen, hotels, ziekenhuizen, voorpleinen van spoorwegstations	5,0	4,0					
	C4 : Zones waar lichamelijke activiteiten kunnen plaatsvinden	Danszalen, turnzalen, podia enz.	5,0 ⁽²⁾	7,0 ⁽³⁾					
	C5 : Zones waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden	Zones in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen, met inbegrip van staantribunes, zittribunes en toegangszones, stationsperrons	5,0 ⁽⁴⁾	4,5					
D D1 : Zones in gewone kleinhandelszaken D2 : Zones in grootwarenhuizen		5,0	4,0		1,0	1,0	0,5		
E E1 : Zones waar goederen kunnen worden gestapeld, inclusief toegangszones E2 : Industrieel gebruik	Zones voor opslag, inclusief opslag van boeken en andere documenten	7,5 ⁽¹⁰⁾	7,0	Vierkant met 50 mm breedte	2,0	1,0	0,5		
		5,0 ⁽¹⁰⁾	5,0						
F Verkeers- en parkeerzones (≤ 30 kN totaal gewicht en ≤ 8 zitplaatsen zonder de chauffeur)	Garages, parkeerzones, parkeergarages...	2,5	20	a = 100 mm 	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7				
G Verkeers- en parkeerzones voor middelzware voertuigen (> 30 kN en ≤ 160 kN totaal gewicht, op 2 assen)	Toegangswegen; leveringszones; toegangszones voor brandweerwagens met een totaal gewicht ≤ 160 kN	5,0	90	 a = 200 mm	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7				
H Daken enkel toegankelijk voor gewoon onderhoud en herstelling		0,8 ⁽⁵⁾	1,5	Vierkant met 50 mm breedte	-				
I Toegankelijke daken van gebouwen met als activiteiten A tot G		Volgens klasse A-G							
K Toegankelijke daken voor speciale diensten	Landingsplaatsen voor helikopters	Te bepalen (zie EN)							

Profiel: Aluminium I-vormig profiel type 6106 T6 150x300 mm

Area: 12321.46
 Perimeter: 1401.42
 Bounding box: X: -75.00 -- 75.00
 Y: 0.00 -- 300.00
 Centroid: X: 0.00
 Y: 150.00
 Moments of inertia: X: 449279345.29
 Y: 21544737.28
 Product of inertia: XY: 0.00
 Radii of gyration: X: 190.95
 Y: 41.82
 Principal moments and X-Y directions about centroid:
 I: 172046491.16 along [1.00 0.00]
 J: 21544737.28 along [0.00 1.00]



Doorsnedeklasse volgens SCIA Engineer

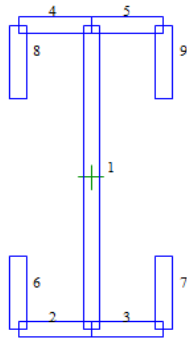
Classificatie en Effectieve doorsnede

INVOER TYPE

- Spanning N+
- Druk N-
- Buiging My+
- Buiging My-
- Buiging Mz+
- Buiging Mz-

HAZ-verzachting
ρ,0,haz

Iteratiestappen weergeven
1



Invoer
Invoertype: Buiging My-
HAZ-verzachting: ρ,0,haz

fo [N/mm ²]	fo,haz [N/mm ²]	po,haz [-]	fu [N/mm ²]	fu,haz [N/mm ²]	pu,haz [-]	ε [-]
110,0	100,0	0,91	205,0	160,0	0,78	1,51

Classificatie volgens EN 1999-1-1 artikel 6.1.4

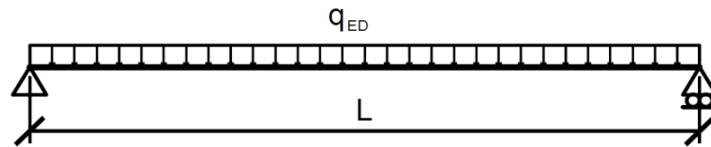
ld	Type	σ1 [N/mm ²]	σ2 [N/mm ²]	ψ [-]	β [-]	β1 [-]	β2 [-]	β3 [-]	Klasse
1	I	9,259e-04	-9,259e-04	-1,000	7,467	19,598	24,875	27,136	1
2	I	9,259e-04	9,259e-04	1,000	4,333	19,598	24,875	27,136	1
3	I	9,259e-04	9,259e-04	1,000	4,333	19,598	24,875	27,136	1
4	I	-9,259e-04	-9,259e-04	0,000	-1,000	19,598	24,875	27,136	1
5	I	-9,259e-04	-9,259e-04	0,000	-1,000	19,598	24,875	27,136	1
6	UO	9,259e-04	4,795e-04	0,518	3,849	5,276	6,784	7,538	1
7	UO	9,259e-04	4,795e-04	0,518	3,849	5,276	6,784	7,538	1
8	UO	-9,259e-04	-4,795e-04	0,000	-1,000	5,276	6,784	7,538	1
9	UO	-9,259e-04	-4,795e-04	0,000	-1,000	5,276	6,784	7,538	1

De doorsnede is geclassificeerd als klasse 1

Bijlage C: Berekening van een aluminium I profiel bij brand

Dit Excel tabblad dient voor de berekening van een aluminium I-vormig profiel scharnierend opgelegd op twee steunpunten. Gevolgklasse CC2 categorie A; woning. Er zal een bescherming van 2 maal 15mm Rf Gyproc worden voorzien.

Gegevens: woning 2 kN/m² variabele belasting
1,5 m afstand tussen de liggers



input
berekend
overdracht

	L =	3 m		
UGT belasting	$Q_{ED} =$	136,61 kN/m	Klasse	CC2
BGT belasting	$Q_D =$	100,86 kN/m	γ_G	1,35
	eigengewicht	0,36 kN/m	γ_Q	1,5
	variabele belasting	3 kN/m	$Q_{ed} =$	4,5 kN/m
	vaste belasting	65 kN/m ²		
	vaste belasting lineair	97,5 kN/m	$G_{ed} =$	132,11 kN/m

CONTROLE BIJ OMGEVINGSTEMPERATUUR

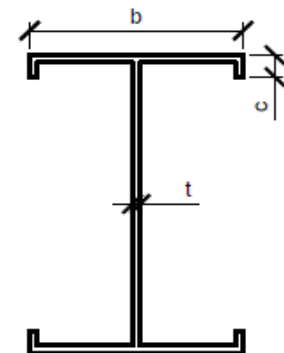
UGT belasting		
	steunpunt reacties	204,92 kN
	Max moment	153,69 kNm
BGT belasting		
	BGT moment	113,47 kNm

Parameters aluminium profiel doorsnede en materiaal eigenschappen

Elasticiteitsmodulus E =	70000 N/mm ²
glijdingsmodulus G =	27000 N/mm ²
Coefficient van Poisson $\nu =$	0,3
lineaire thermische uitzettingscoefficient	0,000023 per °C
volumieke massa $\rho =$	2700 kg/m ³

Bepaling I, W en δ

Naam van het profiel	I profiel met versterkte flenzen MP	
hoogte	300 mm	
dikte lijf	15 mm	
breedte	150 mm	
dikte flens	20 mm	
hoogte verstijvers	50 mm	
BGT Criterium doorbuiging	250	
Max toegelaten doorbuiging	12 mm	
Profiel krakeristieken bepaald in CAD pakket of andere		
I =	172046491 mm ⁴	(AutoCAD)
W =	1146977 mm ³	symmetrisch
A =	13622 mm ²	(AutoCAD)



Rekennota 2: 2 x 15mm Rf Gyproc

doorbuiging $\delta = 8,832880878$ mm voldoet BGT !
 gewicht = 36,7794 kg
 gewicht profiel = 110,3382 kg

Bepaling doorsnede classificatie

Legering EN AW 6106 T6
 β lijf = 6,93 $f_0 = 200$ N/mm²
 β flens = 3,75 $f_u = 250$ N/mm²

Lege- ring EN- AW	Product vorm	Toestand	Dikte t mm 1) 3)	f_o 1)	f_u 1)	A 5) 2)	$f_{o,haz}$ 4)	$f_{u,haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)
				N/mm ²		%	N/mm ²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20

- β bepaling:
- a) vlakke inwendige doorsnededelen zonder spanningsgradiënt of vlakke standers zonder spanningsgradiënt of piekcompressie bij de teen $\beta = b/t$
 - b) inwendige doorsnededelen met een spanningsgradiënt die resulteert in een neutrale as in het centrum $\beta = 0,40 b/t$
 - c) interne delen met spanningsgradiënt en uitsteeksels met piekcompressie bij wortel $\beta = \eta b/t$

Tabel 6.2 - Slankheidsparameters β_1/ϵ , β_2/ϵ en β_3/ϵ

Materiaalclassificatie volgens tabel 3.2	Inwendig deel			Uitwendig deel		
	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ	β_1/ϵ	β_2/ϵ	β_3/ϵ
Klasse A, zonder lassen	11	16	22	3	4,5	6
Klasse A, met lassen	9	13	18	2,5	4	5
Klasse B, zonder lassen	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Klasse B, met lassen	10	13,5	15	3	3,5	4

$\epsilon = \sqrt{250/f_o} \cdot f_o$ in N/mm²

$\epsilon = 1,12$ N/mm²

inwendig (lijf) $\beta \leq \beta_1$: class 1 uitwendig (flens)
 $\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: class 2
 $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: class 3
 $\beta_3 < \beta$: class 4

lijf = klasse 2

flens = klasse 2

Volgens SCIA Engineer klasse 1

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

Weerstand tegen het buigmoment

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_o / \gamma_{M1} \text{ in iedere doorsnede}$$

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Conclusie sectieclassificatie onder buiging = klasse 2

$$M_{c,Rd} = \alpha * W_{el} * \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 249 \text{ kNm} >$$

$$154 \text{ kNm}$$

voldoet

Tabel 6.4 – Waarden van de vormfactor α

Doorsnedeklasse	Geen lassen	Met langlassen
1	$W_{pl} / W_{el}^{*)}$	$W_{pl,haz} / W_{el}^{*)}$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$

*) OPMERKING Deze formules zijn aan de veilige kant. Voor meer gedetailleerde waarden zijn aanbevelingen gegeven in bijlage F.

$$W_{pl} = 1,37E-03 \text{ m}^3$$

$$W_{el} = 1,15E-03 \text{ m}^3$$

$$1146977 \text{ mm}^3$$

$$a = 1,19$$

Het profiel voldoet voor het buigmoment

Weerstand tegen afschuiving

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} < 39 * \epsilon \Rightarrow 25,33 < 43,6$$

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_o}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 409,39 \text{ kN} >$$

$$204,92 \text{ kN}$$

voldoet

$$A_V = \sum_{i=1}^n \left[\left(h_w - \sum d \right) * t_w - (1 - \rho_{0,haz}) * b_{haz} * (t_w) \right] = 3900 \text{ mm}^2$$

- hw = 260 mm (hoogte lijf tussen de flenzen)
- d = 0 st (diameter gaten in doorsneden)
- tw = 15 mm (dikte lijf)
- n = 1 st (aantal lijven)
- $\rho_{(0,haz)}$ = 1 (hoogte HAZ - geen lassen=1)

Het profiel voldoet voor afschuiving

Combinatie buiging en afschuiving (enkel van toepassing bij kleine overspanningen)

- buigspanning : 133,99 N/mm²
- schuifspanning: 15,04 N/mm²

vergelijking spanning: 136,50 N/mm² OK

$$181,82 \text{ N/mm}^2$$

Torsie knik

$$h/b \leq 2 \Rightarrow 2$$

Geen torsie knik

Rekennota 2: 2 x 15mm Rf Gyproc

Benodigde W en I waarde omgevingstemperatuur en besluit

BELASTING onder UGT en BGT			Ratio
W	845287,2944 mm ³	profiel voldoet	74%
I	126638846,71 mm ⁴	profiel voldoet	74%

CONTROLE VAN HET ONTWERP BIJ BRAND en BEPALING BRANDWEERSTAND

Type gebouw volgens NBN EN 1990 tabel A1.1: A keuze PS PSI 1 = 0,5 PSI 2 = 0,3
 aangenomen PSI waarde: **0,3**

UGT belasting **98,76** kN/m maatgevend

Max moment bij brand **111,11** kNm

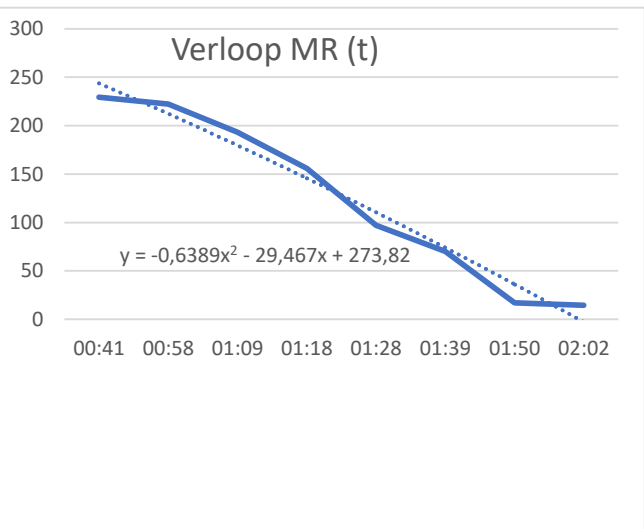
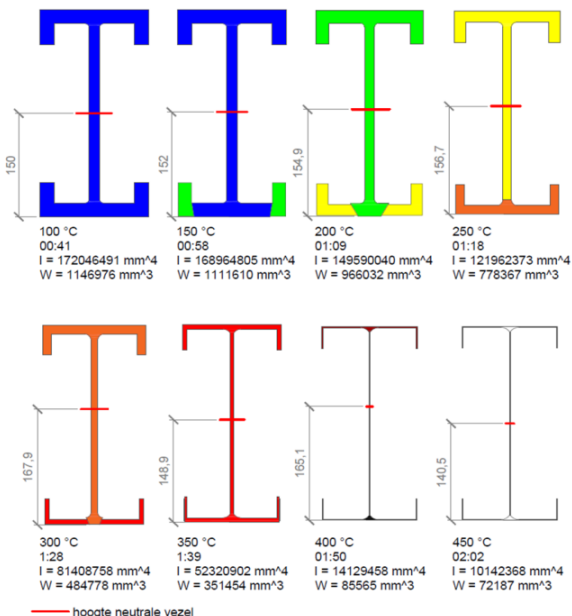
Benodigde W waarde bij aanvang van de brand Ratio
 W **611082** mm³ profiel voldoet **53%**

Berekend weerstand biedend moment aan de hand van een thermische simulatie

Omschrijving 2 x 15mm Rf Gyproc

tijd	Weerstandbiedend moment
00:41	229,4 kNm
00:58	222,32 kNm
01:09	193,21 kNm
01:18	155,67 kNm
01:28	96,96 kNm
01:39	70,29 kNm
01:50	17,11 kNm
02:02	14,44 kNm
AFGELEIDE BRANDWEERSTAND	
	01:25

kies in tabel grenzen !



Rekennota 2: 2 x 15mm Rf Gyproc

Conclusie

Na deze berekening zien we dat het aluminium profiel voldoende bescherming heeft aan 2 maal 15 mm Rf gyproc panelen om een REI 60 te behalen. Na 1 uur en 25 minuten zal de structuur bezwijken omdat het weerstandsmoment wordt overschreden.

gebruikte tabellen

Psi factor volgens NBN EN 1990

Tabel A1.1 — Aanbevolen waarden van ψ -factoren voor gebouwen

Belasting	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Voorgescreven belastingen in gebouwen, Categorie (zie EN 1991-1-1)			
Categorie A: woon-, verblijfsruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie B: kantoorruimtes	0,7	0,5	0,3
Categorie C: bijeenkomstruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie D: winkelruimtes	0,7	0,7	0,6
Categorie E: opslagruimtes	1,0	0,9	0,8
Categorie F: verkeersruimte, voertuiggewicht ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categorie G: verkeersruimte, 30 kN < voertuiggewicht ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categorie H: daken	0	0	0
Sneeuwbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-3)*			
Finland, IJsland, Noorwegen, Zweden	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H > 1000$ m boven de zeespiegel.	0,70	0,50	0,20
Overige CEN-landen, voor locaties gelegen op een hoogte $H \leq 1000$ m boven de zeespiegel.	0,50	0,20	0
Windbelasting op gebouwen (zie EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatuur (geen brand) in gebouwen (zie EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0



OPMERKING De ψ -waarden kunnen zijn vastgesteld in de nationale bijlage.
* Voor landen die hieronder niet zijn genoemd, zie de desbetreffende plaatselijke voorwaarden.

Gevolgklasse volgens NBN EN 1990

Tabel B1 — Definitie van gevolgklassen

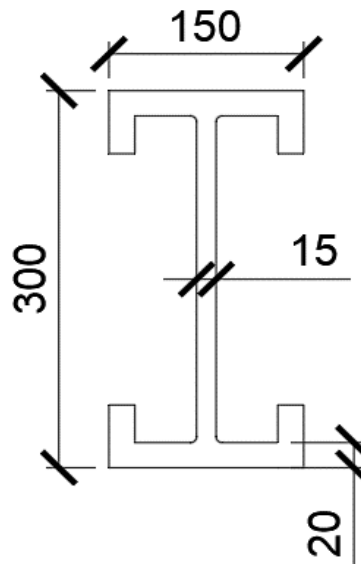
Gevolgklasse CC ³⁾	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische, sociale of gevolgen voor de omgeving	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

Rekennota 2: 2 x 15mm Rf Gyproc

Gebruiksklassen			Verticale belastingen			Horizontale belastingen		
			q_k [kN/m ²] (1) (1a)	q_k [kN]	A (G ₁) (1)	q_k [kN/m] (2)	q_k [kN] (3)	q_k [kN] (4)
Specifiek gebruik	Voorbeeld							
A Zones voor huishoudelijke en residentiële activiteiten	Kamers in residentiële gebouwen en huizen, kamers en zalen in ziekenhuizen; slaapkamers in hotels en jeugdherbergen; keukens en toiletten	Vloeren	2,0	2,0	Vierkant met 50 mm breedte	0,5	1,0	0,5
		Trappen	3,0	2,0				
		Balkons	4,0	2,0				
B Kantoren			3,0 ⁽¹¹⁾	3,0		1,0	1,0	0,5
Zones waar mensen kunnen samenkomen [®]	C1 : Zones met tafels, enz.	Zones in scholen, cafés, restaurants, eetzalen, leeszalen, ontvangstruimtes	3,0 ⁽¹¹⁾	4,0 ⁽¹²⁾	Vierkant met 100 mm breedte	1,0	1,0	0,5
	C2 : Zones met vaste zitplaatsen	Zones in kerken, theaters, bioscopen, conferentiezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtzalen van de spoorwegen	4,0	4,0 ⁽¹²⁾				
	C3 : Zones zonder obstakels voor het verkeer van personen	Zones in musea, tentoonstellingsruimtes enz. en toegangszones in openbare en administratieve gebouwen, hotels, ziekenhuizen, voorpleinen van spoorwegstations	5,0	4,0				
	C4 : Zones waar lichamelijke activiteiten kunnen plaatsvinden	Danszalen, turnzalen, podia enz.	5,0 ⁽²⁾	7,0 ⁽³⁾				
	C5 : Zones waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden	Zones in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen, met inbegrip van staantribunes, zittribunes en toegangszones, stationsperrons	5,0 ⁽⁴⁾	4,5				
D D1 : Zones in gewone kleinhandelszaken D2 : Zones in grootwarenhuizen			5,0	4,0 7,0		1,0	1,0	0,5
E E1 : Zones waar goederen kunnen worden gestapeld, inclusief toegangszones E2 : Industrieel gebruik	Zones voor opslag, inclusief opslag van boeken en andere documenten		7,5 ⁽¹⁰⁾	7,0	Vierkant met 50 mm breedte	2,0	1,0	0,5
			5,0 ⁽¹⁰⁾	5,0				
F Verkeers- en parkeerzones (≤ 30 kN totaal gewicht en ≤ 8 zitplaatsen zonder de chauffeur)	Garages, parkeerzones, parkeergarages...		2,5	20	a = 100 mm 	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7		
G Verkeers- en parkeerzones voor middelzware voertuigen (> 30 kN en ≤ 160 kN totaal gewicht, op 2 assen)	Toegangswegen; leveringszones; toegangszones voor brandweerwagens met een totaal gewicht ≤ 160 kN		5,0	90	a = 200 mm 	Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7		
H Daken enkel toegankelijk voor gewoon onderhoud en herstelling			0,8 ⁽⁵⁾	1,5	Vierkant met 50 mm breedte			-
I Toegankelijke daken van gebouwen met als activiteiten A tot G			Volgens klasse A-G					
K Toegankelijke daken voor speciale diensten	Landingsplaatsen voor helikopters		Te bepalen (zie EN)					

Profiel: Aluminium I-vormig profiel type 6106 T6 150x300 mm

Area: 12321.46
 Perimeter: 1401.42
 Bounding box: X: -75.00 -- 75.00
 Y: 0.00 -- 300.00
 Centroid: X: 0.00
 Y: 150.00
 Moments of inertia: X: 449279345.29
 Y: 21544737.28
 Product of inertia: XY: 0.00
 Radii of gyration: X: 190.95
 Y: 41.82
 Principal moments and X-Y directions about centroid:
 I: 172046491.16 along [1.00 0.00]
 J: 21544737.28 along [0.00 1.00]



Doorsnedeklasse volgens SCIA Engineer

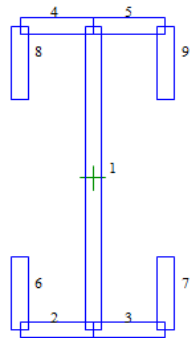
Classificatie en Effectieve doorsnede

INVOER TYPE

- Spanning N+
- Druk N-
- Buiging My+
- Buiging My-
- Buiging Mz+
- Buiging Mz-

HAZ-verzachting
 ρ,ο,haz

Iteratiestappen weergeven
 1



Invoer
 Invoertype: Buiging My-
 HAZ-verzachting: ρ,ο,haz

fo [N/mm ²]	fo,haz [N/mm ²]	ρ,ο,haz [-]	fu [N/mm ²]	fu,haz [N/mm ²]	ρu,haz [-]	ε [-]
110,0	100,0	0,91	205,0	160,0	0,78	1,51

Classificatie volgens EN 1999-1-1 artikel 6.1.4

Id	Type	σ1 [N/mm ²]	σ2 [N/mm ²]	Ψ [-]	β [-]	β1 [-]	β2 [-]	β3 [-]	Klasse
1	I	9,259e-04	-9,259e-04	-1,000	7,467	19,598	24,875	27,136	1
2	I	9,259e-04	9,259e-04	1,000	4,333	19,598	24,875	27,136	1
3	I	9,259e-04	9,259e-04	1,000	4,333	19,598	24,875	27,136	1
4	I	-9,259e-04	-9,259e-04	0,000	-1,000	19,598	24,875	27,136	1
5	I	-9,259e-04	-9,259e-04	0,000	-1,000	19,598	24,875	27,136	1
6	UO	9,259e-04	4,795e-04	0,518	3,849	5,276	6,784	7,538	1
7	UO	9,259e-04	4,795e-04	0,518	3,849	5,276	6,784	7,538	1
8	UO	-9,259e-04	-4,795e-04	0,000	-1,000	5,276	6,784	7,538	1
9	UO	-9,259e-04	-4,795e-04	0,000	-1,000	5,276	6,784	7,538	1

De doorsnede is declassificeerd als klasse 1