

## Risico's van brandbare isolatiematerialen

*Project:*

*Brandveilige isolatie in een  
natuurlijk brandconcept*



adviesburo



## Risico's van brandbare isolatiematerialen

Project:

*Brandveilige isolatie in een  
natuurlijk brandconcept*

---

Adviesburo Nieman B.V.  
Vestiging Zwolle

Dr. Van Lookeren Campagneweg 16  
Postbus 40147  
8004 DC ZWOLLE  
T (038) 467 00 30  
F (038) 467 00 40

zwolle@nieman.nl  
 www.nieman.nl

---

---

Datum                    4 januari 2010  
Projectnummer        z090360aa  
Rapportnummer      Wz090360aaA2.rhe

---



---

Omschrijving project      Brandveilige isolatie in een natuurlijk brandconcept

---

Projectnummers              Nieman              z090360aa

---

Datum                          4 januari 2010

---

Versie                          Definitief

---

Uitgevoerd door              Adviesburo Nieman B.V.  
   Vestiging Eindhoven  
  
   mw. ir. M.E.A. Schoffelen  
   dhr. ir. R.A.P. van Herpen



---

Het rapport omvat:              33 pagina's (tekst)  
   5 bijlagen

---

© 2010, Adviesburo Nieman BV

Alle rechten voorbehouden.  
Het vermenigvuldigen of kopiëren van dit rapport of van een gedeelte van dit rapport is alleen toegestaan na schriftelijke toestemming van Adviesburo Nieman BV.

---



## Managementsamenvatting

### Risico's van brandbare isolatiematerialen

Momenteel wordt in Nederland gewerkt aan een herziening van het Bouwbesluit. Naar aanleiding hiervan is onderzocht in hoeverre het brandgedrag van isolatiematerialen invloed heeft op het brandveiligheidsrisico. Voor vrijwel onbrandbare isolatiematerialen zoals steenwol of glaswol is deze invloed gering. Dat geldt ook voor brandbare isolatiematerialen, voor zover deze zijn toegepast in een thermisch zware<sup>1</sup> constructie. Echter, worden brandbare isolatiematerialen toegepast in een thermisch lichte<sup>2</sup> constructie dan wordt het brandveiligheidsrisico vergroot.

De vergroting van het risico wordt veroorzaakt door:

- Mogelijke brandvoortplanting via het isolatiemateriaal in de constructie. Daardoor is brandvoortplanting mogelijk achter de afwerking, wanneer deze thermisch licht is of deels luchtopen<sup>3</sup> is. Daarnaast is brandvoortplanting mogelijk naar een aangrenzend brandcompartiment. Met een juiste detaillering kan dit worden voorkomen, doch dit vergt specifieke aandacht en deskundigheid.
- Mogelijke vergassing (pyrolyse)<sup>4</sup> van het isolatiemateriaal bij hogere temperaturen. Wanneer daarbij de ontbrandingstemperatuur niet wordt overschreden wordt de gepyrolyseerde brandstof in de rookgassen opgenomen. Wanneer de rookgassen worden gecumuleerd en de concentratie gepyrolyseerde brandstof de lower flammability limit (LFL)<sup>5</sup> overschrijdt is rookgasexplosie mogelijk. Grote brandcompartimenten waarin rookbuffering wordt toegepast om langere ontruimingstijden of een binnenaanval door de brandweer mogelijk te maken impliceren dit risico.

### Conclusie

Uit het onderzoek blijkt dat brandbare isolatie in thermisch lichte constructies alleen veilig kan worden toegepast wanneer de volgende voorwaarden in acht worden genomen:

- Specifieke brandwerende detaillering toepassen ter plaatse van compartimentsscheidingen, getest volgens NEN 6069.
- Brandvoortplantingsklasse (Euroklasse) relateren aan de thermische diffusiteit<sup>6</sup> van de constructie (gedurende 20, 30, 60 of meer minuten). Dit zal bij thermisch lichte constructies leiden tot eisen aan het brandgedrag van het isolatiemateriaal.
- Ook bij toepassing van rookbuffering (in een gelijkwaardige oplossing volgens artikel 1.5 van het Bouwbesluit) rekening houden met de thermische diffusiteit van de aan de rookbuffer grenzende constructie. Dat is relevant omdat hierdoor de mogelijke opname van brandbare gasen vanuit de constructie in de rookbuffer wordt bepaald. Wanneer de concentratie brandbare gasen de LFL overschrijden is rookgasexplosie mogelijk. Het risico hiervan wordt overigens sterk bepaald door projectspecifieke uitgangspunten en randvoorwaarden.

Indien aan de bovenvermelde aspecten niet kan worden voldaan moet het isolatiemateriaal in een thermisch zware constructie worden toegepast of moet het isolatiemateriaal praktisch onbrandbaar zijn.

## Achtergronden

### Het fysisch gedrag van een brandruimte (natuurlijk brandconcept)

In geval van brand neemt de temperatuur in de brandruimte toe. De temperatuur in de brandruimte ontwikkelt zich niet volgens de standaard brandkromme. Voor de temperatuurontwikkeling in de brandruimte is in dit onderzoek een natuurlijk brandconcept (fysisch brandmodel) gehanteerd, zoals vastgelegd in concept NEN-6055:2009, met randcondities voor het brandvermogensscenario volgens NEN-EN 1991-1-2/NB:2007. Het brandverloop kent daarin drie fasen: lokale brandfase, stationaire brandfase en dooffase. Het verloop van de brand wordt verder in meer of mindere mate bepaald door de omvang en de hoogte van de ruimte, de omhulling van de ruimte (materialisering van de scheidingsconstructie) en de grootte en vorm van de openingen hierin, de referentievermogensdichtheid, de tijdconstante en de vuurbelasting. In het onderzoek zijn verschillende ruimten en scheidingsconstructies meegenomen.

De thermische respons van de scheidingsconstructies is bepaald met een thermodynamisch simulatieprogramma (Voltra, Physibel). Hierin is het mogelijk om simulaties uit te voeren met zowel temperatuurafhankelijke randvoorwaarden als temperatuurafhankelijke materiaalparameters.

### Regelgeving en materiaaleisen

In de huidige regelgeving worden geen eisen gesteld aan het gedrag van isolatiematerialen, wel aan het gedrag van constructie-oppervlakken ten aanzien van brandvoortplanting en rookproductie en aan de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag van scheidingsconstructies van (sub)brandcompartimenten. Vanuit internationaal perspectief beschouwd worden in de regelgeving van andere landen soms wel aanvullende eisen aan het brandgedrag van isolatiematerialen gesteld. Vooral van isolatiematerialen, toegepast in thermisch lichte constructies (zoals sandwichpanelen) is het brandgedrag van belang, aangezien dat hoge temperaturen in het isolatiemateriaal tot gevolg heeft.

### Isolatielagen in thermisch lichte constructies (van binnen naar buiten)

Het optreden van hoge temperaturen in isolatiematerialen, kan, afhankelijk van de eigenschappen van het betreffende isolatiemateriaal, van invloed zijn op:

1. De brandwerendheid van de scheidingsconstructie. Op die manier geldt ook binnen de huidige regelgeving dat het juiste materiaal op de juiste manier moet worden toegepast.
2. De snelheid van brandvoortplanting in de scheidingsconstructie waarin het isolatiemateriaal is toegepast.
3. Verder bestaat de kans dat onder invloed van hoge temperaturen gasen vrij komen uit het isolatiemateriaal die in de brandruimte tot explosiegevaar kunnen leiden.

#### Ad 1:

Wanneer vanwege een geëiste weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag een brandwerende scheidingsconstructie noodzakelijk is, wordt de brandwerendheid bepaald volgens NEN 6069. Deze bepalingmethode heeft betrekking op de totale constructie-opbouw, dus inclusief de eventueel aanwezige isolatielaag. De invloed van het isolatiemateriaal is in deze bepalingmethode verdisconteerd.



Ad 2:

De snelheid van brandvoortplanting in de isolatielaag van een lichte scheidingsconstructie is in principe niet relevant wanneer de scheidingsconstructie aan slechts één brandcompartiment grenst. In dat geval dient de energetische waarde van de isolatielaag te worden toegevoegd aan de (permanente) vuurlast van het compartiment.

Verdergaande consequenties zijn er wanneer de lichte scheidingsconstructie grenst aan meerdere brandcompartimenten. In dat geval moet branddoorslag van het ene naar het andere compartiment worden voorkomen. Dit vergt een specifieke aansluitdetailing met onbrandbare isolatie ter plaatse van het aansluitdetail, getest volgens NEN 6069.

Tenslotte zijn er verdergaande consequenties wanneer specifieke eisen ten aanzien van de brandvoortplantingsklasse worden gesteld aan de lichte scheidingsconstructie (klasse 2 of beter; Euroklasse B of beter). Bij toepassing van isolatiemateriaal achter een luchtopen binnenafwerking of achter een thermisch lichte binnenafwerking speelt het brandgedrag van het isolatiemateriaal een rol in de brandvoortplantingsklasse.

Ad 3.

Wanneer de isolatielaag in een scheidingsconstructie ten gevolge van een hoge temperatuur pyrolyseert, kunnen pyrolyseproducten (gasvormige brandstof) in de brandruimte terecht komen. In eerste instantie is dat de rooklaag die ontstaat bovenin de brandruimte, met een relatief lage temperatuur waardoor de pyrolyseproducten niet meteen tot ontbranding komen. Vooral bij grote hoge brandruimten kan een dergelijke gestratificeerde situatie met relatief lage rooklaagtemperatuur lang stand houden. Vaak wordt daarvan gebruik gemaakt om langere ontruimingstijden te kunnen toestaan, of een binnenaanval door de brandweer mogelijk te maken.

Door opname van de pyrolyseproducten in de rooklaag kan er gedurende een bepaald tijdsinterval explosierisico optreden, namelijk wanneer de concentratie pyrolyseproducten zich tussen LFL en UFL bevindt (lower, resp. upper flammability levels). Of er daadwerkelijk rooklaagexplosie optreedt hangt af van een eventuele ontstekingsbron (b.v. vlam) of de energie-inhoud van de rooklaag (hoge temperatuur leidt tot zelfontbranding).

Dit effect kan theoretisch worden voorkomen door een luchtdichte constructie (onder brandomstandigheden) tussen het isolatiemateriaal en de brandruimte. In de praktijk is het moeilijk deze luchtdichting onder elke temperatuur- en drukbelasting te realiseren.

Een (te) hoge temperatuur in isolatiematerialen kan worden tegengegaan door een barrière te realiseren tussen de brand en het materiaal in de vorm van een warmte-isolerende of een warmteaccumulerende laag.

*Isolatielagen in thermisch lichte constructies (van buiten naar binnen)*

Bij thermisch lichte constructies, beschouwd van buiten naar binnen (dus met een lichte buitenafwerking) is de thermische belasting aanzienlijk minder groot. In dat geval is er alleen een lokaal risico ter plaatse van gevelopeningen, van waaruit uitslaande vlammen kunnen optreden. De vlam kan daarbij direct of indirect het isolatiemateriaal ontsteken.

Om in die gevallen te kunnen voldoen aan de voorwaarde die NEN 6068 stelt aan de buitenafwerking van een gevel (brandvoortplantingsklasse 2) dient het gedrag van het isolatiemateriaal, wanneer dit is toegepast achter een luchtopen of thermisch lichte buitenafwerking beschouwd te worden in de brandvoortplantingsklasse.

### Evaluatie

In een geïsoleerde scheidingsconstructie kan zowel brandbaar als onbrandbaar isolatiemateriaal worden toegepast. In veel gevallen behoeven geen specifieke eisen ten aanzien van het brandgedrag van het isolatiemateriaal te worden gesteld, zelfs niet wanneer de isolatielaag zich in een brandwerende scheidingsconstructie bevindt. Als voorwaarde hierbij geldt uiteraard dat de constructie wordt uitgevoerd zoals getest volgens NEN 6069.

Wanneer een isolatiemateriaal wordt toegepast in een over verschillende brandcompartimenten doorlopende thermisch lichte scheidingsconstructie moet, ter voorkoming van branddoorslag van het ene naar het andere compartiment, aandacht aan de aansluitdetaillering worden besteed. Dit vergt een specifieke aansluitdetaillering met een strook onbrandbare isolatie ter plaatse van het aansluitdetail, getest volgens NEN 6069.

Bij constructie-oppervlakken waarvoor een specifieke brandvoortplantingsklasse wordt geëist (klasse 2 of beter, Euroklasse B of beter) speelt de isolatielaag achter de afwerking waarop de eis van toepassing is een rol wanneer de afwerking thermisch licht of gedeeltelijk luchtopen is. Bij een gesloten thermisch zware afwerking zijn geen specifieke eisen ten aanzien van het brandgedrag van het isolatiemateriaal noodzakelijk.

Het is dus zinvol om de brandvoortplantingsklasse te relateren aan de thermische diffusiteit van de constructie, rekening houdend met de hiervoor relevante tijdsduur (20, 30, 60 of meer minuten). Dat levert een eenduidige maat voor de dikte vanaf de thermisch belaste oppervlakte waarover de constructiedoorsnede moet worden beschouwd. Wanneer hierin isolatiemateriaal aanwezig is zal dat resulteren in eisen aan het brandgedrag hiervan. Ook bij gelijkwaardige oplossingen (artikel 1.5 van het Bouwbesluit) waarin rookbuffering wordt toegepast om langere ontruimingstijden toe te staan (RSET/ASET-vergelijking)<sup>7</sup> of een binnenaanval door de brandweer mogelijk te maken is dit noodzakelijk. Hierin spelen overigens projectspecifieke uitgangspunten en randvoorwaarden een grote rol.

Eindhoven, 4 januari 2010  
Adviesburo Nieman B.V.

mw. ir. M.E.A. Schoffelen

ir. R.A.P. van Herpen

## Begrippenlijst

1. Thermisch zwaar houdt in dat de gedurende het beschouwde tijdsbestek aan de constructie geleverde thermische energie geheel door de constructie opgenomen kan worden.
2. Thermisch licht houdt in dat de gedurende het beschouwde tijdsbestek aan de constructie geleverde thermische energie te groot is om door de constructie te worden opgenomen. Voor thermisch geïsoleerde constructies betekent dit dat de temperatuur in de constructie de opgelegde temperatuur benadert.
3. Met luchtopen wordt bedoeld dat de afwerking aan de verhitte zijde niet geheel gesloten is. De constructie als geheel kan daarbij luchtdicht zijn, bijvoorbeeld omdat de luchtdichting van de constructie in een andere (achterliggende) materiaal laag wordt verkregen.
4. Pyrolyse of vergassing van het isolatiemateriaal houdt in dat de vaste aggregatietoestand bij temperatuurverhoging op een gegeven moment overgaat in de gasvormige aggregatietoestand, waarbij moleculen ook worden gekraakt. De vloeibare aggregatietoestand wordt dus overgeslagen.
5. De lower flammability limit LFL, ook wel de lower explosive limit LEL, is de minimaal benodigde concentratie brandstof die in een brandstof/lucht-mengsel aanwezig moet zijn om het mengsel te doen ontbranden. Daarvoor is vervolgens een kleine ontstekingsbron voldoende. Het explosierisico is aanwezig zolang de upper flammability limit UFL van het mengsel niet wordt overschreden.
6. De thermische diffusiteit (of temperatuurvereffeningscoëfficiënt) bepaalt samen met de blootstellingsduur de thermische indringingsdiepte in de constructie. De thermische diffusiteit hangt af van de materiaaleigenschappen van de constructie (warmtegeleidingscoëfficiënt, soortelijke massa en soortelijke warmte).
7. ASET = Available safe egress time, de beschikbare vluchttijd.  
RSET = Required safe egress time, de benodigde vluchttijd.  
In gelijkwaardige oplossingen met betrekking tot de vluchtveiligheid, waarbij gebruik gemaakt wordt van rookbuffering, wordt veilig vluchten mogelijk geacht wanneer  $ASET > RSET$ , m.a.w. wanneer de beschikbare vluchttijd groter is dan de benodigde vluchttijd.



# Inhoudsopgave

	Pagina
<b>Managementsamenvatting</b>	<b>7</b>
<b>Begrippenlijst</b>	<b>11</b>
<b>Hoofdstuk 1 Inleiding</b>	<b>15</b>
<b>Hoofdstuk 2 Thermische actie ten gevolge van brand</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Natuurlijk brandconcept</b>	<b>17</b>
2.1.1 <i>Inleiding natuurlijk brandconcept</i>	17
2.1.2 <i>Uitgangspunten en randcondities</i>	18
2.1.3 <i>Resultaten</i>	19
<b>2.2 Uitslaande vlammen</b>	<b>20</b>
<b>Hoofdstuk 3 Thermische reactie van constructies bij brand</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Constructies</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Gedrag van isolatieschuimen (thermoharders)</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Thermodynamisch gedrag</b>	<b>23</b>
<b>3.4 Thermodynamische berekening</b>	<b>25</b>
<b>Hoofdstuk 4 Effecten</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Branddoorslag</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Brandoverslag</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Explosie van de rooklaag</b>	<b>28</b>
4.3.1 <i>Risico optreden explosie</i>	28
4.3.2 <i>Explosiescenario's</i>	28
4.3.3 <i>Risico-evaluatie</i>	29
<b>Hoofdstuk 5 Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>31</b>
<b>Bronnen</b>	<b>33</b>
Bijlage 1	Brandruimten
Bijlage 2	Natuurlijk brandconcept, fysisch brandmodel
Bijlage 3	Thermodynamische simulatieberekeningen
Bijlage 4	LFL-grenswaarden
Bijlage 5	Simulatieberekeningen rookgasexplosie



## Hoofdstuk 1 Inleiding

Momenteel wordt in Nederland gewerkt aan een herziening van het Bouwbesluit. Naar aanleiding hiervan is onderzocht in hoeverre de bestaande regelgeving ten aanzien van het gedrag van brandbare isolatiematerialen (kunststofschuimen) de brandveiligheidsrisico's voldoende beperkt.

In de huidige regelgeving speelt materialisering onder brandcondities op twee manieren een rol:

- Resistance to fire: Er worden in het kader van de beperking van de uitbreiding van brand eisen gesteld aan de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen (sub)brandcompartimenten (Afdeling 2.13 en 2.14 van het Bouwbesluit). Hierin speelt de brandwerendheid van scheidingsconstructies een rol. Deze wordt bepaald door middel van beproevingen conform NEN 6069.
- Reaction to fire: Er worden eisen gesteld aan het materiaalgedrag in Afdeling 2.12 (beperking van de ontwikkeling van brand) en 2.15 (beperking van ontstaan van rook) van het Bouwbesluit. Bepalingsmethoden voor de bijdrage tot brandvoortplanting zijn NEN 6065 en NEN 1775, voor de rookproductie NEN 6066. In de Ministeriële regeling 2006 zijn de Nederlandse klassen omgezet naar Euroklassen volgens NEN-EN 13501-1.

In de regelgeving wordt nadrukkelijk het componentniveau beschouwd (i.c. scheidingsconstructies). Een relatie met de brandruimte zelf en het daaruit voortvloeiende brandscenario is niet aanwezig. Dit kan met name voor samengestelde constructies onder brandcondities tot een ander gedrag leiden dan onder testcondities.

De relatie met de brandruimte kan onderzocht worden op basis van een natuurlijk brandconcept. Hieruit volgt met welk temperatuurverloop in de ruimte rekening gehouden moet worden. Vervolgens wordt beschouwd welke effecten kunnen optreden wanneer isolatieschuimen opwarmen. Ter illustratie worden thermohardende kunststofschuimen beschouwd, zoals PUR en PIR. Deze kunststofschuimen vergassen bij verhitting, in plaats van smelten. Dit wordt in het algemeen als een positieve eigenschap beschouwd uit oogpunt van brandveiligheid.

In deze beschouwing is uitgegaan van generieke materiaaleigenschappen; specifieke PUR- en PIR-producten kunnen hiervan verschillen.





## Hoofdstuk 2 Thermische actie ten gevolge van brand

### 2.1 Natuurlijk brandconcept

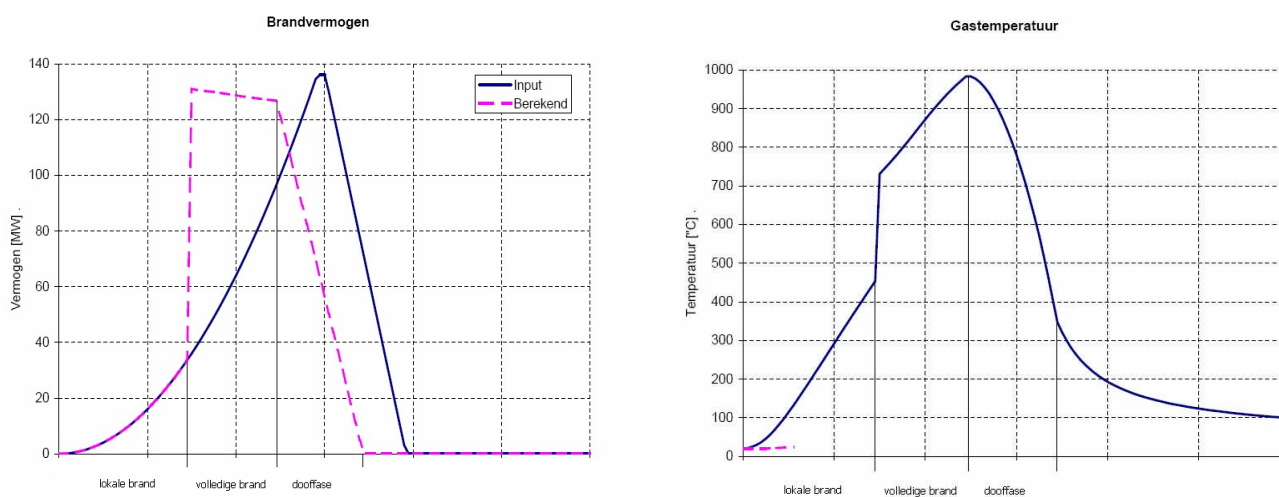
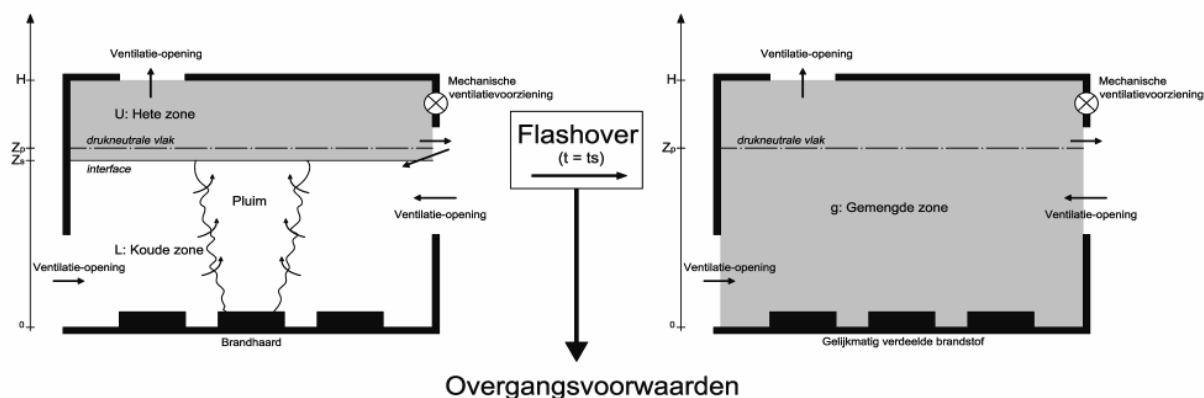
#### 2.1.1 Inleiding natuurlijk brandconcept

In dit onderzoek wordt een natuurlijk brandconcept aangehouden. Dat houdt in dat de temperatuurontwikkeling in de brandruimte niet wordt voorgeschreven door de standaard brandkromme, maar met behulp van het fysisch brandmodel wordt berekend uit het brandvermogensscenario, volgens concept-NEN 6055:2009. Het brandvermogensscenario ligt in een brandstofbeheerste situatie (lokale brand) vast door de referentie brandvermogensdichtheid en de tijdconstante. In een zuurstofbeheerste situatie (volledig ontwikkelde compartimentsbrand) is het brandvermogensscenario in de tijd stationair en wordt deze bepaald door de referentie vermogensdichtheid en de openheid van de brandruimte. De temperatuurontwikkeling in de brandruimte bij een gegeven brandvermogensscenario en het moment van flash-over worden eveneens bepaald door de eigenschappen van de brandruimte (grootte, geometrie, materiaaleigenschappen).

In een natuurlijk brandconcept is het totale brandscenario van belang. Dat wil zeggen dat de temperatuurontwikkeling en de consequenties ervan op mens en constructie van belang zijn in:

- De lokale brandfase
- De stationaire brandfase
- De dooffase.

In figuur 1 is een voorbeeld gegeven van een brandscenario dat met het fysisch brandmodel volgens het natuurlijk brandconcept is bepaald. De temperatuurontwikkeling in de betreffende brandruimte is daarbij ook weergegeven (illustratief).



Figuur 1: Brandvermogen en gastemperatuur in de brandruimte bij een lokale brand en na flash-over bij een volledig ontwikkelde brand (stationaire brandfase en dooffase).

### 2.1.2 Uitgangspunten en randcondities

Voor het natuurlijk brandconcept wordt het fysisch brandmodel toegepast conform concept-NEN 6055:2009. Voor de berekeningen wordt het computermodel Ozone v.2.2.5 gehanteerd, doch zonder de in Ozone opgenomen risicofactoren, zodat een correct fysisch model wordt toegepast.

Voor de randvoorwaarden met betrekking tot het brandscenario is het volgende gehanteerd (zie ook NEN-EN 1991-1-2/NB:2007):

- Referentie vermogensdichtheid: 250 kW/m<sup>2</sup>
- Tijdconstante: 150 s (snel)
- Vuurbelasting (60 kg/m<sup>2</sup>): 1140 MJ/m<sup>2</sup>

Er wordt uitgegaan van een verbrandingsefficiëntie van 0,8. Bij een volledig ontwikkelde zuurstofbeheerste brand wordt uitgegaan van een verlengde brandduur (verbrandingsmodel: extende combustion). Bij een lokale brand wordt het pluimmodel van Heskestad toegepast voor de inmenging van omgevingslucht in de verbrandingsgassen.

Het variëren van de referentievermogensdichtheid leidt niet tot nieuwe inzichten, omdat het vermogen in de brandruimte na flash-over ventilatiebeheerst is en dus niet meer door het brandstofafhankelijke vermogen wordt beïnvloed.

Tijdconstanten voor verschillende soorten ruimten liggen vast in NEN-EN 1991-1-2/NB:2007 voor verschillende functies.

Voor de brandruimte worden de volgende varianten gehanteerd (zie bijlage 1):

- Een grote hoge brandruimte (1000 m<sup>2</sup>, 10 m hoog) met een openheid van 2% van de totale omhulling;
- Een kleine brandruimte (100 m<sup>2</sup>, 3 m hoog) met een openheid van 2% van de totale omhulling.

De openheid van de brandruimte wordt veroorzaakt door openingen in de wanden, gelijkmatig verdeeld over de hoogte. In het dak bevinden zich geen openingen.

### 2.1.3 Resultaten

De berekeningen met het fysisch brandmodel zijn opgenomen in bijlage 2. Een samenvatting van de resultaten is gegeven in tabel 1.

Tabel 1. Resultaten berekeningen fysisch brandmodel

Variant	Flash-over na [min]	Brandtype na flash-over	Max. vermogen [MW]	Max. temperatuur [°C]
Grote brandruimte; Thermisch zware scheidingsen	25	zuurstofbeheerst	180 (180 kW/m <sup>2</sup> )	1094 (na 81 min.)
Grote brandruimte; Thermisch lichte scheidingsen	22	zuurstofbeheerst	175 (175 kW/m <sup>2</sup> )	1310 (na 81 min.)
Kleine brandruimte; Thermisch zware scheidingsen	8	zuurstofbeheerst	9 (90 kW/m <sup>2</sup> )	> 987 (vanaf 120 min.)
Kleine brandruimte; Thermisch lichte scheidingsen	7	zuurstofbeheerst	9 (90 kW/m <sup>2</sup> )	> 1215 (vanaf 120 min.)

Op basis van deze resultaten kan worden gesteld dat de temperatuurbelasting op de binnenzijde van de constructie al na korte tijd hoog kan oplopen.

Voor de grote brandruimte met thermisch lichte scheidingsconstructies is het fysisch brandmodel ook toegepast bij geheel andere condities voor het brandvermogensscenario (langzame branduitbreiding met hoog referentievermogen):

- Referentie vermogensdichtheid: 1000 kW/m<sup>2</sup>
- Tijdconstante: 600 s (langzaam)
- Vuurbelasting (60 kg/m<sup>2</sup>): 1140 MJ/m<sup>2</sup>

Deze berekening is eveneens in bijlage 2 toegevoegd. De resultaten zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 2. Resultaten berekeningen fysisch brandmodel

Variant	Flash-over na [min]	Brandtype na flash-over	Max. vermogen [MW]	Max. temperatuur [°C]
Grote brandruimte; Thermisch lichte scheidingen, Langzame branduitbreiding met hoog referentievermogen	75	zuurstofbeheerst	175 (175 kW/m <sup>2</sup> )	> 1288 (vanaf 120 min.)

Deze variant bezit een brandvermogensscenario waarbij flash-over pas in een relatief laat stadium optreedt.

## 2.2 Uitslaande vlammen

Naast de ontwikkeling van de brand in de ruimte, speelt ook brand buiten de ruimte – in de vorm van uitslaande vlammen – een rol. In de Nederlandse situatie wordt gebruik gemaakt van NEN 6068 om brandoverslagrisico's als gevolg van uitslaande vlammen te evalueren. De brandoverslagberekeningen zoals omschreven in deze norm zijn gebaseerd op theorie uit de publicatie *Fire and steel construction – Fire safety of bare external structural steel* van Law, M. en O'Brien, T uit 1981. De brand in de ruimte wordt gemodelleerd op basis van de geometrie van de ruimte, de uitslaande vlammen worden gemodelleerd op basis van de geometrie van de openingen, waarna de ontvangen straling op nabijgelegen oppervlakten kan worden bepaald.

De warmtestraling op een geveloppervlak vormt hierin nauwelijks een probleem zolang de oppervlakte convectief aan de omgeving (buitenlucht) kan afkoelen. Wanneer naast straling ook convectie een rol speelt in de warmtebelasting van een geveloppervlak is afkoeling niet meer mogelijk. De constructie zal in dat geval warmte gaan opnemen, de thermische respons van de constructie hierop is dan van belang. Deze problematiek is lokaal aanwezig bij uitslaande vlammen vanuit gevelopeningen die tegen de gevel aanliggen. Ter plaatse van de uitslaande vlammen wordt de constructie thermisch belast met een relatief groot vermogen gedurende een langere tijd (20, 30, 60 of meer minuten).

## Hoofdstuk 3 Thermische reactie van constructies bij brand

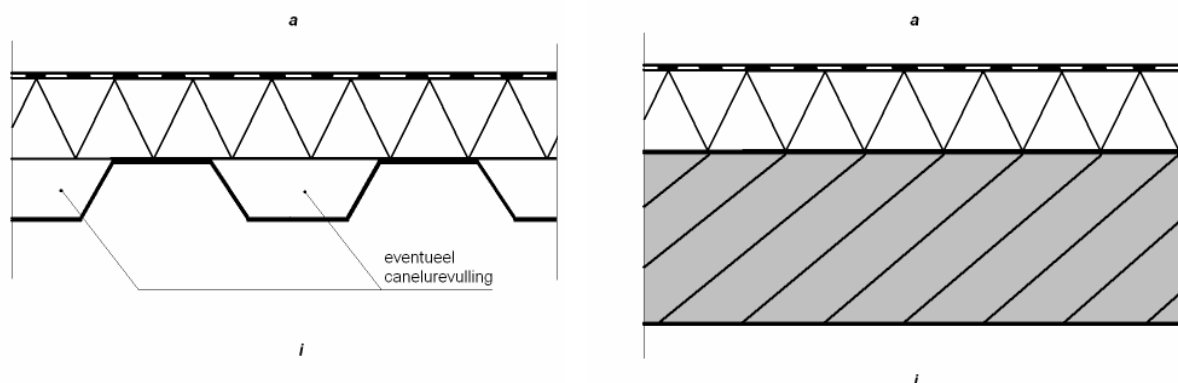
### 3.1 Constructies

Voor de scheidingsconstructies worden de volgende varianten beschouwd:

- Uitwendige scheidingsconstructies:
  - Dak
  - Gevels
- Inwendige scheidingsconstructies:
  - Wanden
  - Vloer (b.g. vloer)

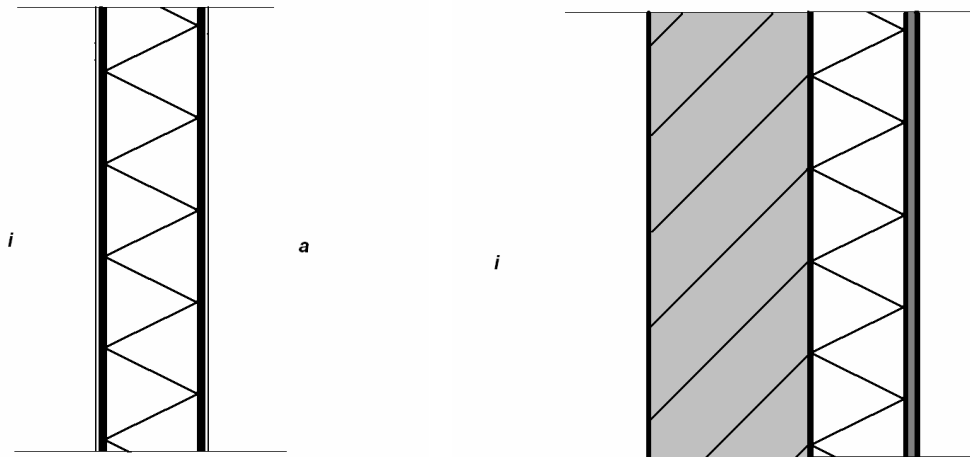
Een eventueel plafond onder de dakconstructie zal in het algemeen niet brandwerend zijn en daardoor relatief snel bezwijken. Het plafond maakt daarom geen onderdeel uit van de dakconstructie.

In figuur 2 zijn de varianten van de dakconstructies (thermisch licht en thermisch zwaar) van de brandruimte weergegeven.



*Figuur 2: Thermisch lichte dakconstructie (geïsoleerd staaldak, links) en thermisch zware dakconstructie (geïsoleerd betondak, rechts). De thermisch zware dakconstructie is buiten beschouwing gebleven. (i: binnenzijde)*

In figuur 3 zijn de varianten van gevel- en wandconstructies van de brandruimte weergegeven. Uiteraard zijn meer varianten mogelijk, maar de essentie zit in de thermische massa van de afscherming van de isolatielaag aan de brandzijde. Deze kan thermisch licht of thermisch zwaar zijn. Veel binnenisolatiesystemen zullen thermisch licht zijn, waarmee de thermische belasting op de isolatielaag vergelijkbaar is met de lichte wandconstructie in figuur 3.



Figuur 3: Thermisch lichte wandconstructie (geïsoleerd stalen sandwichpaneel, links) en thermisch zware wandconstructie (geïsoleerde betonnen gevel, rechts). De thermisch zware wandconstructie is alleen beschouwd uit oogpunt van een thermische belasting vanaf de buitenzijde door uitslaande vlammen, wanneer deze van een relatief lichte buitenafwerking is voorzien. (i: binnenzijde)

### 3.2 Gedrag van isolatieschuimen (thermoharders)

Wanneer de isolatielaag in de constructies van figuren 2 en 3 bestaat uit een isolatieschuim is deze niet stabiel bij hogere temperaturen (brandtemperaturen tot ruim 1000 °C). Als isolatieschuim is uitgegaan van een thermoharder. Regelmatig toegepaste thermoharders zijn harde PUR- (polyurethaan) en PIR- (polyisocyanuraat) schuimen. Het betreft urethaan-polymeren die ontstaan uit reactie tussen polyolen en isocyanuraat. Dit zijn brandbare componenten. Om de materialen in een schuimvorm te krijgen, wordt gebruik gemaakt van verschillende blaasmiddelen. Eventueel kunnen nog andere additieven worden gebruikt om materialen bepaalde specifieke eigenschappen te geven. De 'bouwstenen' van PIR en PUR zijn gelijk, de chemische reacties die er aan ten grondslag liggen, verschillen echter wel.

Het kenmerk van thermoharders is dat ze bij opwarming ontbinden en vergassen in plaats van smelten (zoals thermoplasten). Het proces waarbij een materiaal wordt afgebroken onder invloed van verhitting zonder dat hierbij sprake is van verbranding, wordt pyrolyse genoemd. Voor pyrolyse is in tegenstelling tot verbranding, geen aanwezigheid van zuurstof vereist.

PIR pyrolyseert bij een hogere temperatuur dan PUR. Wat de exacte pyrolysetemperatuur is, hangt van het specifieke product af. Urethaanverbindingen [R-NHCOO-R'] breken af bij temperaturen boven 200°C; isocyanuraatverbindingen [R-NCO] bij temperaturen boven 300°C. De ontbrandingstemperaturen bedragen maximaal circa 500°C. Indien de temperatuur de ontbrandingstemperatuur overschrijdt en er voldoende zuurstof in de omgeving aanwezig is treedt verbranding op van de pyrolyseproducten.

Er kunnen diverse gasvormige en vaste stoffen ontstaan tijdens het pyrolyseren van PIR en PUR. Welke producten precies ontstaan, hangt onder andere samen met de samenstelling van het materiaal (fabrikaat en type), de beschikbaarheid van zuurstof en het temperatuurverloop.

Als vast product bij het pyrolyseren van PIR zal een koollaag ontstaan, die bij hogere temperaturen verbrandt. Deze koollaag is in dit onderzoek buiten beschouwing gebleven.

Vanwege de brandbaarheid van de gasvormige pyrolyseproducten van PUR en PIR bestaat er een risico van rookgasexplosie. Dit risico is aanwezig zodra de pyrolyseconcentratie in het rookgas de LFL-grenswaarde (lower flammability limit) overschrijdt. In bijlage 4 is van een kleine (gasvormige) urethaan- en isocyanuraatverbinding de LFL bepaald. Deze is vergeleken met de LFL van een grotere PUR-verbinding. De LFL-grenswaarde in [% v/v] van de grotere PUR-verbinding ligt duidelijk lager dan die van de kleine urethaan- en isocyanuraatverbinding. Echter, omgerekend naar LFL-grenswaarden in [% m/m] is er vrijwel geen verschil. Er is dan ook geen verdere differentiatie in pyrolyseproducten beschouwd. Als uitgangspunt wordt gehanteerd:

Pyrolyseproduct  $C_{6,3}H_{7,1}NO_{2,1}$ : 130,5 kg/kMol, LFL = 1,1 [% v/v]  
(SFPE Handbook of fire protection)

### 3.3 Thermodynamisch gedrag

Het dak kan worden beschouwd in een thermisch lichte en een thermisch zware variant. De thermisch zware variant houdt in dat gedurende het brandscenario geen warmtetransmissie door de dakconstructie optreedt, maar dat alle aangeboden energie in de constructie wordt gebufferd. Er zijn dan geen thermische consequenties voor de isolatielaag. Om die reden wordt alleen de thermisch lichte dakconstructie beschouwd.

Datzelfde geldt ook voor wanden en gevels. De thermisch lichte variant is voor het gedrag van de isolatielaag alleen interessant, de thermisch zware variant niet. Echter, een uitzondering hierop vormen gevels met niet-brandwerende openingen hierin. Door uitslaande vlammen vanuit de openingen kan de gevelconstructie plaatselijk ook belast worden met een hoge temperatuur vanaf de buitenzijde. Dit heeft ook consequenties voor thermisch zware constructies wanneer in deze constructies de isolatielaag van een dunne afwerking aan de buitenzijde is voorzien (b.v. licht buitenspouwblad of een gepleisterd buitengevelisolatiesysteem).

De vloer is in alle gevallen als thermisch zware constructie te beschouwen (betonvloer of elementenverharding).

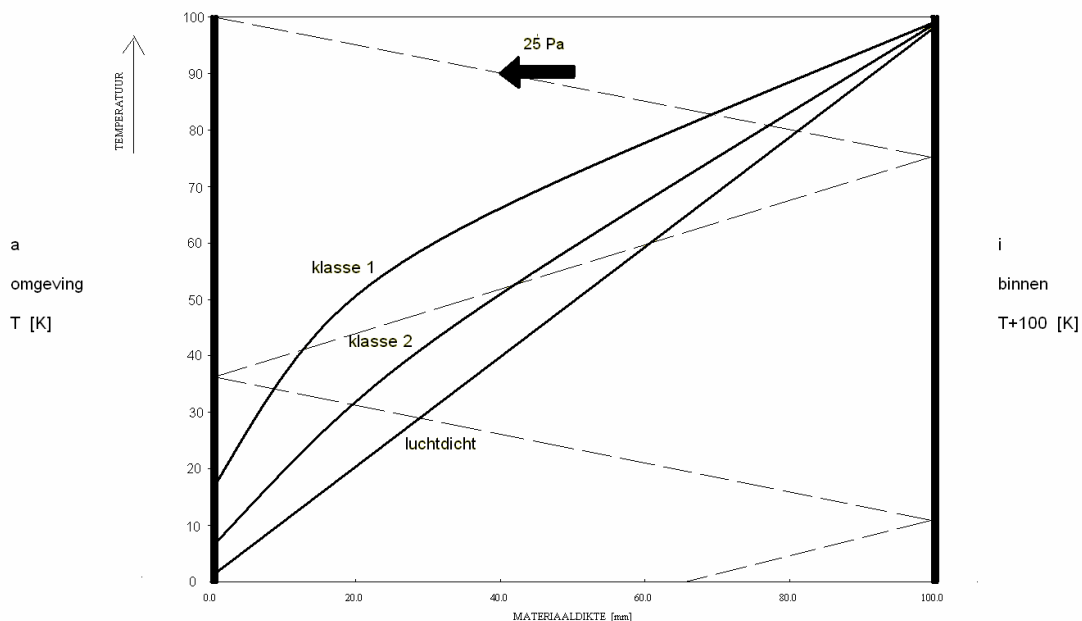
De constructies worden thermisch belast door convectieve overdracht en stralingsoverdracht aan de binnenzijde (zowel bij de lokale brand als de volledig ontwikkelde brand). Hierdoor treedt geleidingstransport op in de constructie. Daarnaast worden de constructies belast door convectief warmtetransport in de constructie, vanwege enige luchtdoorlatendheid van de constructies.

Voor wat betreft de luchtdoorlatendheid kunnen de volgende grenswaarden worden aangehouden:

- Klasse 1 voor staaldaken:  $q_v''(10) = 1,0 \text{ dm}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ , overeenkomend met een luchtdoorlatendheidscoëfficiënt van  $C = 0,2239 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{Pa}^{0,65}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Klasse 2 voor wanden en gevels:  $q_v''(10) = 0,4 \text{ dm}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ , overeenkomend met een luchtdoorlatendheidscoëfficiënt van  $C = 0,0895 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{Pa}^{0,65}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Het convectief warmtetransport en het geleidingstransport in een scheidingsconstructie bepalen de opwarming van de verschillende materiaallagen in de constructie. Figuur 4 geeft de opwarming van een lichte sandwichconstructie onder stationaire randcondities bij verschillende luchtdoorlatendheidsklassen:

- Temperatuurverschil tussen binnen en buiten van 100 K
- Drukverschil tussen binnen en buiten van 25 Pa



Figuur 4: het temperatuurverloop in de isolatielaag van een sandwichconstructie (in doorsnede: rechts is binnen, links is buiten) onder stationaire temperatuur- en drukcondities en verschillende klassen van luchtdoorlatendheid.

Naarmate de constructie meer luchtdoorlatend is zal de isolatielaag meer opwarmen. Eventuele producten die vrijkomen vanuit het isolatiemateriaal (pyrolyseproducten) kunnen daarbij gedeeltelijk naar buiten worden afgevoerd, waardoor de ophoping hiervan wordt beperkt. In geval van brandbare isolatie zijn de pyrolyseproducten ook brandbaar en is ophoping daarvan onwenselijk. Een nadelig effect hiervan is dat de ontbrandingstemperatuur van de isolatielaag bij luchtdoorlatende constructies sneller wordt bereikt.

In de praktijk komen luchtdichte scheidingsconstructies niet voor. Zeker wanneer de constructie onder invloed van een thermische belasting gaat vervormen zal de luchtdoorlatendheid groter worden. De luchtdoorlatendheid wordt met name bepaald door naden en kieren. Bij toepassing van isolatieschuimen is het materiaal zelf vrijwel luchtdicht. Om die reden wordt in de thermodynamische berekeningen van luchtdichte constructies uitgegaan.

De luchtdichting wordt verondersteld aan de niet-verhitte zijde. Dat houdt in dat eventuele vrijkomende pyrolyseproducten naar de brandruimte worden afgevoerd. Wanneer de drukopbouw in de constructie als gevolg van het vergassen van het isolatiemateriaal de overdruk in de brandruimte overschrijdt treedt afvoer van de pyrolyseproducten naar de brandruimte op.

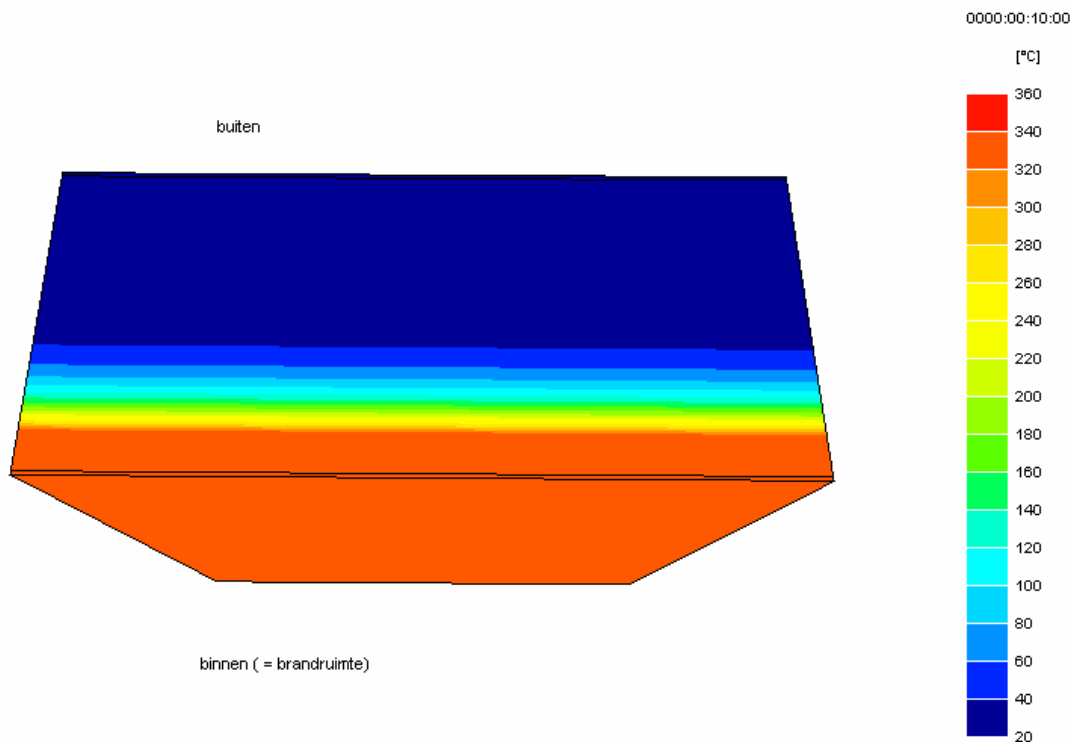
De pyrolyseproducten zijn in het geval van een kunststof schuimisolatie brandbaar. Bij uitstroming naar de brandruimte treedt daarom verbranding op wanneer de aangrenzende gastemperatuur (de brandruimte of de hete zone bo-



venin de brandruimte) voldoende hoog is (boven de ontbrandingstemperatuur). Wanneer de aangrenzende gastemperatuur de ontbrandingstemperatuur niet overschrijdt pyrolyseert de schuimisolatie zonder te verbranden. Het gepyrolyseerde product komt in het gasvolume van de brandruimte of de hete zone terecht en vormt bij overschrijding van de LFL-grenswaarde een explosief mengsel. In dat geval bestaat het risico van rookgasexplosie.

### 3.4 Thermodynamische berekening

Met behulp van het rekenprogramma Voltra (Physibel, België 2006) zijn thermodynamische berekeningen opgesteld voor een aantal scenario's. Er is een sandwich constructie beschouwd, bestaande uit isolatieschuim tussen twee lagen staalplaat. Als uitgangspunt is gehanteerd dat isolatieschuim bij 300°C pyrolyseert. Grenzend aan de constructie is een hete zone met een stationaire conditie van 350°C respectievelijk 400°C aangenomen. De omgevingstemperatuur is op 20°C gesteld. Vervolgens is de snelheid berekend waarmee het "pyrolysefront" zich door het isolatiemateriaal verplaatst (bijlage 3).

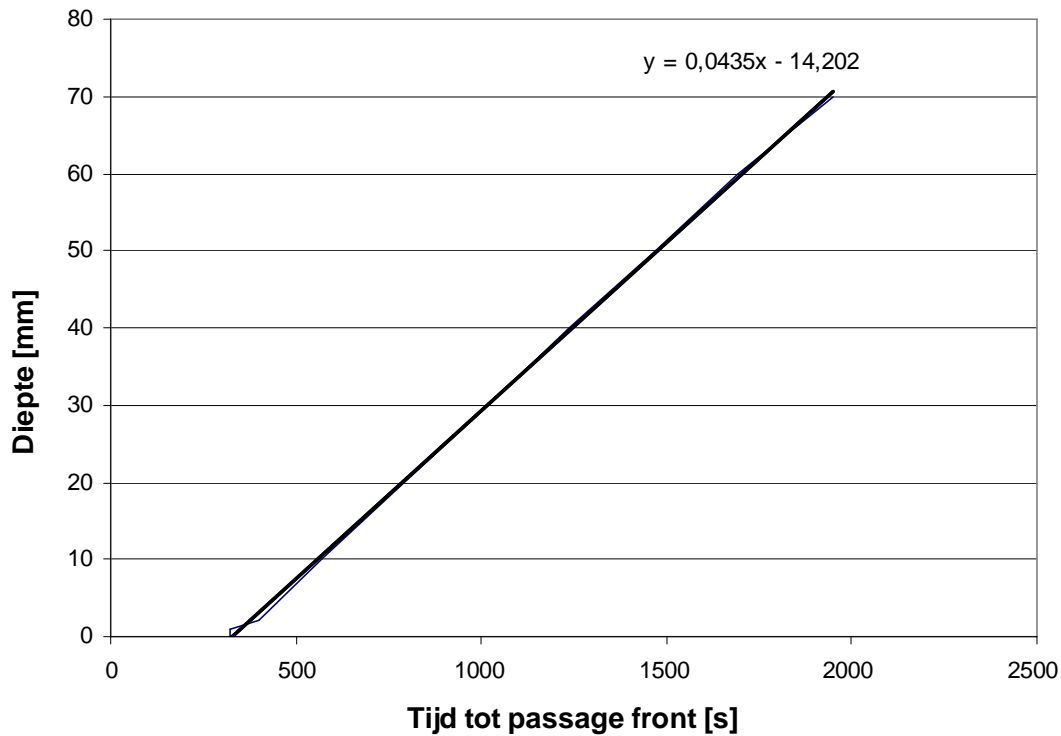


Figuur 5: grafische uitvoer dynamische berekening (temperatuurverloop na 10 minuten bij rooklaagtemperatuur van 350 °C)

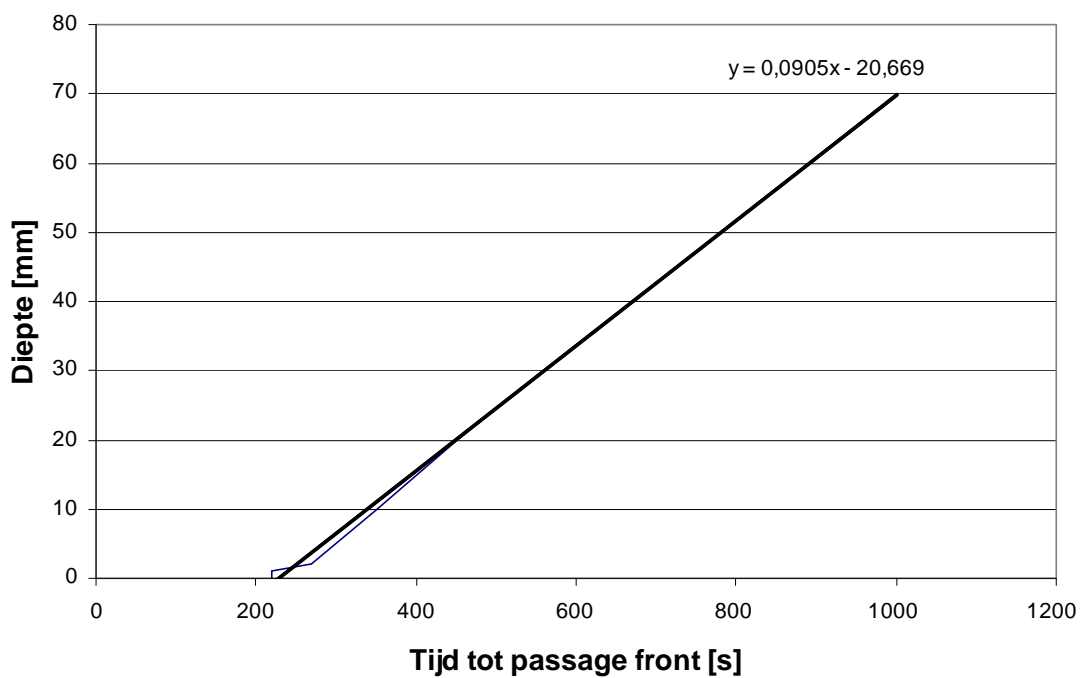
In de berekeningen is voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van respectievelijk staal en het isolatiemateriaal uitgegaan van 52 W/mK en 0,03 W/mK. Wanneer het isolatiemateriaal een temperatuur van 300°C bereikt, zal dit pyrolyseren. In werkelijk zal zich daarbij ook een verkoolde laag vormen die een isolerend effect heeft. Dit effect is in de thermodynamische simulatie buiten beschouwing gebleven.

In de volgende figuren zijn de resultaten van de berekeningen gegeven. Opvallend hierin is dat bij de gegeven stationaire aangrenzende gastemperaturen

de pyrolysesnelheid gering is, maar wel aanzienlijk toeneemt bij een hogere gastemperatuur. Voor gastemperaturen boven 500 °C is deze beschouwing niet meer relevant, omdat de gepyrolyseerde brandstof in dat geval meteen verbrandt en niet leidt tot ophoping en mogelijk explosierisico in het gasvolume.



Figuur 6: Verplaatsing pyrolysefront in het isolatieschuim bij een rooklaag van 350°C

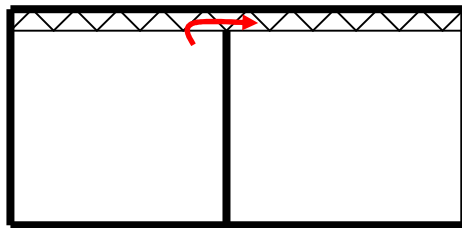


Figuur 7: Verplaatsing pyrolysefront in het isolatieschuim bij een rooklaag van 400°C

## Hoofdstuk 4 Effecten

### 4.1 Branddoorslag

Brandwerendheid wordt door middel van tests bepaald voor constructieonderdelen. Voor een sandwichconstructie (of een vergelijkbare constructie) kan in een proefoven in de richting loodrecht op het element de brandwerendheid worden bepaald. Bij een dergelijke beproeving blijft eventuele brandvoortplanting naar een naastgelegen ruimte via flankerende constructies buiten beschouwing. Wanneer een brandbaar isolatiemateriaal wordt toegepast, bestaat het risico dat brand zich langs deze weg voortplant, zie figuur 8.



*Figuur 8: Verplaatsing pyrolysefront in brandbare isolatie bij een aangrenzende rooklaag met een temperatuur boven de pyrolysetemperatuur.*

Dit aspect krijgt over het algemeen voldoende aandacht bij de detaillering. Een brandbare isolatielaag moet bijvoorbeeld op een adequate wijze worden onderbroken of een brandscheiding kan worden doorgezet door de flankerende constructie.

### 4.2 Brandoverslag

Er is sprake van brandoverslag wanneer een brand zich uitbreidt via de buitenlucht. Dit kan gebeuren wanneer uitslaande vlammen uit een brandend compartiment een hoge straling afgeven op niet brandwerende openingen van het naastgelegen compartiment. In de berekeningsmethodiek worden beoordelingspunten geplaatst ter plaatse van gevelopeningen (ramen, deuren). Tevens wordt als toepassingsvoorwaarde voor de norm gegeven dat de gevel moet voldoen aan brandvoortplantingsklasse 2; op deze wijze wordt brandvoortplanting via de gevel beperkt.

Het is echter niet uitgesloten dat een uitslaande vlam leidt tot een zodanig hoge temperatuur aan de buitenzijde van een gevel dat een buitengevelisolatiemateriaal tot ontbranding komt. Dit zal alleen een risico zijn bij isolatiematerialen met een lage ontbrandingstemperatuur en een buitengevelmateriaal met een relatief hoge warmtegeleiding en gering vermogen voor warmteaccumulatie. In de praktijk kan dit bijvoorbeeld voorkomen bij een metalen gevelbeplating, maar ook bij een 'nat' buitengevelisolatiesysteem. Met name voor delen van de gevel die in direct contact met een uitslaande vlam staan, is dit een realistisch scenario.

Dit risico wordt in de huidige praktijk niet beschouwd maar speelt wel een rol in de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen (sub)brandcompartimenten. Behalve een eis aan de brandvoortplantingsklasse zou hier ook een eis aan het isolatiemateriaal gesteld moeten worden, of aan de afschermbrengende werking van de buitenafwerking. In dat laatste geval zal de afscherming voldoende warmte-isolerend of warmte-accumulerend moeten zijn om de thermische belasting op het isolatiemateriaal te reduceren.

## 4.3 Explosie van de rooklaag

### 4.3.1 Risico optreden explosie

Wanneer in de rooklaag pyrolyseproducten instromen vanuit het isolatiemateriaal die niet direct ontbranden is er sprake van explosiegevaar in de rooklaag. Dit risico bestaat als de pyrolysetemperatuur aanzienlijk lager is dan de ontbrandingstemperatuur van het betreffende pyrolyseproduct. De concentratie van het product kan zich gedurende enige tijd ophopen in de aangrenzende rooklaag. Deze kan, zodra de concentratie van het product de LFL-grenswaarde overschrijdt en er een ontstekingsbron aanwezig is of de temperatuur van de rooklaag de ontbrandingstemperatuur overschrijdt, exploderen.

Bij toepassing van PUR-schuim treedt pyrolyse op bij materiaaltemperaturen vanaf circa 200°C. PIR-schuim vertoont een gunstiger gedrag, pyrolyse treedt in dat geval op bij materiaaltemperaturen vanaf circa 300 °C. De ontbrandingstemperaturen van de diverse pyrolyseproducten ligt vaak rond circa 500°C.

Op basis van thermodynamische berekeningen, zoals weergegeven in paragraaf 4.3, kan een inschatting worden gemaakt van de massa-afname van het isolatiemateriaal in de tijd tijdens een brand. Hieruit blijkt dat het pyrolysefront zich relatief langzaam in de isolatielaag verplaatst. Bij een stationaire rooklaagtemperatuur van 350°C duurt het circa 6 minuten voordat het isolatiemateriaal gaat pyrolyseren. 10 minuten later is circa 25 mm van het materiaal gepyrolyseerd. Bij een stationaire rooklaagtemperatuur van 400°C gaat dat wat sneller. Het duurt dan circa 3,5 minuten voordat het isolatiemateriaal gaat pyrolyseren. 10 minuten later is bijna 55 mm materiaal gepyrolyseerd. Onbekend is daarbij welke exacte pyrolyseproducten in welke verhouding aanwezig zijn. Daarnaast varieert de temperatuur en het volume van de rooklaag waarin de pyrolyseproducten worden opgenomen. Het risico van rookgasexplosie is dus erg projectspecifiek.

### 4.3.2 Explosiescenario's

Wanneer nu wordt aangenomen dat het optreden van een explosie mogelijk is, dringt zich de vraag op wat het effect van een dergelijke explosie is. Er kunnen hierbij verschillende scenario's worden beschouwd:

- a. explosie tijdens de vluchtfase;
- b. explosie tijdens repressiefase
- c. explosie die leidt tot bezwijken constructie waaraan een brandwerendheid is toegekend.

Ad a.

In de bestaande regelgeving wordt er impliciet vanuit gegaan dat een persoon 30 seconden door de rook kan afleggen met een snelheid van 1 m/s. Wanneer langere vluchttijden aan de orde zijn geldt daarvoor als grenswaarde een temperatuur van de rooklaag van circa 200 °C. Bij smalle ruimten kunnen wat hogere rooklaagtemperaturen worden toegestaan.

In elk geval zijn de rooklaagtemperaturen gedurende de vluchtfase zodanig laag dat het pyrolyseren van het isolatieschuim vrijwel nooit tot overschrijding van de LFL-grenswaarde zal leiden. Rooklaagexplosies zijn dan niet aan de orde.

Ad b.

Repressie zal vaak gedurende langere tijd plaatsvinden. Rooklaagexplosies ten gevolge van het pyrolyseren van het isolatieschuim zijn daarom tijdens de repressieve fase wel denkbaar. Het is dus van belang om voor de repressieve inzet inzicht te hebben in de gebruikte isolatiematerialen en het thermodynamisch gedrag van de constructies. Alleen bij thermisch lichte constructies kan het isolatieschuim relatief snel pyrolyseren, bij thermisch zware constructies is er geen risico aanwezig.

Ad c.

Het risico van het bezwijken van een brandwerende constructie ten gevolge van een rooklaagexplosie zal projectspecifiek moeten worden geëvalueerd. Wanneer de drukgolf ten gevolge van een rooklaagexplosie onvoldoende snel kan worden afgevoerd kunnen (brandwerende) constructies bezwijken. Het effect kan worden verkleind door explosievoorzieningen toe te passen.

Dit risico moet worden beschouwd gedurende het totale brandscenario, dus tot en met de dooffase. Ook in dit geval zullen alleen thermisch lichte constructies met isolatieschuim een risico vormen, bij thermisch zware constructies is dit niet aan de orde.

### 4.3.3 Risico-evaluatie

Om een inschatting van het risico van optreden van een rookgasexplosie te kunnen inschatten zijn voor de grote brandruimte (1000 m<sup>2</sup>, 10 m hoog) in bijlage 5 voor zowel het standaard brandscenario als een traag brandscenario met hoge referentievermogensdichtheid bij verschillende pyrolysetemperaturen van het isolatiemateriaal in een thermisch lichte dakconstructie simulatieberekeningen uitgevoerd. In deze simulatieberekeningen is het fysisch brandmodel (hoofdstuk 2, bijlage 2) gekoppeld aan het thermodynamisch model voor de dakconstructie (hoofdstuk 3, bijlage 3). Vervolgens is ervan uitgegaan dat de pyrolyseproducten geheel naar de brandruimte worden afgevoerd en in het rookgasvolume worden opgenomen. Het explosierisico is vervolgens als het moment waarop de LFL wordt overschreden in de grafieken aangegeven.

Tabel 3 geeft een samenvatting.

Tabel 3. Risico van rookgasexplosie in de grote hal (1000 m<sup>2</sup>) ten gevolge van een thermisch lichte dakconstructie met isolatieschuim.

Brandscenario	Pyrolysetemperatuur isolatiemateriaal [°C]	Flash-over na [min.]	Risico rookgasexplosie na [min.]
Referentie: 250 kW/m <sup>2</sup> t <sub>c</sub> = 150 s. (snel)	200	22	20
	300	22	Na flash-over (n.v.t.)
Variant: 1000 kW/m <sup>2</sup> t <sub>c</sub> = 600 s. (langzaam)	200	75	55
	300	75	58

Op basis van deze resultaten kan worden geconcludeerd dat rookgasexplosie mogelijk is voordat flash-over optreedt in de brandruimte. In praktische zin betekent dat een vervroeging van het moment van flash-over. Dat is vooral voor het repressief optreden een veiligheidsrisico.

Het veiligheidsrisico kan worden beperkt door:

- Isolatiemateriaal toe te passen dat geen brandbare pyrolyseproducten levert (praktisch onbrandbare isolatie);
- In geval van brandbare isolatie een barrière tussen brandruimte en isolatielaag toe te passen (een thermisch isolerende of accumulerende barrière, zoals bij thermisch zware constructies)
- In geval van brandbare isolatie een luchtdichte barrière tussen brandruimte en isolatielaag toe te passen (praktisch alleen in combinatie met de voorgaande maatregel realiseerbaar over het hele temperatuurtraject bij brand).

## Hoofdstuk 5 Conclusie en aanbevelingen

In een geïsoleerde scheidingsconstructie kan zowel brandbaar als onbrandbaar isolatiemateriaal worden toegepast. In veel gevallen behoeven geen specifieke eisen ten aanzien van het brandgedrag van het isolatiemateriaal te worden gesteld, zelfs niet wanneer de isolatielaag zich in een brandwerende scheidingsconstructie bevindt. Als voorwaarde hierbij geldt uiteraard dat de constructie wordt uitgevoerd zoals getest volgens NEN 6069.

Wanneer een isolatiemateriaal wordt toegepast in een over verschillende brandcompartimenten doorlopende thermisch lichte scheidingsconstructie moet, ter voorkoming van branddoorslag van het ene naar het andere compartiment, aandacht aan de aansluitdetaillering worden besteed. Dit vergt een specifieke aansluitdetaillering met een strook onbrandbare isolatie ter plaatse van het aansluitdetail, getest volgens NEN 6069.

Bij constructie-oppervlakken waarvoor een specifieke brandvoortplantingsklasse wordt geëist (klasse 2 of beter, Euroklasse B of beter) speelt de isolatielaag achter de afwerking waarop de eis van toepassing is een rol wanneer de afwerking thermisch licht of gedeeltelijk luchtopen is. Bij een gesloten thermisch zware afwerking zijn geen specifieke eisen ten aanzien van het brandgedrag van het isolatiemateriaal noodzakelijk.

Het is dus zinvol om de brandvoortplantingsklasse te relateren aan de thermische diffusiteit van de constructie, rekening houdend met de hiervoor relevante tijdsduur (20, 30, 60 of meer minuten). Dat levert een eenduidige maat voor de dikte vanaf de thermisch belaste oppervlakte waarover de constructiedoorsnede moet worden beschouwd. Wanneer hierin isolatiemateriaal aanwezig is zal dat resulteren in eisen aan het brandgedrag hiervan. Feitelijk moet dan voor het isolatiemateriaal hetzelfde brandgedrag worden geëist als voor de afwerking.

Bij gelijkwaardige oplossingen (artikel 1.5 van het Bouwbesluit), waarin rookbuffering wordt toegepast om langere ontruimingstijden toe te staan of een binnenaanval door de brandweer mogelijk te maken, moet rekening gehouden worden met het risico van rookgasexplosie wanneer isolatieschuim in een thermisch lichte scheidingsconstructie (met name dakconstructie) wordt toegepast. Met enkele simulatieberekeningen is aangetoond dat het risico van rookgasexplosie met name tijdens de repressieve fase kan optreden. Hierin spelen overigens projectspecifieke uitgangspunten en randvoorwaarden een grote rol.

Het risico van een rookgasexplosie kan worden verkleind door praktisch onbrandbaar isolatiemateriaal toe te passen of brandbare isolatie alleen in thermisch zware constructies toe te passen.





## Bronnen

Bengtsson, L.-G., *Enclosure fires*, Räddnings Verket, Karlstad (Zweden), 2001

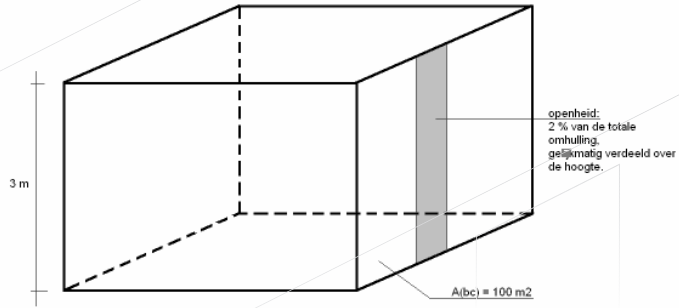
SFPE, *Handbook of fire protection engineering*, National Fire Protection Association, Quincy (VS), 3<sup>rd</sup> edition 2002: Appendix C (Fuel properties and combustion data)

NIST Chemistry Webbook (<http://webbook.nist.gov/chemistry/>), National Institute of Standards and Technology (VS), 2009

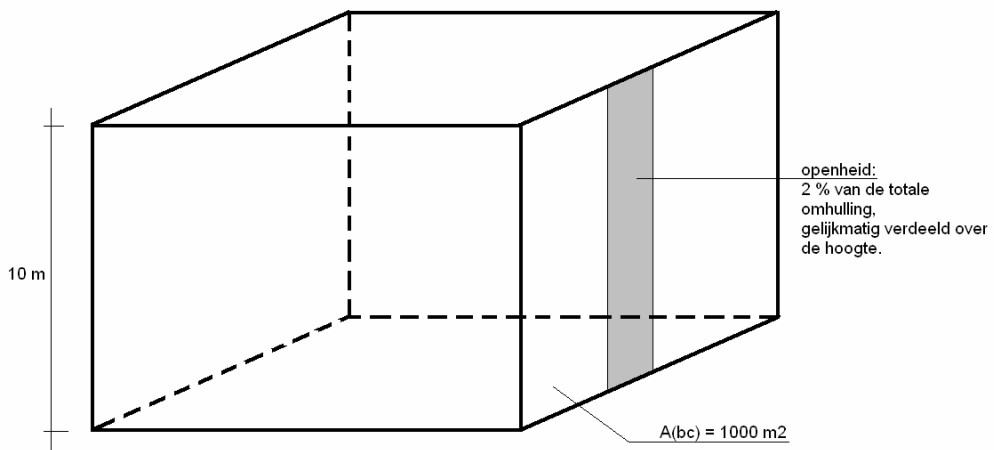
NEN 6055 (concept), Fysisch brandmodel op basis van een natuurlijk brandconcept, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 2009



# Bijlage 1 Brandruimten



**KLEINE BRANDRUIMTE**



**GROTE BRANDRUIMTE**

## Bijlage 2 Natuurlijk brandconcept, fysisch brandmodel

## OZone V 2.2.5 Report

Analysis Name: **grote brandruimte, thermisch zware wanden (BC1a)**  
 File Name: variant\_BC1a.ozn  
 Created: 17-9-2009 at 12:05:24

### ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy:	Combination 2Zones - 1 Zone Model
Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone	
Upper Layer Temperature	≥ 500°C
Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature	≥ Combustible Ignition Temperature = 300 °C
Interface Height	≤ 0,2 Compartment Height
Fire Area	≥ 0,25 Floor Area

### PARAMETERS

#### Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8  
 Bernoulli Coefficient: 0,7

#### Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K  
 Initial Pressure: 100000 Pa

#### Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 25 W/m<sup>2</sup>K  
 Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m<sup>2</sup>K

#### Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec  
 Time Step for Printing Results: 60 sec  
 Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

Air Entrained Model: Heskestad

### COMPARTMENT

Form of Compartment: Any Compartment  
 Number of Walls: 1  
 Floor Area: 1000 m<sup>2</sup>  
 Height: 10 m

### DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

#### Floor

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

#### Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	12	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

### Wall

Wall length: 140 m

Material (from inside to outside)

Normal weight Concrete [EN1994-1-2]  
 Glass wool & Rock wool

Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
15	2300	1,6	1000
10	60	0,037	1030

### Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	10	4,8	Constant	no

### FIRE

Fire Curve:

Maximum Fire Area:

Fire Elevation:

Fuel Height:

NFSC Design Fire

1000 m<sup>2</sup>

0 m

0 m

Occupancy

User Defined

Fire Growth Rate

150

RHRf [kw/m<sup>2</sup>]

250

Fire Load q<sub>f,k</sub> Danger of Fire Activation

[MJ/m<sup>2</sup>]

1140

1

Fire Risk Area:

12,5

m<sup>2</sup>

$\delta_{q,1} = 1$

Danger of Fire Activation:

$\delta_{q,2} = 1$

q<sub>f,d</sub>

912,0

MJ/m<sup>2</sup>

Combustion Heat of Fuel:

17,5

MJ/kg

Combustion Efficiency Factor:

0,8

Combustion Model:

Extended fire duration

## RESULTS

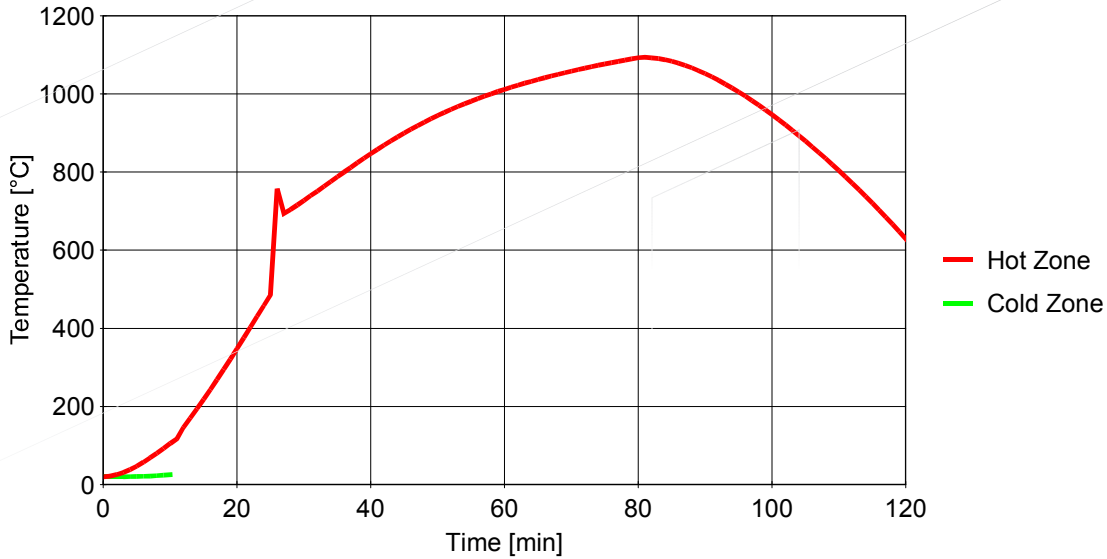
Fire Area: The maximum fire area (1000.00m<sup>2</sup>) is greater than 25% of the floor area (1000.00m<sup>2</sup>).

The fire load is uniformly distributed.

Switch to one zone: Lower layer Height < 20.0% of compartment height at time [s] 624.55

Fully engulfed fire: Temperature of zone >500.0°C at time [s] 1532.00

### Gas Temperature



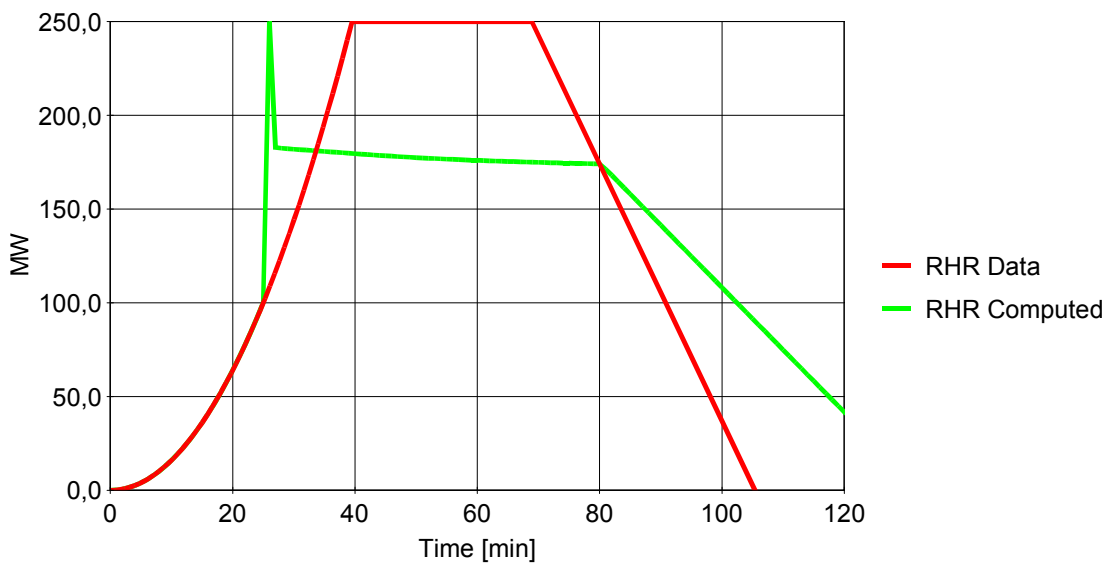
Analysis Name: grote brandruimte, thermisch zware wanden (BC1a)

Peak: 1094 °C

At: 81 min

Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature

### Rate of Heat Release



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch zware wanden (BC1a)

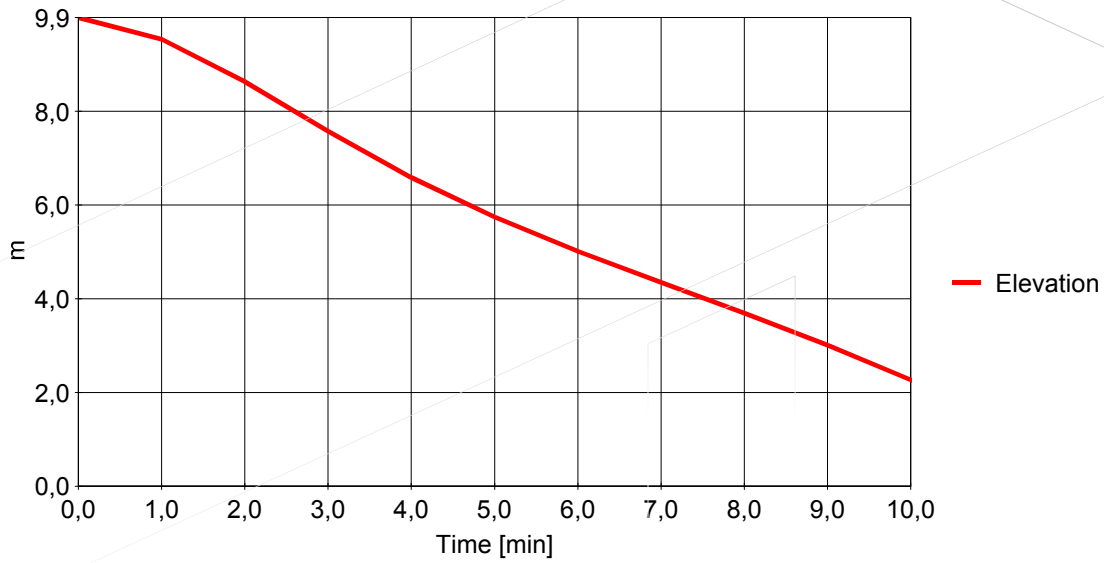
Peak: 250,00 MW

At: 39,5 min

Figure 2. RHR Data and Computed



### Zones Interface Elevation



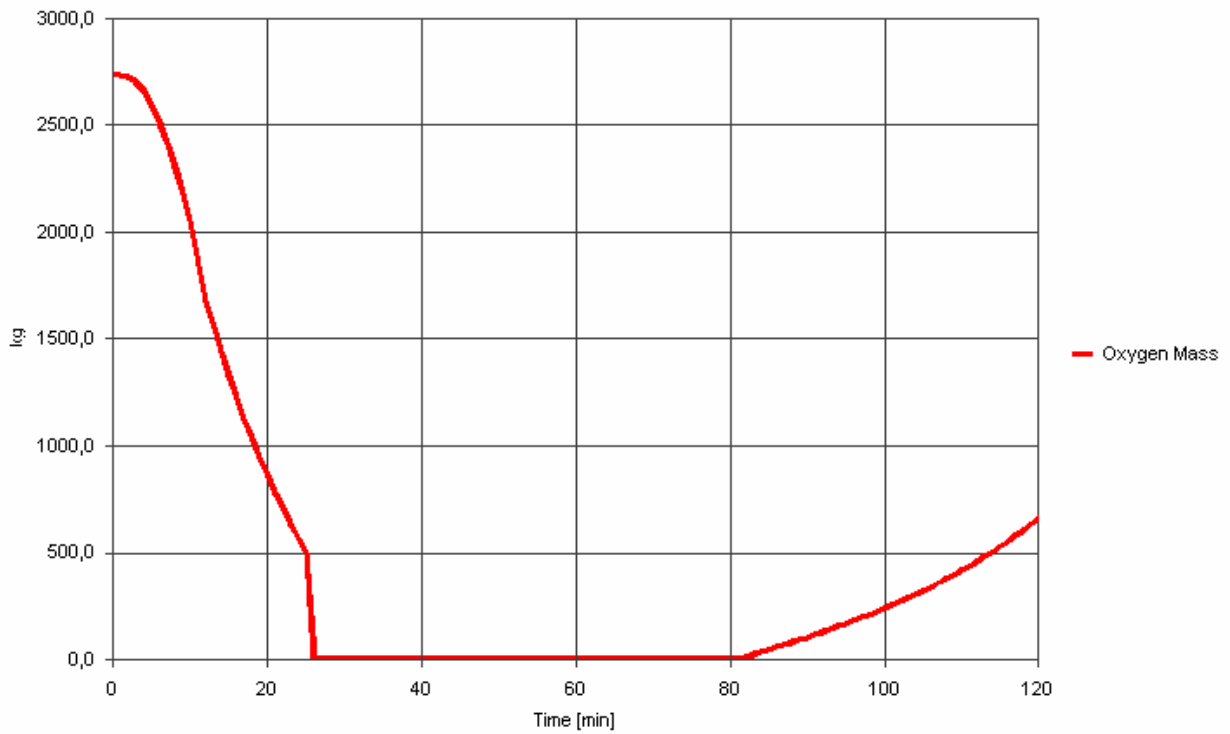
Analysis Name: grote brandruimte, thermisch zware wanden (BC1a)

h = 2,26 m

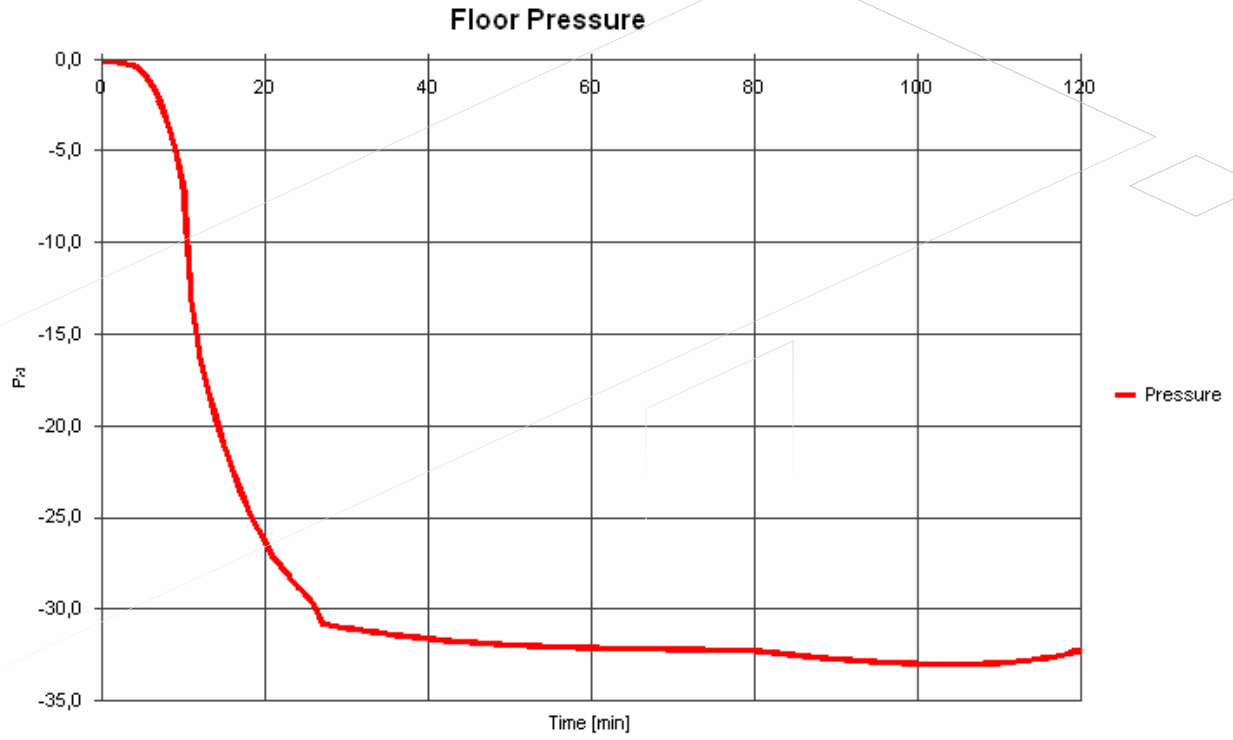
At: 10,00 min

**Figure 4. Zones Interface Elevation**

### Oxygen Mass



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch zware wanden (BC1a)



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch zware wanden (BC1a)

## OZone V 2.2.5 Report

Analysis Name:  
File Name:  
Created:

**grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)**  
variant\_BC1b.ozn  
17-9-2009 at 12:13:43

### ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy:	Combination 2Zones - 1 Zone Model
Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone	
Upper Layer Temperature	≥ 500°C
Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature	≥ Combustible Ignition Temperature = 300 °C
Interface Height	≤ 0,2 Compartment Height
Fire Area	≥ 0,25 Floor Area

### PARAMETERS

#### Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8  
Bernoulli Coefficient: 0,7

#### Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K  
Initial Pressure: 100000 Pa

#### Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 25 W/m<sup>2</sup>K  
Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m<sup>2</sup>K

#### Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec  
Time Step for Printing Results: 60 sec  
Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

Air Entrained Model: Heskestad

### COMPARTMENT

Form of Compartment: Any Compartment  
Number of Walls: 1  
Floor Area: 1000 m<sup>2</sup>  
Height: 10 m

### DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

#### Floor

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

#### Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	12	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

### Wall

Wall length: 140 m

Material (from inside to outside)

Material	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	10	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

### Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	10	4,8	Constant	no

### FIRE

Parameter	NFSC Design Fire
Fire Curve:	1000
Maximum Fire Area:	0 m <sup>2</sup>
Fire Elevation:	0 m
Fuel Height:	0 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kw/m <sup>2</sup> ]	Fire Load qf,k [MJ/m <sup>2</sup> ]	Danger of Fire Activation
User Defined	150	250	1140	1

Fire Risk Area:	12,5	m <sup>2</sup>	$\delta_{q, 1} = 1$
Danger of Fire Activation:			$\delta_{q, 2} = 1$
$q_{f, d} =$	912,0	MJ/m <sup>2</sup>	

Combustion Heat of Fuel:	17,5	MJ/kg
Combustion Efficiency Factor:	0,8	
Combustion Model:	Extended fire duration	

## RESULTS

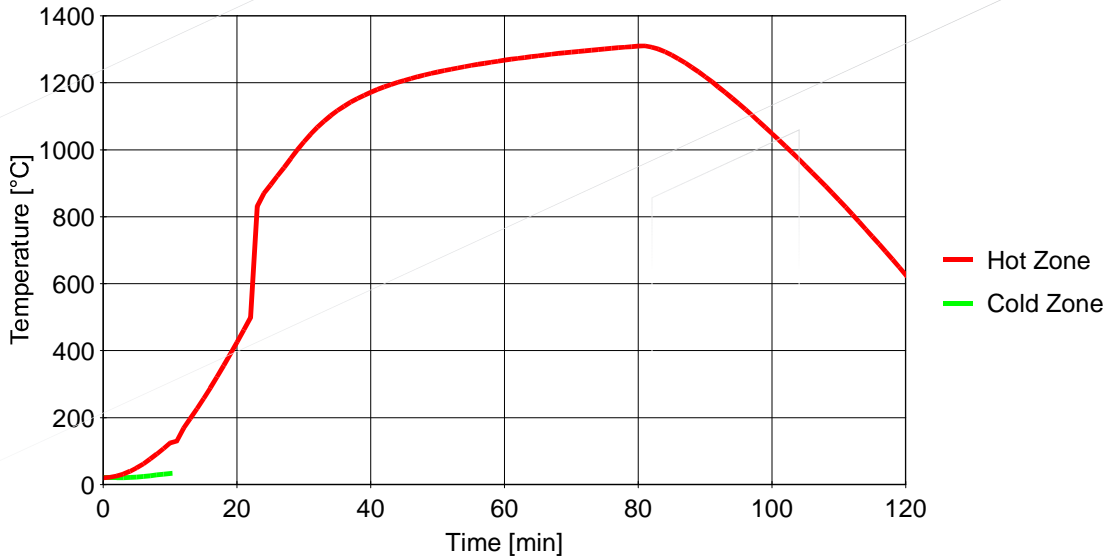
Fire Area: The maximum fire area (1000.00m<sup>2</sup>) is greater than 25% of the floor area (1000.00m<sup>2</sup>).

The fire load is uniformly distributed.

Switch to one zone: Lower layer Height < 20.0% ocompartment height at time [s] 640.00

Fully engulfed fire: Temperature of zone >500.0°C at time [s] 1330.00

### Gas Temperature



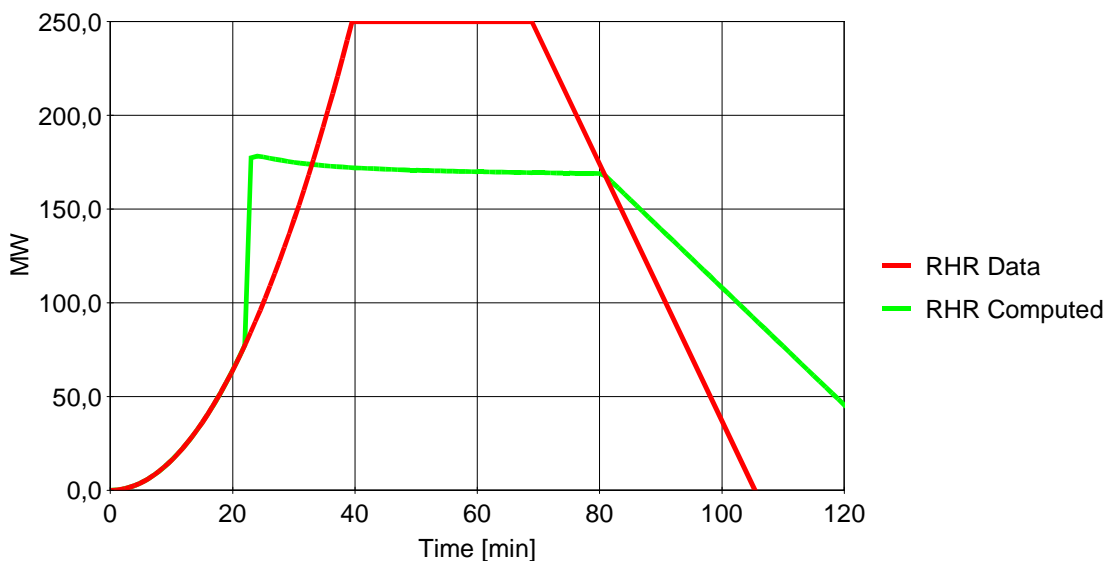
Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)

Peak: 1310 °C

At: 81 min

**Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature**

### Rate of Heat Release



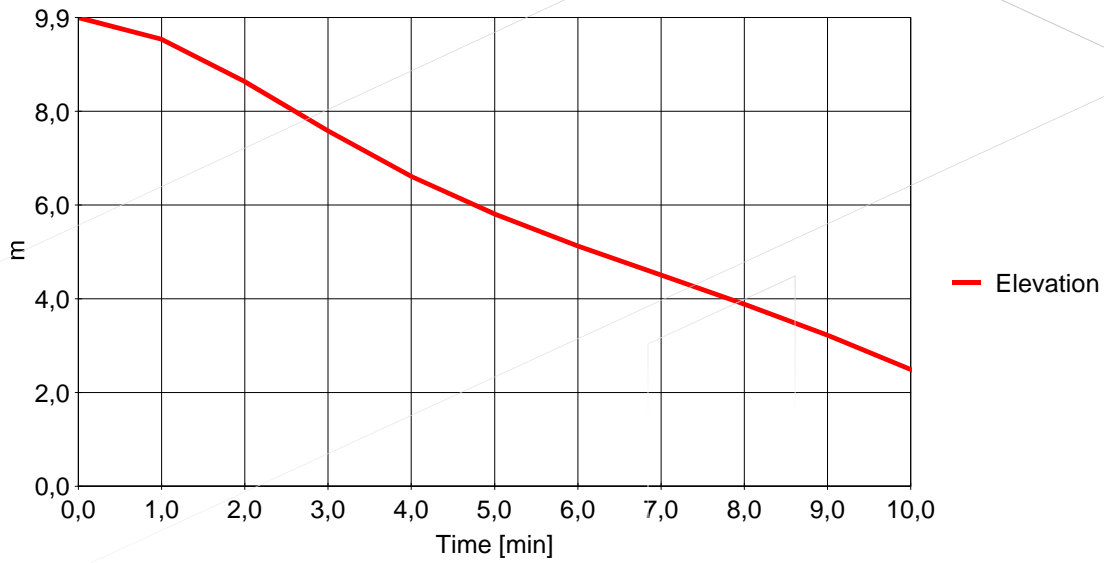
Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)

Peak: 250,00 MW

At: 39,5 min

**Figure 2. RHR Data and Computed**

### Zones Interface Elevation



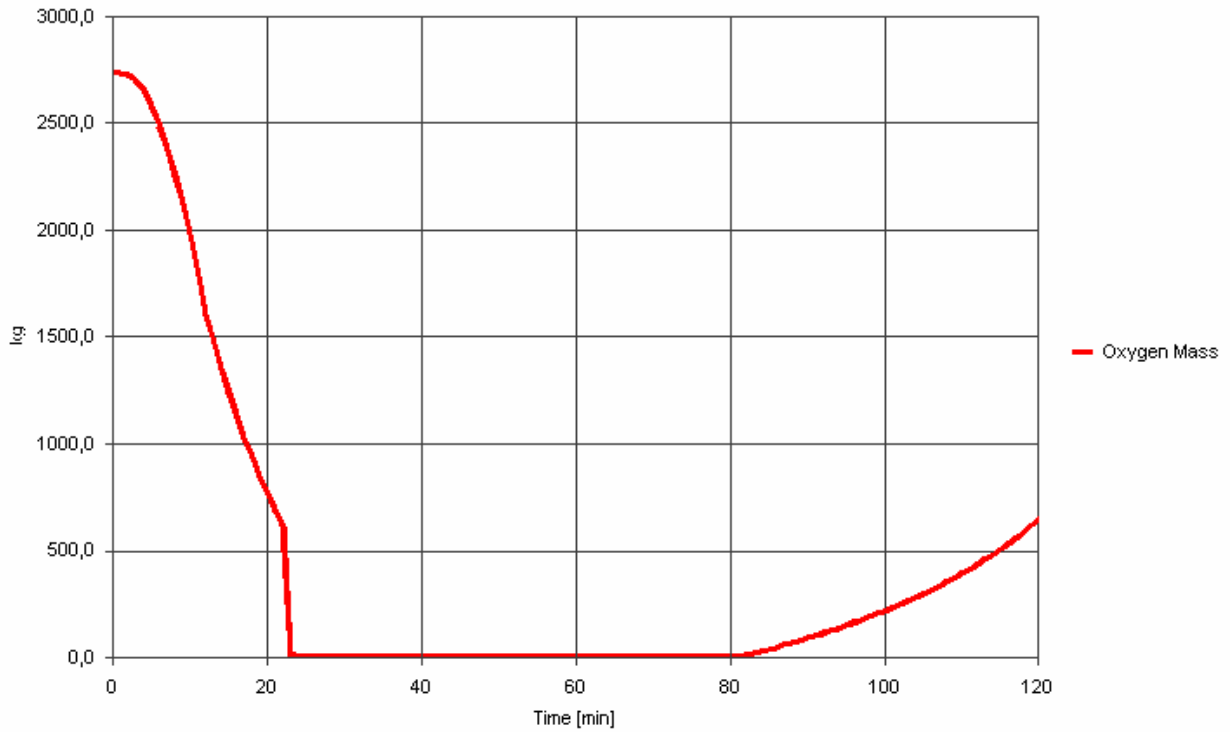
Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)

h = 2,48 m

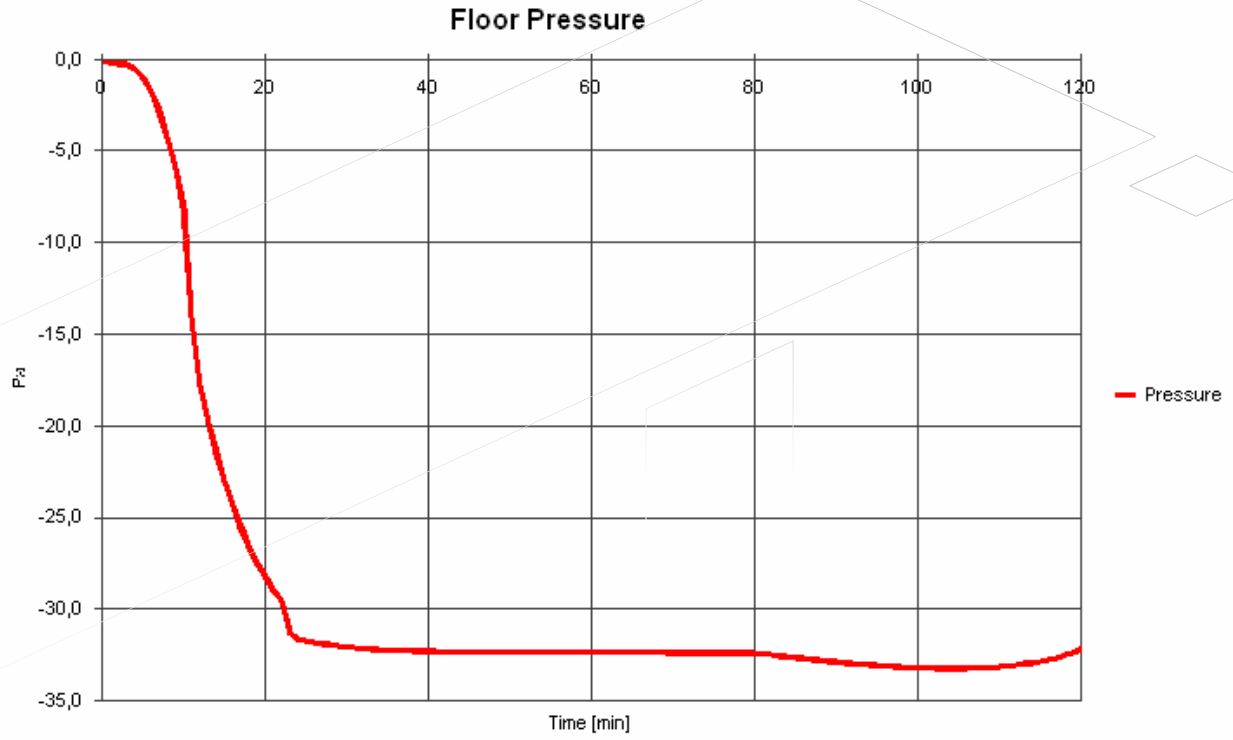
At: 10,00 min

**Figure 3. Zones Interface Elevation**

### Oxygen Mass



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)

# OZone V 2.2.5 Report

Analysis Name: **kleine brandruimte, thermisch zware wanden (BC2a)**  
 File Name: variant\_BC2a.ozn  
 Created: 16-9-2009 at 12:49:05

## ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy: Combination 2Zones - 1 Zone Model  
 Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone  
 Upper Layer Temperature  $\geq 500^{\circ}\text{C}$   
 Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature  $\geq$  Combustible Ignition Temperature =  $300^{\circ}\text{C}$   
 Interface Height  $\leq 0,2$  Compartment Height  
 Fire Area  $\geq 0,25$  Floor Area

## PARAMETERS

### Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8  
 Bernoulli Coefficient: 0,7

### Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K  
 Initial Pressure: 100000 Pa

### Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 25 W/m<sup>2</sup>K  
 Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m<sup>2</sup>K

### Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec  
 Time Step for Printing Results: 60 sec  
 Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

Air Entrained Model: Heskestad

## COMPARTMENT

Form of Compartment: Any Compartment  
 Number of Walls: 1  
 Floor Area: 100 m<sup>2</sup>  
 Height: 3 m

## DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

### Floor

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

### Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	12	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600



### Wall 1

Wall length: 42,3 m

Material (from inside to outside)

Normal weight Concrete [EN1994-1-2]  
Glass wool & Rock wool

Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
15	2300	1,6	1000
10	60	0,037	1030

#### Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	3	1,5	Constant	no

## FIRE

Fire Curve:

Maximum Fire Area:

Fire Elevation:

Fuel Height:

NFSC Design Fire

100 m<sup>2</sup>

0 m

0 m

Occupancy

User Defined

Fire Growth Rate

150

RHRf [kw/m<sup>2</sup>]

250

Fire Load q<sub>f,k</sub> Danger of Fire Activation

[MJ/m<sup>2</sup>]

1140

1

Fire Risk Area:

12,5

m<sup>2</sup>

$\delta_{q, 1} = 1$

Danger of Fire Activation:

$\delta_{q, 2} = 1$

q<sub>f, d</sub>

912,0

MJ/m<sup>2</sup>

Combustion Heat of Fuel:

17,5

MJ/kg

Combustion Efficiency Factor:

0,8

Combustion Model:

Extended fire duration

## RESULTS

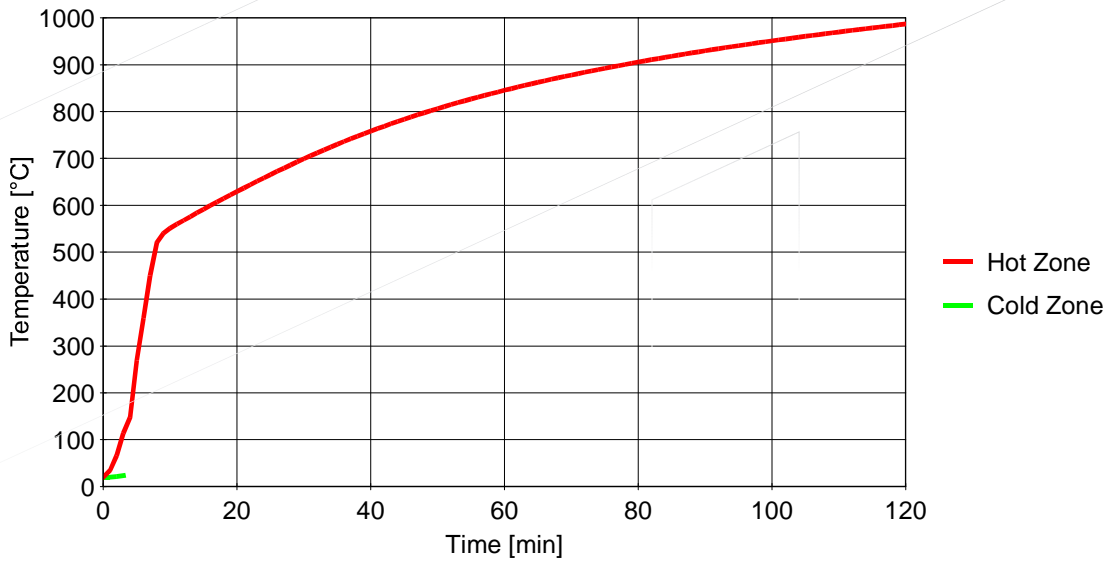
Fire Area: The maximum fire area ( 100.00m<sup>2</sup>) is greater than 25% of the floor area ( 100.00m<sup>2</sup>).

The fire load is uniformly distributed.

Switch to one zone: Lower layer Height < 20.0% ocompartment height at time [s] 238.00

Fully engulfed fire: Temperature of zone >500.0°C at time [s] 453.87

### Gas Temperature



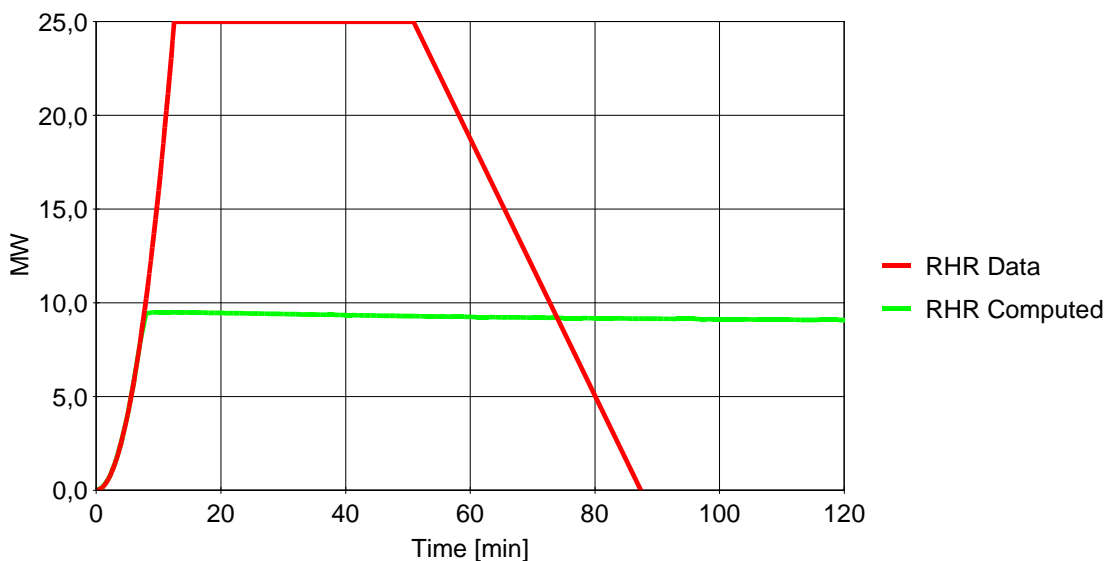
Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch zware wanden (BC2a)

Peak: 987 °C

At: 120 min

**Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature**

### Rate of Heat Release



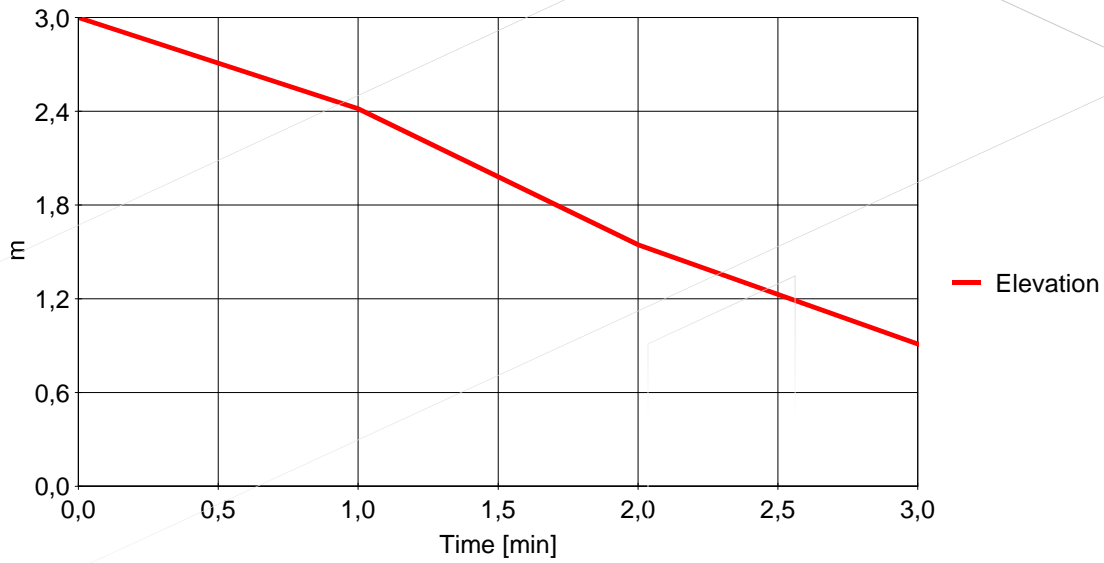
Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch zware wanden (BC2a)

Peak: 25,00 MW

At: 12,5 min

**Figure 2. RHR Data and Computed**

### Zones Interface Elevation



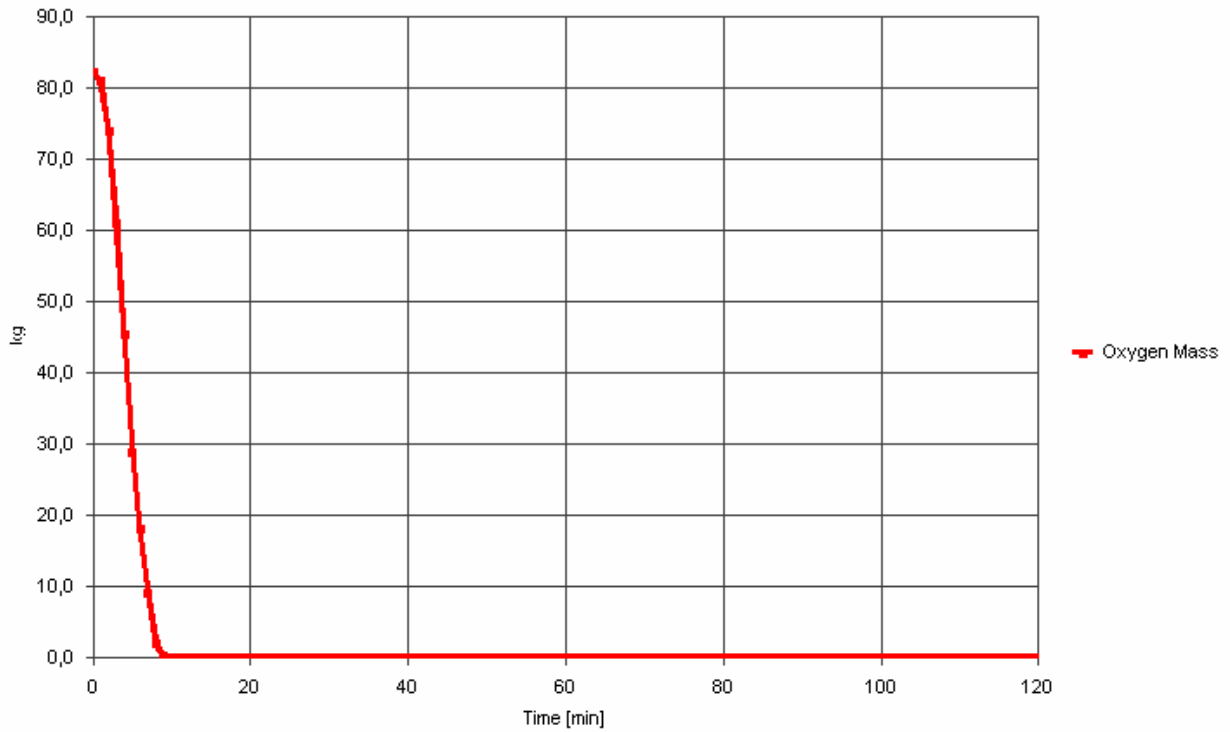
Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch zware wanden (BC2a)

h = 0,90 m

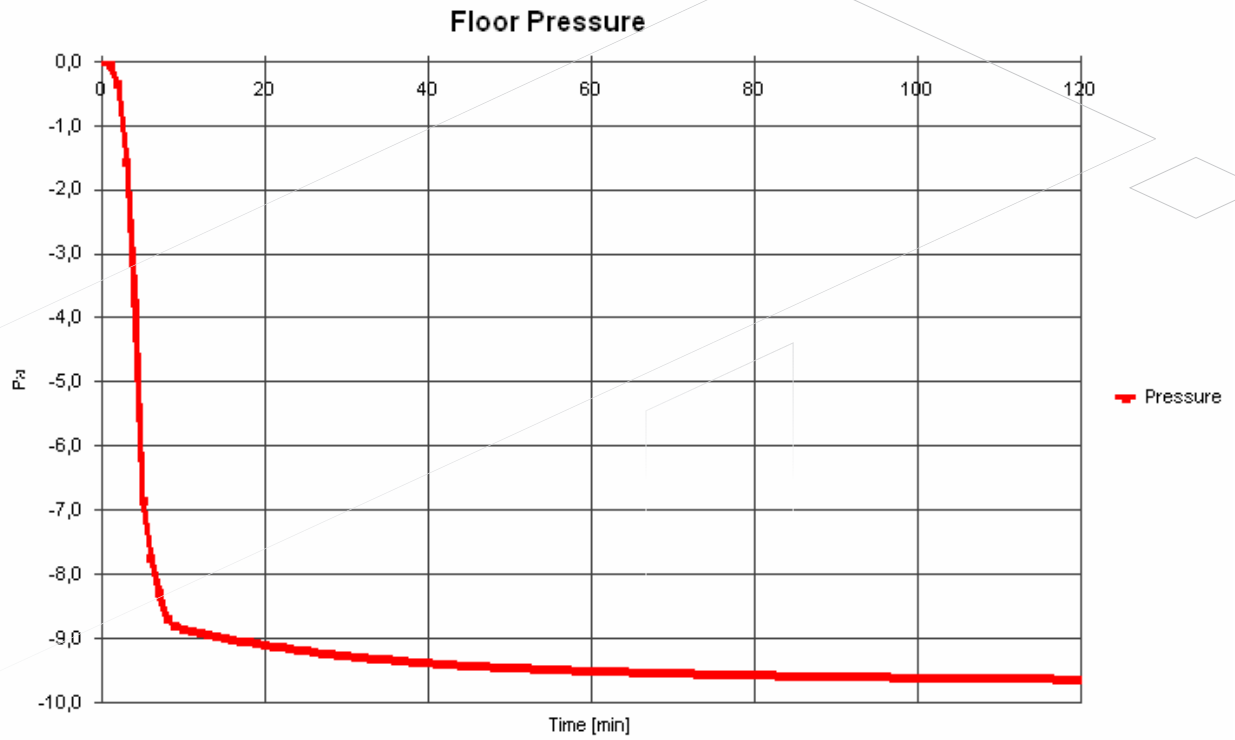
At: 3,00 min

**Figure 3. Zones Interface Elevation**

### Oxygen Mass



Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch zware wanden (BC2a)



Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch zware wanden (BC2a)

# OZone V 2.2.5 Report

Analysis Name:  
File Name:  
Created:

kleine brandruimte, thermisch lichte wanden (BC2b)  
variant\_BC2b.ozn  
16-9-2009 at 12:42:44

## ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy:	Combination 2Zones - 1 Zone Model
Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone	
Upper Layer Temperature	≥ 500°C
Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature	≥ Combustible Ignition Temperature = 300 °C
Interface Height	≤ 0,2 Compartment Height
Fire Area	≥ 0,25 Floor Area

## PARAMETERS

### Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8  
Bernoulli Coefficient: 0,7

### Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K  
Initial Pressure: 100000 Pa

### Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 25 W/m<sup>2</sup>K  
Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m<sup>2</sup>K

### Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec  
Time Step for Printing Results: 60 sec  
Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

Air Entrained Model: Heskestad

## COMPARTMENT

Form of Compartment: Any Compartment  
Number of Walls: 1  
Floor Area: 100 m<sup>2</sup>  
Height: 3 m

## DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

### Floor

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

### Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	12	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

### Wall 1

Wall length: 42,3 m

Material (from inside to outside)

Material	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	10	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

### Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	3	1,5	Constant	no

### FIRE

Parameter	NFSC Design Fire
Fire Curve:	100
Maximum Fire Area:	0
Fire Elevation:	0
Fuel Height:	0

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kw/m <sup>2</sup> ]	Fire Load qf,k [MJ/m <sup>2</sup> ]	Danger of Fire Activation
User Defined	150	250	1140	1

Fire Risk Area:	Danger of Fire Activation:	q <sub>f, d</sub>
12,5	δ <sub>q, 1</sub> = 1	912,0
	δ <sub>q, 2</sub> = 1	

Combustion Heat of Fuel:	Combustion Efficiency Factor:	Combustion Model:
17,5	0,8	Extended fire duration

## RESULTS

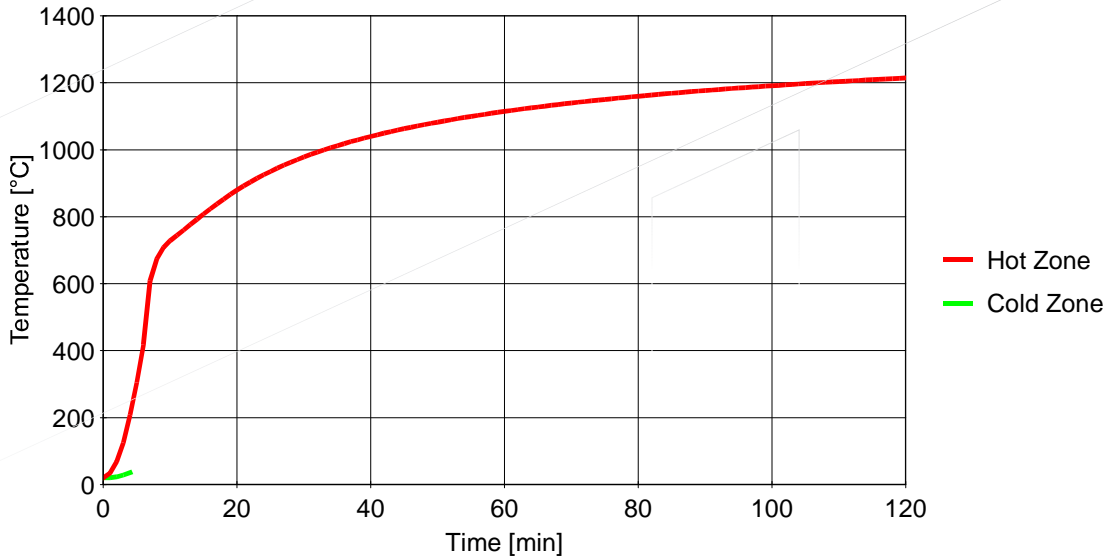
Fire Area: The maximum fire area ( 100.00m<sup>2</sup>) is greater than 25% of the floor area ( 100.00m<sup>2</sup>).

The fire load is uniformly distributed.

Switch to one zone: Lower layer Height < 20.0% ocompartment height at time [s] 245.57

Fully engulfed fire: Temperature of zone >500.0°C at time [s] 403.19

### Gas Temperature



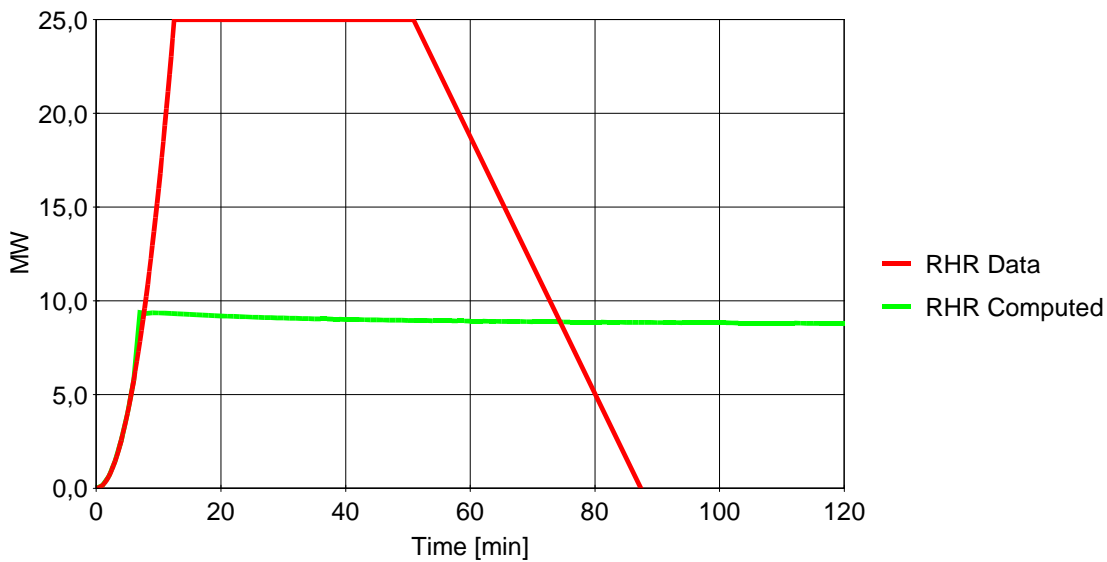
Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch lichte wanden (BC2b)

Peak: 1215 °C

At: 120 min

**Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature**

### Rate of Heat Release



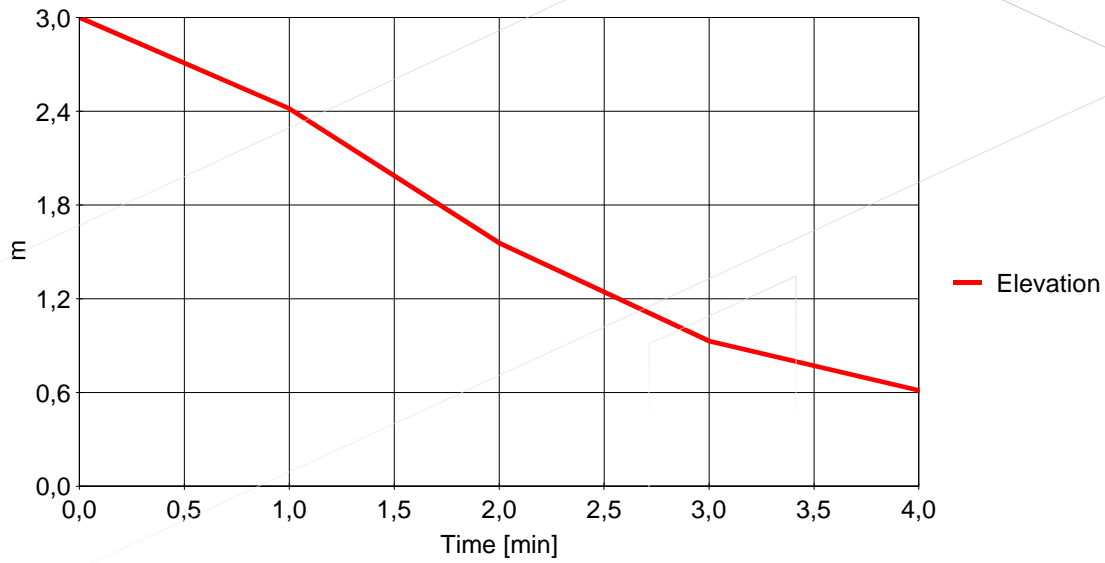
Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch lichte wanden (BC2b)

Peak: 25,00 MW

At: 12,5 min

**Figure 2. RHR Data and Computed**

### Zones Interface Elevation



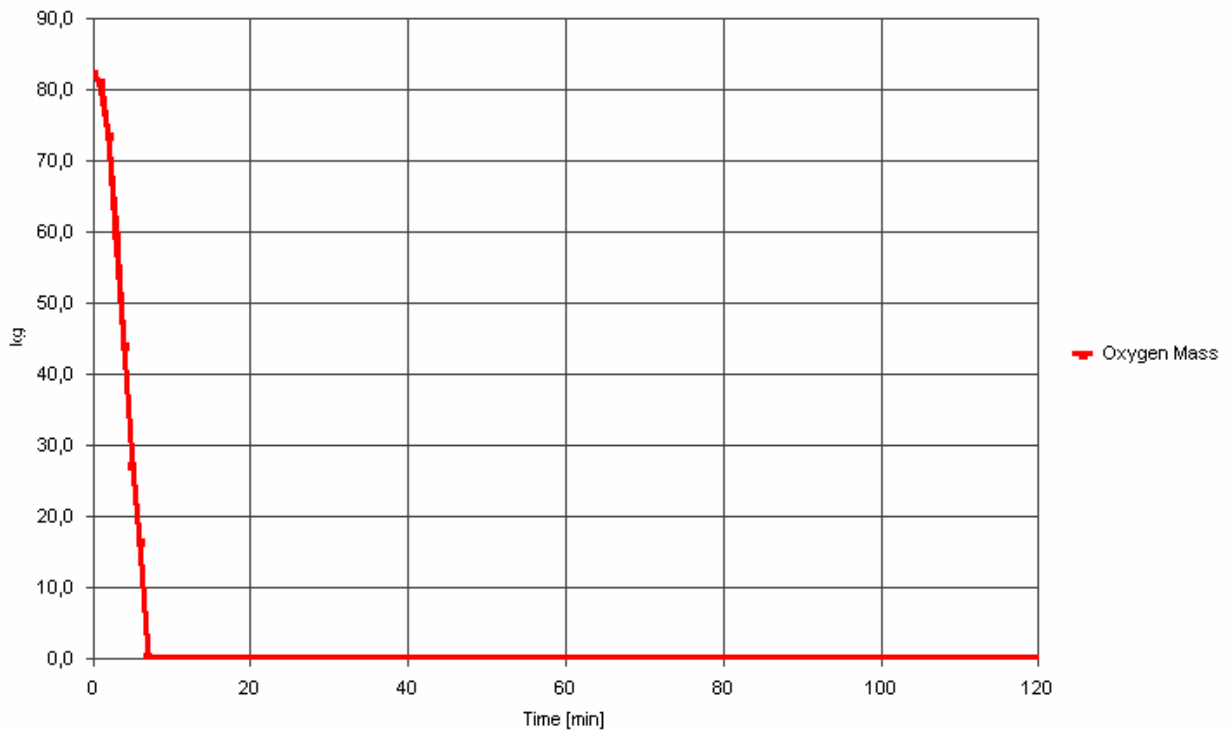
Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch lichte wanden (BC2b)

h = 0,60 m

At: 4,00 min

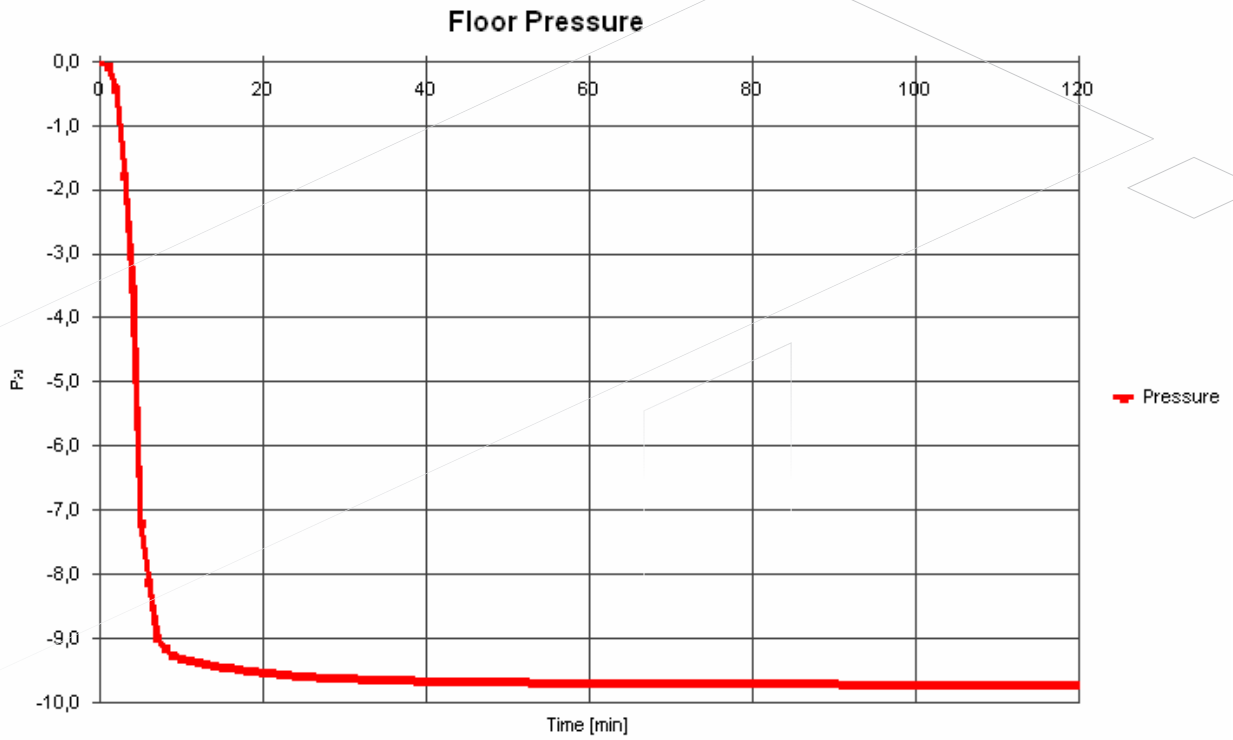
**Figure 3. Zones Interface Elevation**

### Oxygen Mass



Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch lichte wanden (BC2b)





Analysis Name: kleine brandruimte, thermisch lichte wanden (BC2b)

## OZone V 2.2.6 Report (afwijkend brandscenario grote ruimte)

Analysis Name: **grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referentievermogen**  
 File Name: variant\_BC1b1.ozn  
 Created: 15-11-2009 at 11:31:06

### ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy: Combination 2Zones - 1 Zone Model  
 Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone  
 Upper Layer Temperature  $\geq 500^{\circ}\text{C}$   
 Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature  $\geq$  Combustible Ignition Temperature =  $300^{\circ}\text{C}$   
 Interface Height  $\leq 0,2$  Compartment Height  
 Fire Area  $\geq 0,25$  Floor Area

### PARAMETERS

#### Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8  
 Bernoulli Coefficient: 0,7

#### Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K  
 Initial Pressure: 100000 Pa

#### Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface:  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$   
 Convection Coefficient at the Cold Surface:  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$

#### Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec  
 Time Step for Printing Results: 60 sec  
 Maximum Time Step for Calculation: 10 sec

Air Entrained Model: Heskestad

### COMPARTMENT

Form of Compartment: Any Compartment  
 Number of Walls: 1  
 Floor Area: 1000  $\text{m}^2$   
 Height: 10 m

### DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

#### Floor

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

#### Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	12	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

### Wall 1

Wall length: 140 m

Material (from inside to outside)

Material	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600
Glass wool & Rock wool	10	60	0,037	1030
Steel [EN1994-1-2]	0,03	7850	45	600

#### Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
0	10	4,8	Constant	no

## FIRE

Parameter	NFSC Design Fire
Fire Curve:	1000
Maximum Fire Area:	0 m <sup>2</sup>
Fire Elevation:	0 m
Fuel Height:	0 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kw/m <sup>2</sup> ]	Fire Load q <sub>f,k</sub> [MJ/m <sup>2</sup> ]	Danger of Fire Activation
User Defined	600	1000	1140	1

Fire Risk Area: 12,5 m<sup>2</sup>       $\delta_{q, 1} = 1$

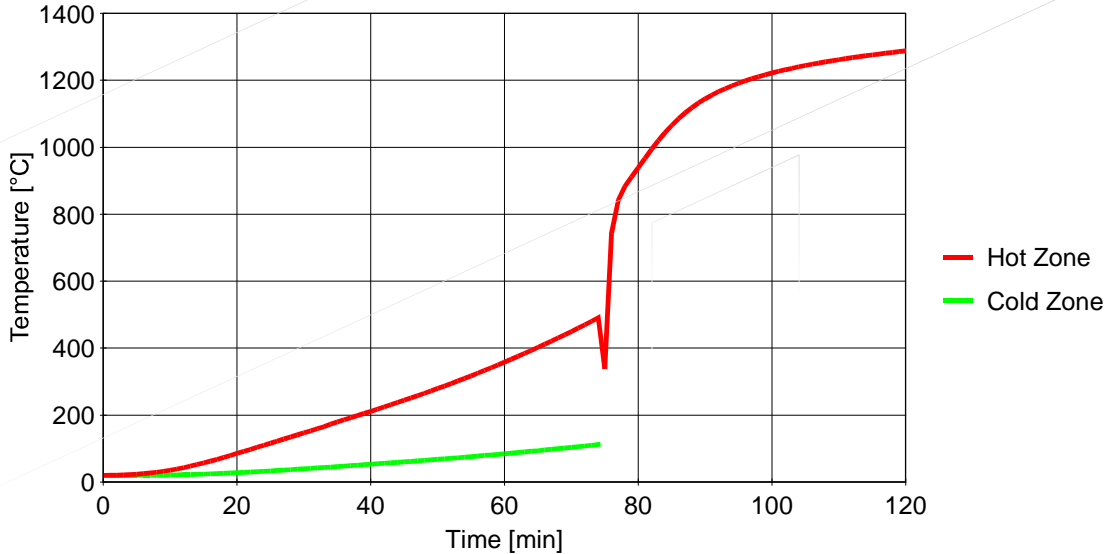
Danger of Fire Activation:  $\delta_{q, 2} = 1$   
 $q_{f, d} = 912,0$  MJ/m<sup>2</sup>

Combustion Heat of Fuel: 17,5 MJ/kg  
 Combustion Efficiency Factor: 0,8  
 Combustion Model: Extended fire duration

## RESULTS

Fire Area: The maximum fire area (1000.00m<sup>2</sup>) is greater than 25% of the floor area (1000.00m<sup>2</sup>).  
 The fire load is uniformly distributed.  
 Switch to one zone + Fully engulfed fire: Temperature of zone >500.0°C at time [s] 4498.00

### Gas Temperature



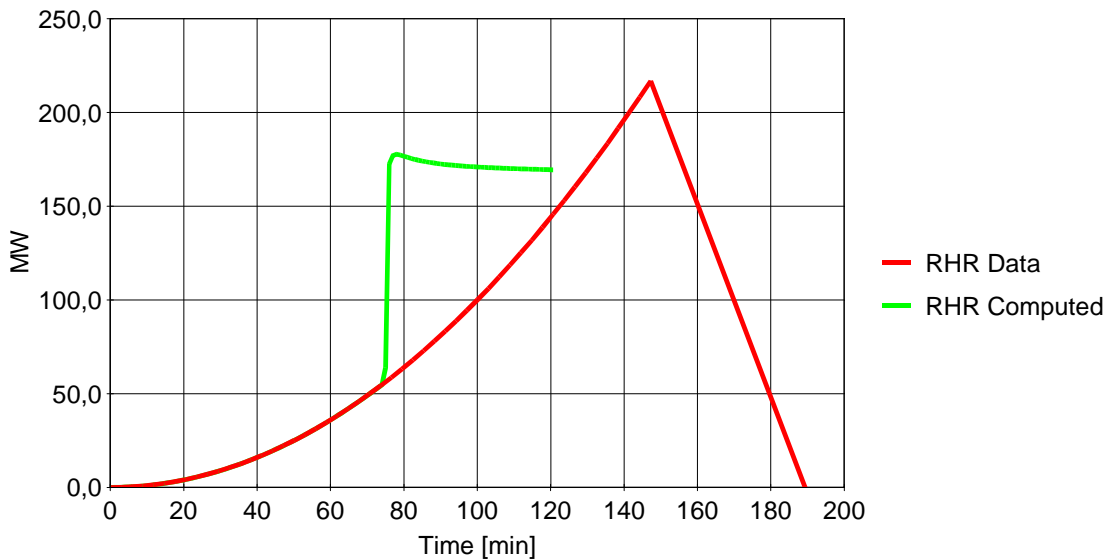
ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referer

Peak: 1288 °C

At: 120 min

**Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature**

### Rate of Heat Release



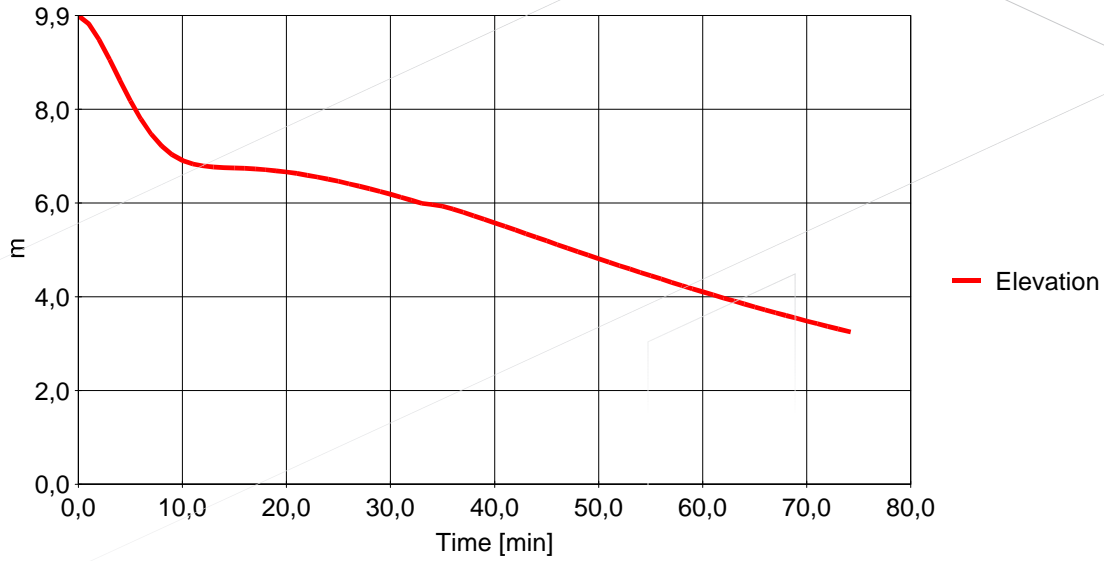
ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referer

Peak: 216,78 MW

At: 147,2 min

**Figure 2. RHR Data and Computed**

### Zones Interface Elevation



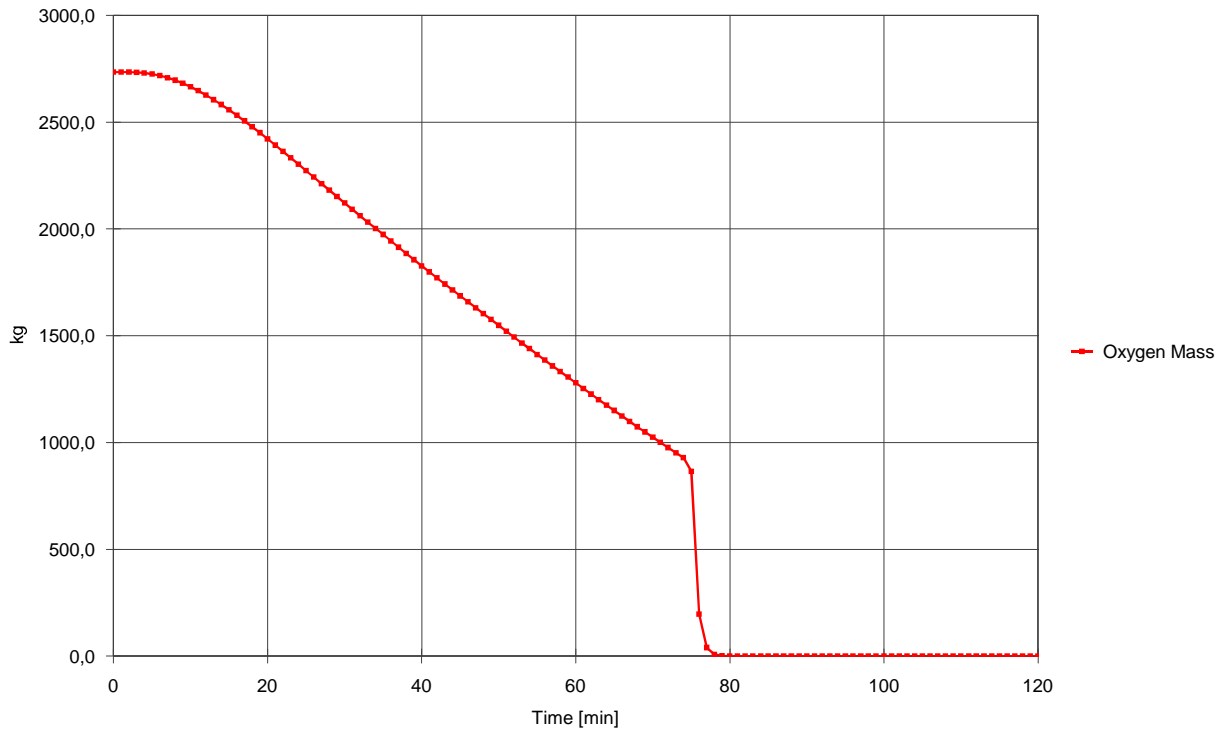
ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referer

h = 3,24 m

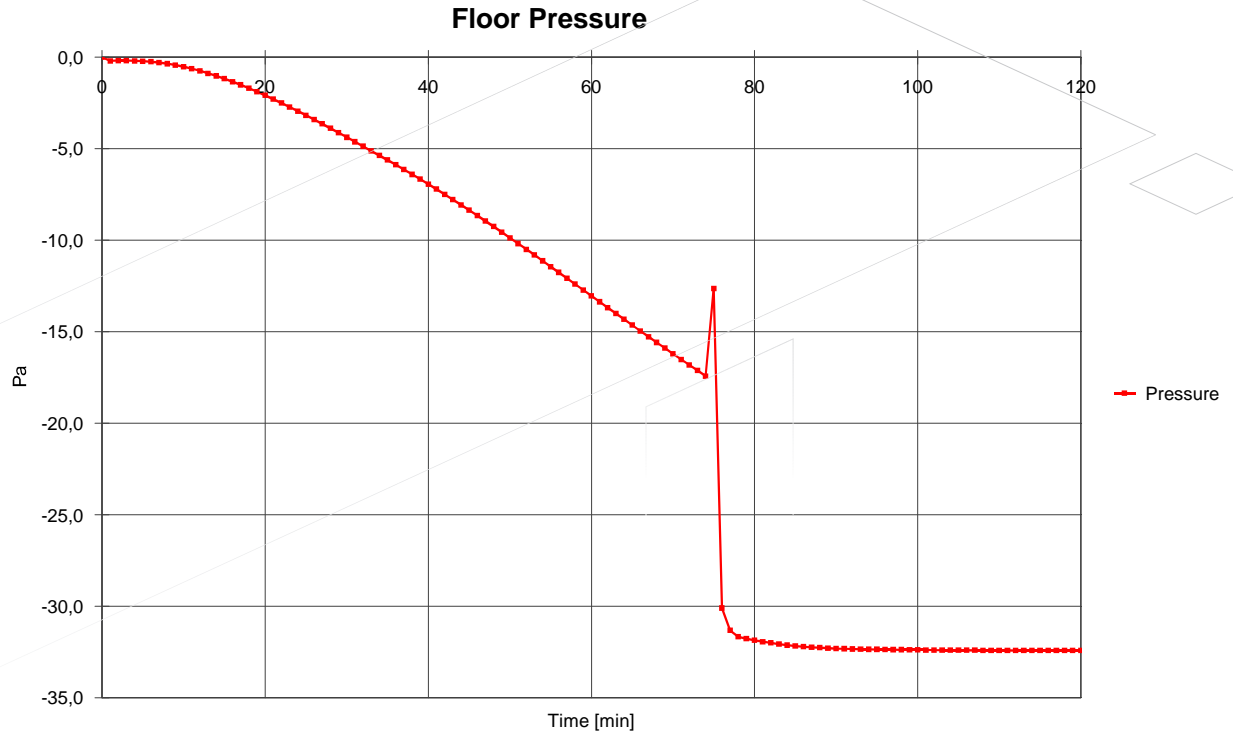
At: 74,00 min

**Figure 3. Zones Interface Elevation**

### Oxygen Mass



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referentievermogen



Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referentievermogen

## Bijlage 3 Thermodynamische simulatieberekeningen

# Thermodynamische berekening (input constante rooklaagtemperatuur)

## VOLTRA - Invoergegevens

VOLTRA gegevensbestand: sandwichpaneel 400 graden.vtr

### RASTER

Raster-eenheid = 0.001 m

Nr.	X	Y	Z
0-1	5.000	10.000	10.000
1-2	1.000	10.000	10.000
2-3	2.000	10.000	10.000
3-4	2.000	10.000	10.000
4-5	2.000	10.000	10.000
5-6	2.000	10.000	10.000
6-7	2.000	10.000	10.000
7-8	2.000	10.000	10.000
8-9	2.000	10.000	10.000
9-10	2.000	10.000	10.000
10-11	2.000	10.000	10.000
11-12	2.000	10.000	10.000
12-13	2.000	10.000	10.000
13-14	2.000	10.000	10.000
14-15	2.000	10.000	10.000
15-16	2.000	10.000	10.000
16-17	2.000	10.000	10.000
17-18	2.000	10.000	10.000
18-19	2.000	10.000	10.000
19-20	2.000		
20-21	2.000		
21-22	2.000		
22-23	2.000		
23-24	2.000		
24-25	2.000		
25-26	2.000		
26-27	2.000		
27-28	2.000		
28-29	2.000		
29-30	2.000		
30-31	2.000		
31-32	2.000		
32-33	2.000		
33-34	2.000		
34-35	2.000		
35-36	2.000		
36-37	2.000		
37-38	2.000		
38-39	2.000		
39-40	2.000		
40-41	2.000		
41-42	2.000		
42-43	1.000		
43-44	5.000		
Som	92.000	190.000	190.000

### BLOKKEN

Nr.	Kleur	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
1	50	0	1	0	19	0	19
2	51	43	44	0	19	0	19
3	1	1	2	0	19	0	19
4	5	2	42	0	19	0	19
5	1	42	43	0	19	0	19

Nr.	Kleur	Xmin	Ymax	Zmin	Xmax	Ymin	Zmax
1	50	0.000	5.000	0.000	190.000	0.000	190.000



2	51	87.000	92.000	0.000	190.000	0.000	190.000
3	1	5.000	6.000	0.000	190.000	0.000	190.000
4	5	6.000	86.000	0.000	190.000	0.000	190.000
5	1	86.000	87.000	0.000	190.000	0.000	190.000

FUNCTIES

T01: STEPO

Niveau 1 = 20°C

Niveau 2 = 400°C

Start van overgang = 1 min

Overgang = 0 min

L01: FILE

G:\Projecten\z09\z090360aa\Rockwool-voltraberekeningen\geleiding fla

C01: FILE

G:\Projecten\z09\z090360aa\Rockwool-voltraberekeningen\warmtecapaciteit2.fce

KLEUREN

Klr.	Type	CEN-regel	Naam	lambda	eps	ro	c	t	h
q				[W/mK]	[-]	[kg/m3]	[J/kgK]	[°C]	[W/m²K]
1	MATERIAL		staal	52.000	0.90	7800.0	530.0		
5	MATERIAL		PUR	L01	0.90	60.0	C01		
50	BC_SIMPL	NIHIL	omgeving					20.0	7.70
0									
51	BC_SKY	NIHIL	rooklaag						0
Kleur	ta	hc	Pc	tr	C1	C2	C3	Zon	rs
ts	[°C]	[W/m²K]	[W]	[°C]	[-]	[-]	[-]		[-]
1									0.10
0.00									
5									0.10
0.00									
50								NO	
51	T01	5.00		T01				NO	

UITVOER-KNOPEN

Nr.	X	Y	Z
1	43	9	9
2	42	9	9
3	41	9	9
4	37	9	9
5	32	9	9
6	27	9	9
7	22	9	9
8	17	9	9
9	12	9	9
10	7	9	9
11	2	9	9
12	1	9	9

Rekenparameters

Tijdsinterval tussen rekenstappen = 0000:00:00:10

Opstart-rekenduur = 0000:00:00:00

Rekenduur = 0000:01:00:00

Dagnummer bij start van berekening = 1

Iteratiecycli = 10

Maximum aantal iteraties (per iteratiecyclus) = 1000000

Maximum temperatuurverschil (per iteratiecyclus) = 0.0001°C

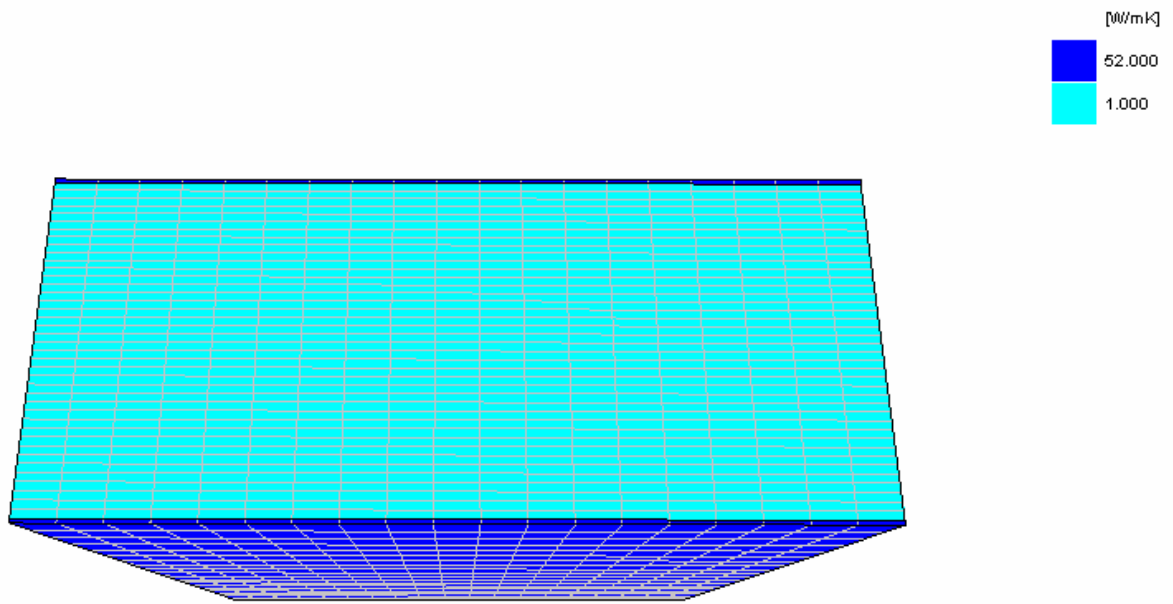
Warmteconvergentie voor totaal object = 0.001 %

Warmteconvergentie voor meest nadelige knoop = 1 %

Niet-lineaire straling

Minimum beduidende hoekfactor = 0.0001

Aantal zichtbaarheidsstralen tussen oppervlakken = 100  
Warmte-overgangscoefficiënt voor zwarte straling (lineaire straling) = 5.25 W/(m<sup>2</sup>.K)  
Geen herrekening van CEN-waarden



**VOLTRA - Rekenresultaten**  
**Constate rooklaagtemperatuur 400°C**

VOLTRA gegevensbestand: sandwichpaneel 400 graden.vtr  
Aantal knooppunten = 17200

Tijdstap 0000:00:00:00

Klr.	Type	Naam	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	MATERIAL	staal	20.00	1	0	0	20.00	1	0	0
5	MATERIAL	PUR	20.00	2	0	0	20.00	2	0	0
50	BC_SIMPL	omgeving	20.00	1	0	0	20.00	1	0	0
51	BC_SKY	rooklaag	20.00	43	0	0	20.00	43	0	0

Klr.	Type	Naam	ta [°C]	Flux in [W]	Flux uit [W]
50	BC_SIMPL	omgeving		0.00	0.00
51	BC_SKY	rooklaag		0.00	0.00

VOLTRA gegevensbestand: sandwichpaneel 400 graden.vtr  
Aantal knooppunten = 17200

Tijdstap 0000:00:30:00

Klr.	Type	Naam	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	MATERIAL	staal	331.29	43	0	13	333.17	1	0	0
5	MATERIAL	PUR	331.41	42	0	13	333.06	2	0	0
50	BC_SIMPL	omgeving	333.17	1	1	16	333.17	1	0	0
51	BC_SKY	rooklaag	331.29	43	0	13	331.29	43	19	19

Klr.	Type	Naam	ta [°C]	Flux in [W]	Flux uit [W]
50	BC_SIMPL	omgeving		0.00	87.05
51	BC_SKY	rooklaag		144.59	0.00

## Thermodynamische berekening (input fysisch brandmodel)

### VOLTRA - Invoergegevens

VOLTRA gegevensbestand: paneel\_fysischebrand.vtr

Situatie: thermisch lichte constructie, grote brandruimte

#### RASTER

Raster-eenheid = 0.001 m

Nr.	X	Y	Z
0-1	5.000	10.000	10.000
1-2	1.000	10.000	10.000
2-3	2.000	10.000	10.000
3-4	2.000	10.000	10.000
4-5	2.000	10.000	10.000
5-6	2.000	10.000	10.000
6-7	2.000	10.000	10.000
7-8	2.000	10.000	10.000
8-9	2.000	10.000	10.000
9-10	2.000	10.000	10.000
10-11	2.000	10.000	10.000
11-12	2.000	10.000	10.000
12-13	2.000	10.000	10.000
13-14	2.000	10.000	10.000
14-15	2.000	10.000	10.000
15-16	2.000	10.000	10.000
16-17	2.000	10.000	10.000
17-18	2.000	10.000	10.000
18-19	2.000	10.000	10.000
19-20	2.000		
20-21	2.000		
21-22	2.000		
22-23	2.000		
23-24	2.000		
24-25	2.000		
25-26	2.000		
26-27	2.000		
27-28	2.000		
28-29	2.000		
29-30	2.000		
30-31	2.000		
31-32	2.000		
32-33	2.000		
33-34	2.000		
34-35	2.000		
35-36	2.000		
36-37	2.000		
37-38	2.000		
38-39	2.000		
39-40	2.000		
40-41	2.000		
41-42	2.000		
42-43	1.000		
43-44	5.000		
Som	92.000	190.000	190.000

#### BLOKKEN

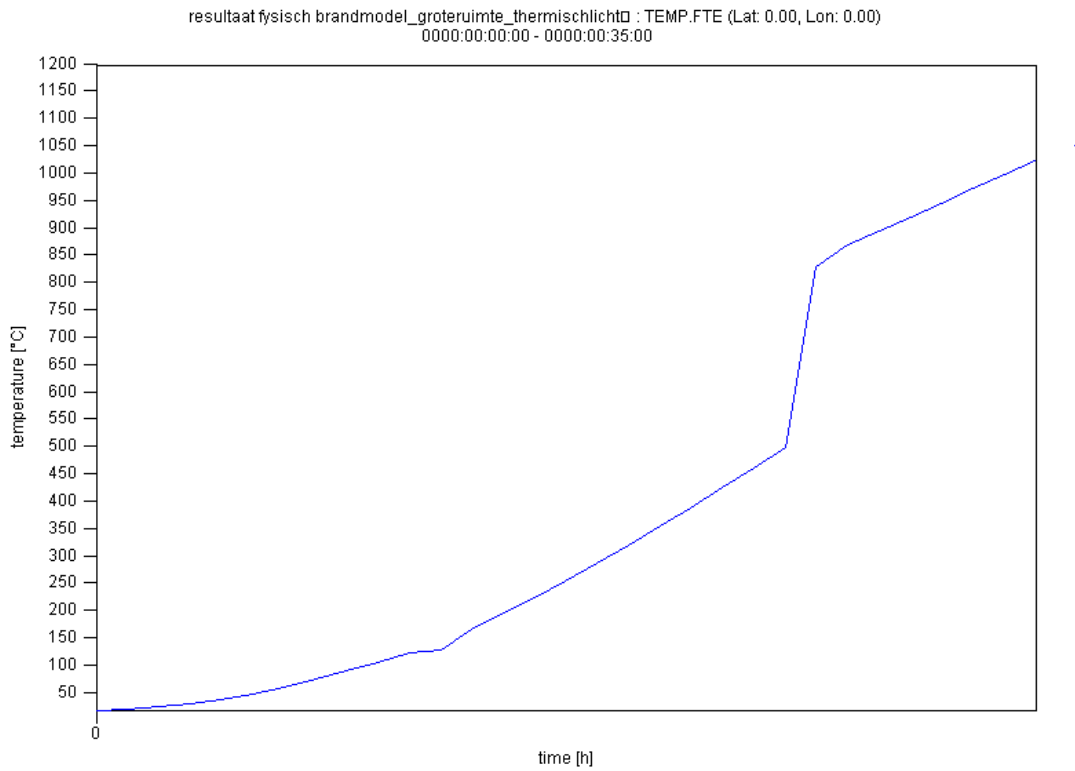
Nr.	Kleur	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
1	50	0	1	0	19	0	19
2	51	43	44	0	19	0	19
3	1	1	2	0	19	0	19
4	5	2	42	0	19	0	19
5	1	42	43	0	19	0	19

Nr.	Kleur	Xmin	Ymax	Zmin	Xmax	Ymin	Zmax
1	50	0.000	5.000	0.000	190.000	0.000	190.000
2	51	87.000	92.000	0.000	190.000	0.000	190.000
3	1	5.000	6.000	0.000	190.000	0.000	190.000
4	5	6.000	86.000	0.000	190.000	0.000	190.000
5	1	86.000	87.000	0.000	190.000	0.000	190.000

FUNCTIES

T01: FILE

G:\Projecten\z09\z090360aa\voltra natuurlijk\temp.FTE



Figuur: functie voor grote hal, thermisch lichte constructie (250 kW/m<sup>2</sup>, t= 150 s).



6	27	9	9
7	22	9	9
8	17	9	9
9	12	9	9
10	7	9	9
11	2	9	9
12	1	9	9

#### Rekenparameters

Tijdsinterval tussen rekenstappen = 0000:00:00:10

Opstart-rekenduur = 0000:00:00:00

Rekenduur = 0000:00:30:00

Dagnummer bij start van berekening = 1

Iteratiecycli = 10

Maximum aantal iteraties (per iteratiecyclus) = 1000000

Maximum temperatuurverschil (per iteratiecyclus) = 0.0001°C

Warmte-divergentie voor totaal object = 0.001 %

Warmte-divergentie voor meest nadelige knoop = 1 %

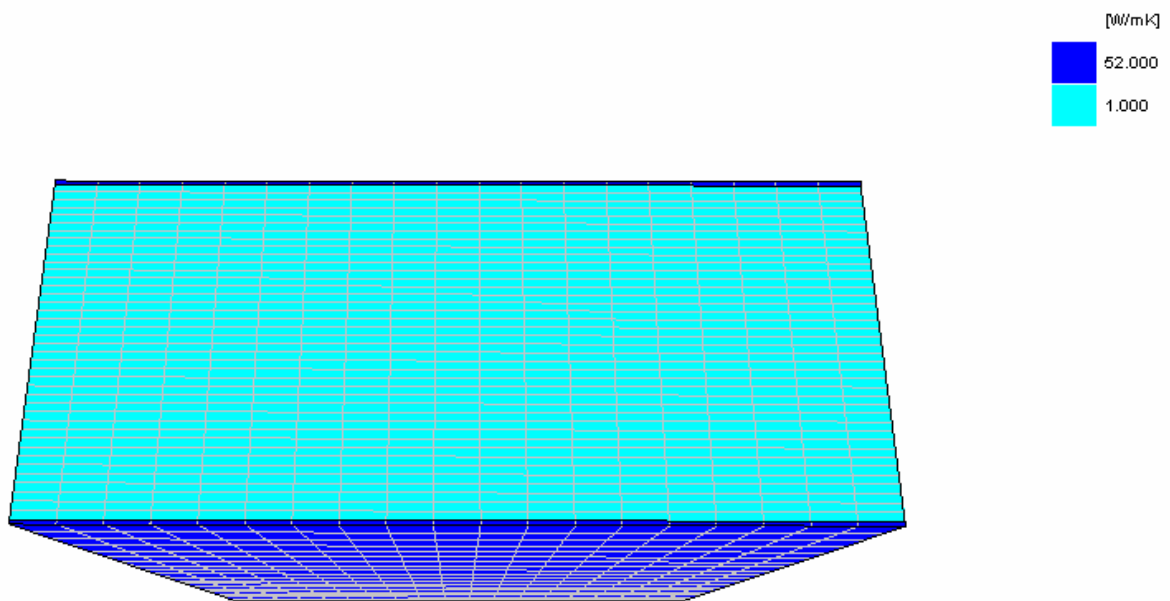
Niet-lineaire straling

Minimum beduidende hoekfactor = 0.0001

Aantal zichtbaarheidsstralen tussen oppervlakken = 100

Warmte-overgangscoefficiënt voor zwarte straling (lineaire straling) = 5.25 W/(m<sup>2</sup>.K)

Geen herrekening van CEN-waarden



**VOLTRA - Rekenresultaten**

Voor de situatie grote hal, thermisch lichte constructie (250 kW/m<sup>2</sup>, t= 150 s).

VOLTRA gegevensbestand: paneel\_fysischebrand.vtr

Aantal knooppunten = 17200

Tijdstap 0000:00:00:00

Klr.	Type	Naam	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	MATERIAL	staal	20.00	1	0	0	20.00	1	0	0
5	MATERIAL	PUR	20.00	2	0	0	20.00	2	0	0
50	BC_SIMPL	omgeving	20.00	1	0	0	20.00	1	0	0
51	BC_SKY	rooklaag	20.00	43	0	0	20.00	43	0	0

Klr.	Type	Naam	ta [°C]	Flux in [W]	Flux uit [W]
50	BC_SIMPL	omgeving		0.00	0.00
51	BC_SKY	rooklaag		0.00	0.00

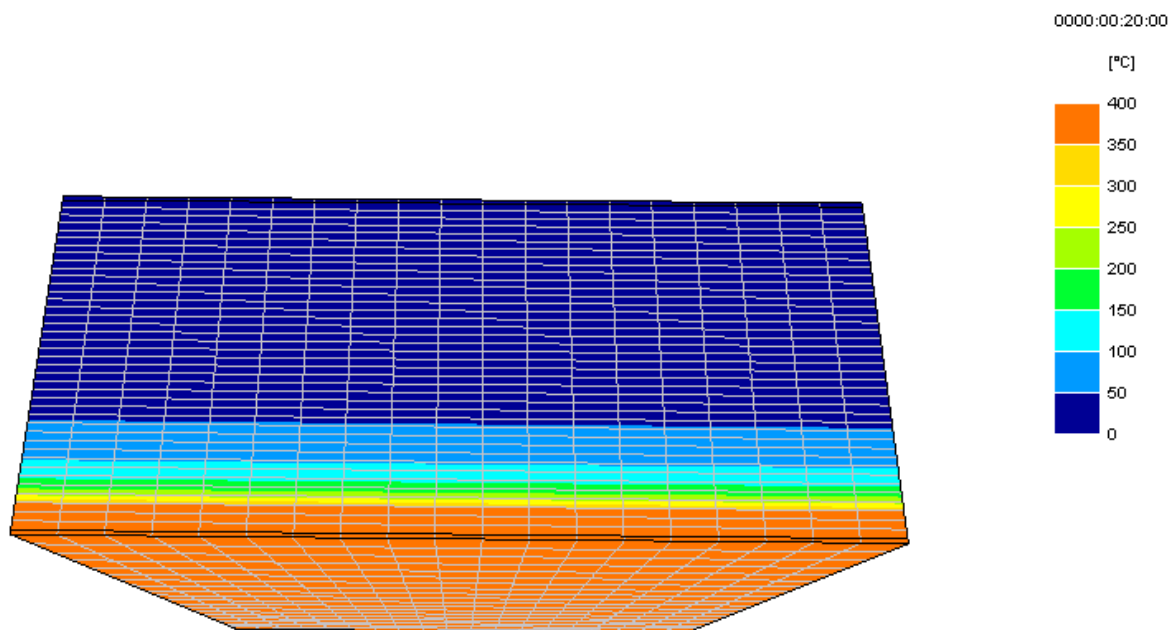
VOLTRA gegevensbestand: paneel\_fysischebrand (14-12-09).vtr

Aantal knooppunten = 17200

Tijdstap 0000:00:20:00

Klr.	Type	Naam	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	MATERIAL	staal	20.01	1	19	19	354.08	43	13	5
5	MATERIAL	PUR	20.01	2	0	0	353.96	42	3	12
50	BC_SIMPL	omgeving	20.01	1	19	19	20.01	1	0	0
51	BC_SKY	rooklaag	354.08	43	19	19	354.08	43	13	5

Klr.	Type	Naam	ta [°C]	Flux in [W]	Flux uit [W]
50	BC_SIMPL	omgeving		0.00	0.00
51	BC_SKY	rooklaag		169.48	0.00





**VOLTRA - Rekenresultaten**

Voor de situatie grote hal, thermisch lichte constructie (1000 kW/m2, t= 600 s).

VOLTRA gegevensbestand: paneel\_fysischebrand\_BC1b1.vtr

Aantal knooppunten = 17200

Tijdstap 0000:00:00:00

Klr.	Type	Naam	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	MATERIAL	staal	20.00	1	0	0	20.00	1	0	0
5	MATERIAL	PUR/PIR	20.00	2	0	0	20.00	2	0	0
50	BC_SIMPL	omgeving	20.00	1	0	0	20.00	1	0	0
51	BC_SKY	rooklaag	20.00	43	0	0	20.00	43	0	0

Klr.	Type	Naam	ta [°C]	Flux in [W]	Flux uit [W]
50	BC_SIMPL	omgeving		0.00	0.00
51	BC_SKY	rooklaag		0.00	0.00

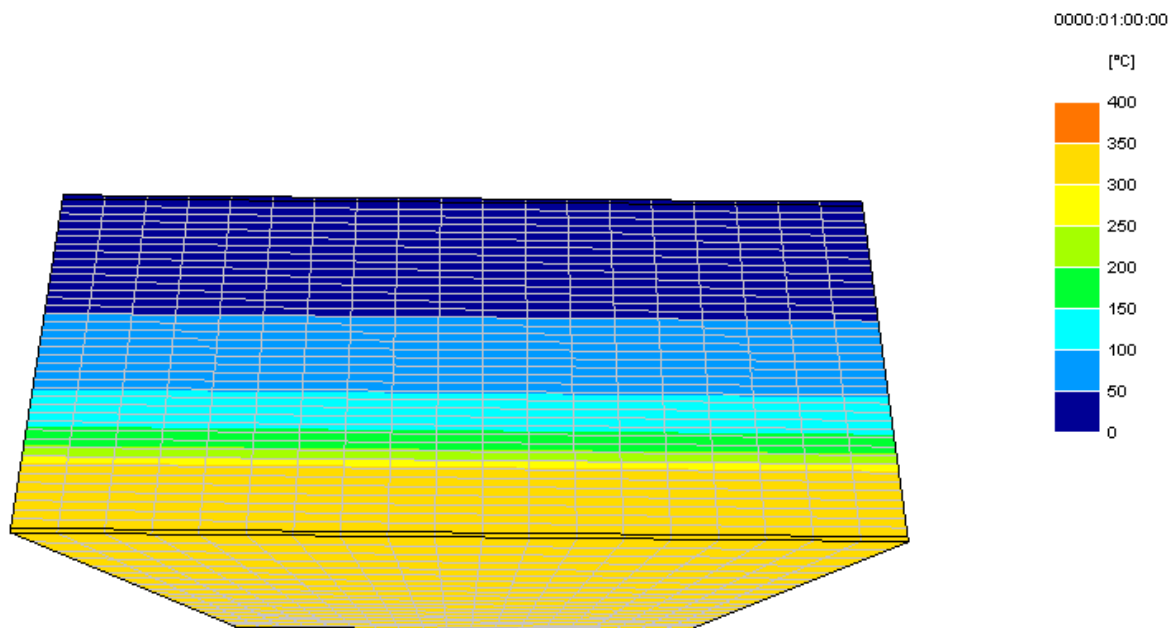
VOLTRA gegevensbestand: paneel\_fysischebrand\_BC1b1.vtr

Aantal knooppunten = 17200

Tijdstap 0000:01:00:00

Klr.	Type	Naam	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	MATERIAL	staal	21.34	1	19	19	327.42	43	18	18
5	MATERIAL	PUR/PIR	21.34	2	0	0	327.40	42	19	19
50	BC_SIMPL	omgeving	21.34	1	19	19	21.34	1	19	0
51	BC_SKY	rooklaag	327.42	43	0	0	327.42	43	18	18

Klr.	Type	Naam	ta [°C]	Flux in [W]	Flux uit [W]
50	BC_SIMPL	omgeving		0.00	0.37
51	BC_SKY	rooklaag		58.95	0.00



## Bijlage 4 LFL-grenswaarden



### Urethaan LFL en UFL limieten

molecuulgewicht:	89.0932 [kg/kMol]
vormingsenthalpie:	-1.5 [ $10^5$ J/mol] (solid)
verbrandingsenthalpie:	-18.79 [ $10^5$ J/mol] (H <sub>2</sub> O: gas)
verbrandingswaarde:	-21.09 [MJ/kg] (onderwaarde)

### brandstof(F) + zuurstof(O<sub>2</sub>) ==> kooldioxide(CO<sub>2</sub>) + waterdamp(H<sub>2</sub>O)

$M_F = 89.0932$ [kg/kMol]	$n_F = 1$	} $r = 1.347$
$M_{O_2} = 31.9988$ [kg/kMol]	$n_{O_2} = 3.75$	
	$n_{CO_2} = 3$	
	$n_{H_2O} = 3.5$	

### warmtecapaciteit rookgas

$\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ (g) $C_p =$	unknown [J/(mol.K)]
$\text{H}_2\text{O}$ (g) $C_p =$	42.4 [J/(mol.K)]
$\text{CO}_2$ $C_p =$	54.5 [J/(mol.K)]
$\text{O}_2$ $C_p =$	35 [J/(mol.K)]
$\text{N}_2$ $C_p =$	32 [J/(mol.K)]

(NIST Chemistry Webbook; bij 300 - 1600 K)

### uitgangstemperaturen

$T_a =$	600 [K]
$T_{f,lower} =$	1600 [K]
$T_{f,upper} =$	1600 [K]

### maximum overmaat aan zuurstof per mol brandstof

(voor ontsteking brandstof; adiabatisch)

$$x = 7.180 [\text{mol } O_2 / \text{mol } F]$$

$$\boxed{LFL = 1.9 [\%] \text{ v/v}}$$

### maximum overmaat aan brandstof per mol brandstof

$$x = ##### [\text{mol } F / \text{mol } F]$$

$$\boxed{UFL = ##### [\%] \text{ v/v}}$$



**Isocyanuraat**  
**LFL en UFL limieten**

molecuulgewicht: 72.0858 [kg/kMol]  
 vormingsenthalpie: -1.5 [10<sup>5</sup> J/mol] (solid)  
 verbrandingsenthalpie: -17.57 [10<sup>5</sup> J/mol] (H<sub>2</sub>O: gas)  
 verbrandingswaarde: -24.37 [MJ/kg] (onderwaarde)

**brandstof(F) + zuurstof(O<sub>2</sub>) ==> kooldioxide(CO<sub>2</sub>) + waterdamp(H<sub>2</sub>O)**

$M_F = 72.08584$ [kg/kMol]	$n_F =$	1	} $r = 1.776$
$M_{O_2} = 31.9988$ [kg/kMol]	$n_{O_2} =$	4	
	$n_{CO_2} =$	3	
	$n_{H_2O} =$	3	

**warmtecapaciteit rookgas**

$\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$  (g)  $C_p =$  unknown [J/(mol.K)]  
 $\text{H}_2\text{O}$  (g)  $C_p = 42.4$  [J/(mol.K)]  
 $\text{CO}_2$   $C_p = 54.5$  [J/(mol.K)]  
 $\text{O}_2$   $C_p = 35$  [J/(mol.K)]  
 $\text{N}_2$   $C_p = 32$  [J/(mol.K)]  
 (NIST Chemistry Webbook; bij 300 - 1600 K)

**uitgangstemperaturen**

$T_a = 600$  [K]  
 $T_{f,lower} = 1600$  [K]  
 $T_{f,upper} = 1600$  [K]

**maximum overmaat aan zuurstof per mol brandstof**

(voor ontsteking brandstof; adiabatisch)

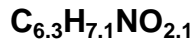
$$x = 6.338 \text{ [mol } O_2 \text{ / mol } F]$$

<b>LFL = 2.0 [%] v/v</b>
--------------------------

**maximum overmaat aan brandstof per mol brandstof**

$$x = ##### \text{ [mol } F \text{ / mol } F]$$

<b>UFL = ##### [%] v/v</b>
----------------------------



**Polyurethaan PUR  
LFL en UFL limieten**

(SFPE Handbook of fire protection)

molecuulgewicht:	130.3 [kg/kMol]	
vormingsenthalpie:	-2.27 [ $10^5$ J/mol]	(solid, fiktief)
verbrandingsenthalpie:	-31.14 [ $10^5$ J/mol]	(H <sub>2</sub> O: gas)
verbrandingswaarde:	-23.90 [MJ/kg]	(onderwaarde)

**brandstof(F) + zuurstof(O2) ==> kooldioxide(CO2) + waterdamp(H2O)**

$M_F =$	130.3 [kg/kMol]	$n_F =$	1	} $r = 1.725$
$M_{O_2} =$	31.9988 [kg/kMol]	$n_{O_2} =$	7.025	
		$n_{CO_2} =$	6.3	
		$n_{H_2O} =$	3.55	

**warmtecapaciteit rookgas**

$C_{6.3}H_{7.1}NO_{2.1}$ (g) $C_p =$	unknown [J/(mol.K)]
H <sub>2</sub> O (g) $C_p =$	42.4 [J/(mol.K)]
CO <sub>2</sub> $C_p =$	54.5 [J/(mol.K)]
O <sub>2</sub> $C_p =$	35 [J/(mol.K)]
N <sub>2</sub> $C_p =$	32 [J/(mol.K)]

(NIST Chemistry Webbook; bij 300 - 1600 K)

**uitgangstemperaturen**

$T_a =$	600 [K]
$T_{f,lower} =$	1600 [K]
$T_{f,upper} =$	1600 [K]

**maximum overmaat aan zuurstof per mol brandstof**

(voor ontsteking brandstof; adiabatisch)

$$x = 11.420 [mol_{O_2} / mol_F]$$

**LFL = 1.1 [%] v/v**

**maximum overmaat aan brandstof per mol brandstof**

$$x = ##### [mol_F / mol_F]$$

**UFL = ##### [%] v/v**

## Bijlage 5 Simulatieberekeningen rookgasexplosie

In de opgenomen simulatieberekeningen zijn het fysisch brandmodel van een grote brandruimte (1000 m<sup>2</sup>, 10 meter hoog) en het thermodynamische simulatiemodel van een thermisch lichte dakconstructie (met een isolatielaag van een thermoharder: PUR of PIR) aan elkaar gekoppeld. Wanneer de grenswaarde voor de pyrolysetemperatuur wordt overschreden wordt aangenomen dat het pyrolyseproduct in de aangrenzende hete (of gemengde) zone wordt opgenomen. Dat impliceert dat de dakconstructie aan de buitenzijde luchtdicht wordt verondersteld en er geen convectieve warmtestroom door de dakconstructie optreedt. Mocht er wel een convectieve warmtestroom optreden door de dakconstructie, dan wordt de pyrolysetemperatuur sneller bereikt maar wordt het pyrolyseproduct deels naar buiten afgevoerd.

Er zijn drie situaties beschouwd:

- Grote hal met een brandscenario 250 kW/m<sup>2</sup>,  $t_c = 150$  s en een pyrolysetemperatuur van de isolatielaag in de dakconstructie van 200 °C (PUR);
- Grote hal met een brandscenario 1000 kW/m<sup>2</sup>,  $t_c = 600$  s en een pyrolysetemperatuur van de isolatielaag in de dakconstructie van 200 °C (PUR);
- Grote hal met een brandscenario 1000 kW/m<sup>2</sup>,  $t_c = 600$  s en een pyrolysetemperatuur van de isolatielaag in de dakconstructie van 300 °C (PIR).

Doordat het pyrolyseproduct wordt opgenomen in de aangrenzen hete of gemengde zone stijgt de concentratie ervan. Wanneer de LFL-waarde in deze zone wordt overschreden is er risico van rookgasexplosie aanwezig, bij voorbeeld ten gevolge van de vlammen van de brandhaard. Voor het pyrolyseproduct is uitgegaan van een LFL = 1,1 % [V/V] bij temperaturen van 200 °C tot 400 °C. Voor specifieke PUR- en PIR-producten kunnen andere LFL-waarden van toepassing zijn, al zullen in de meeste gevallen de gepyrolyseerde producten weinig afwijken.

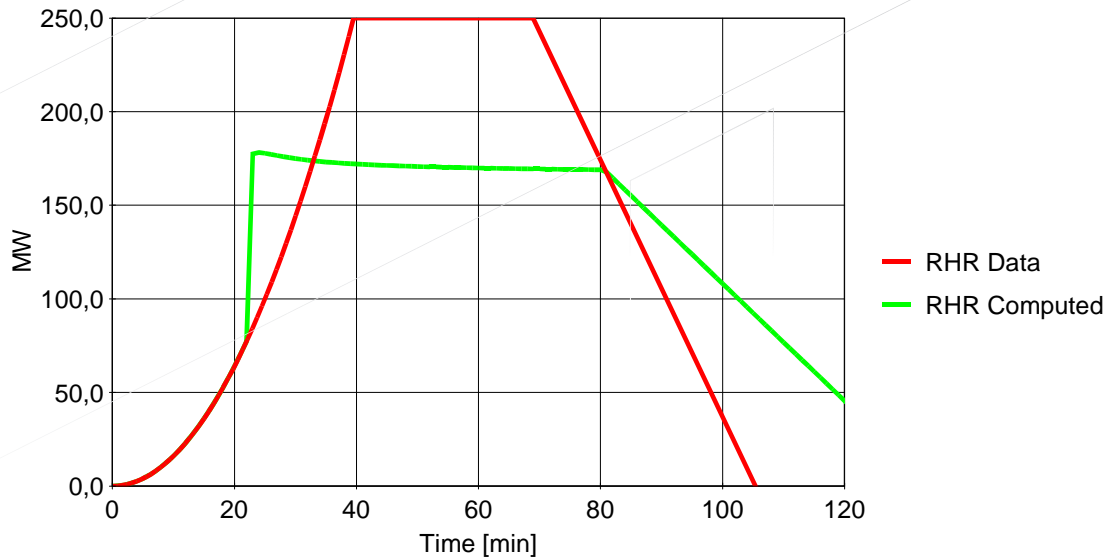
In de grafieken is alleen de pre-flash-over fase weergegeven. De post-flash-over fase is niet relevant. Uit de grafieken blijkt dat er risico van rookgasexplosie aanwezig is juist voordat flash-over optreedt. Dat houdt praktisch in dat het flash-over moment wordt vervroegd. Dit kan van belang zijn voor het repressief optreden door de brandweer.

### NB:

De weergegeven resultaten zijn alleen van toepassing op de beschouwde casus. Een andere geometrie, een andere materialisering, een andere mate van openheid van de brandruimte en een ander brandscenario leiden tot andere resultaten.

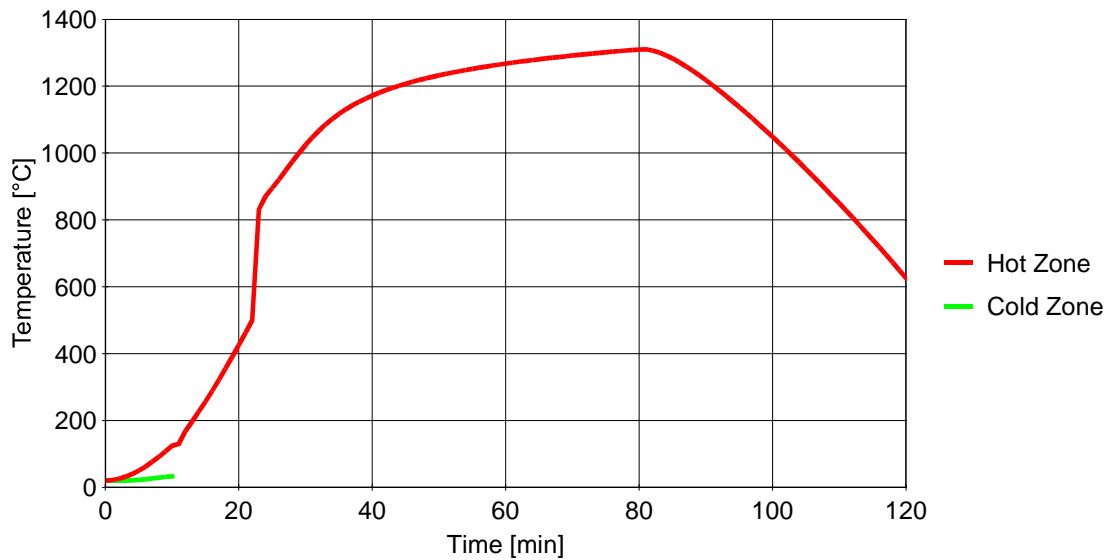
**Grote hal, thermisch lichte dakconstructie**  
**Pyrolysetemperatuur isolatielaag 200 °C**  
**Brandscenario 250 kW/m<sup>2</sup>, t<sub>c</sub> = 150 s.**

### Rate of Heat Release

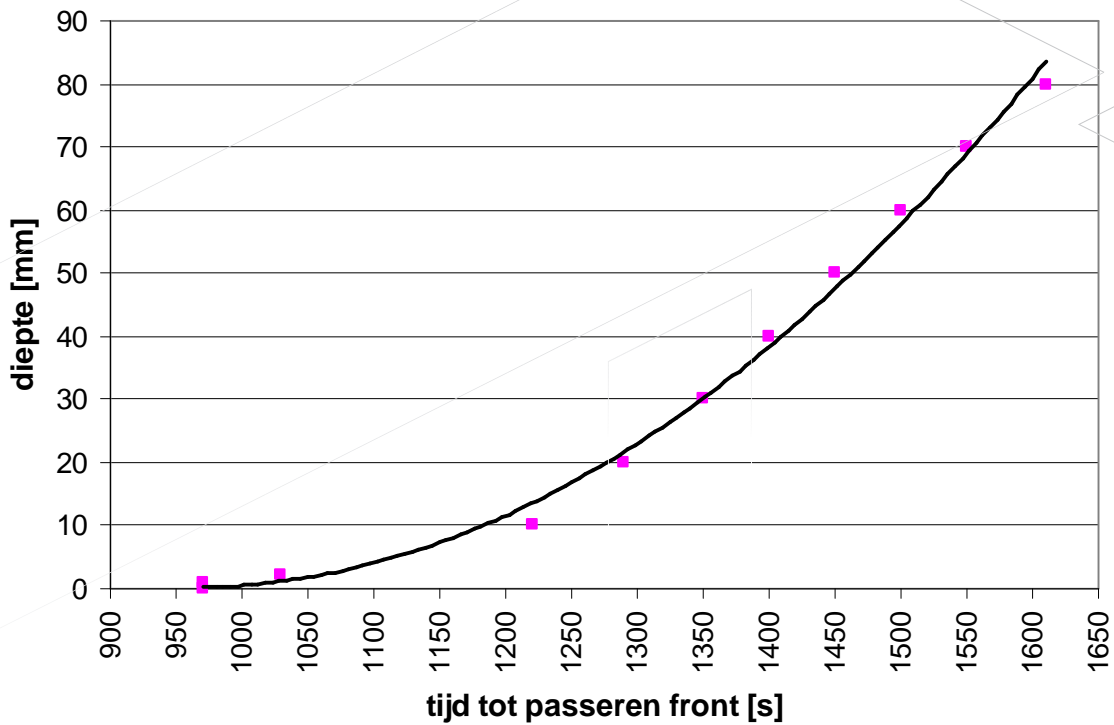


Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)

### Gas Temperature

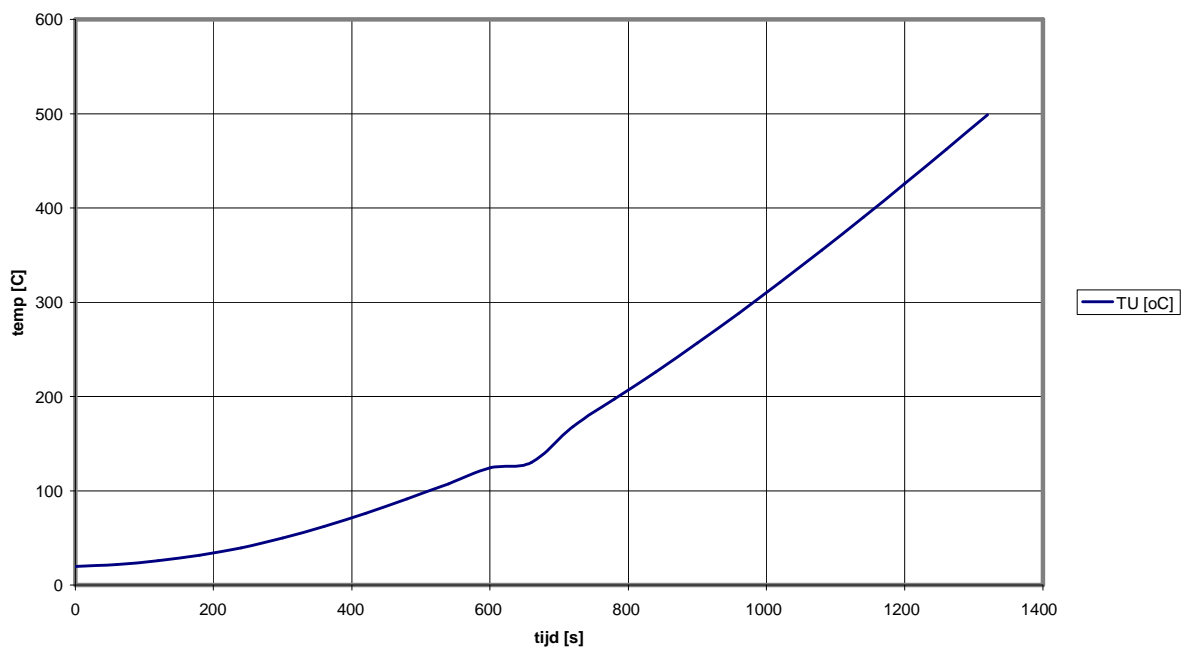


Analysis Name: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b)



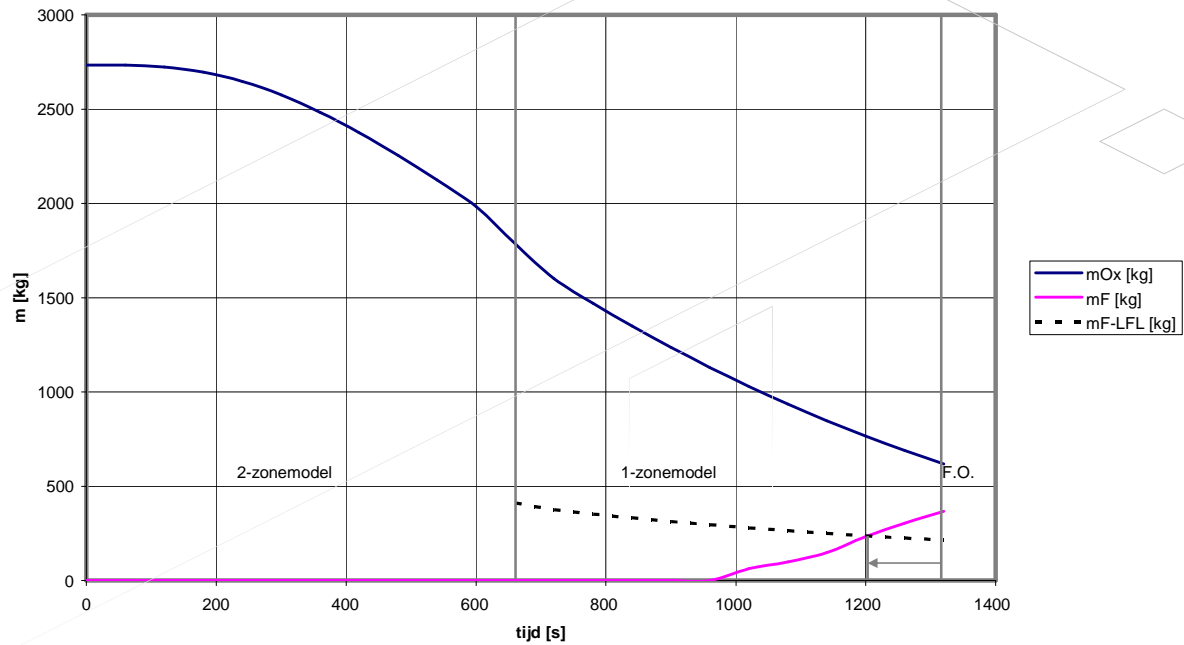
Weergave van het verloop van het pyrolysefront in de isolatielaag in de tijd vanaf het ontstaan van brand, berekend met het thermodynamische model Voltra met de randcondities volgens het fysisch brandmodel. De pyrolysetemperatuur van het isolatiemateriaal is in dit geval gesteld op 200 °C. De ontbrandingstemperatuur wordt niet bereikt.

Temperatuur hete zone en gemengde zone





Massa zuurstof en pyrolyseproduct in gemengde zone

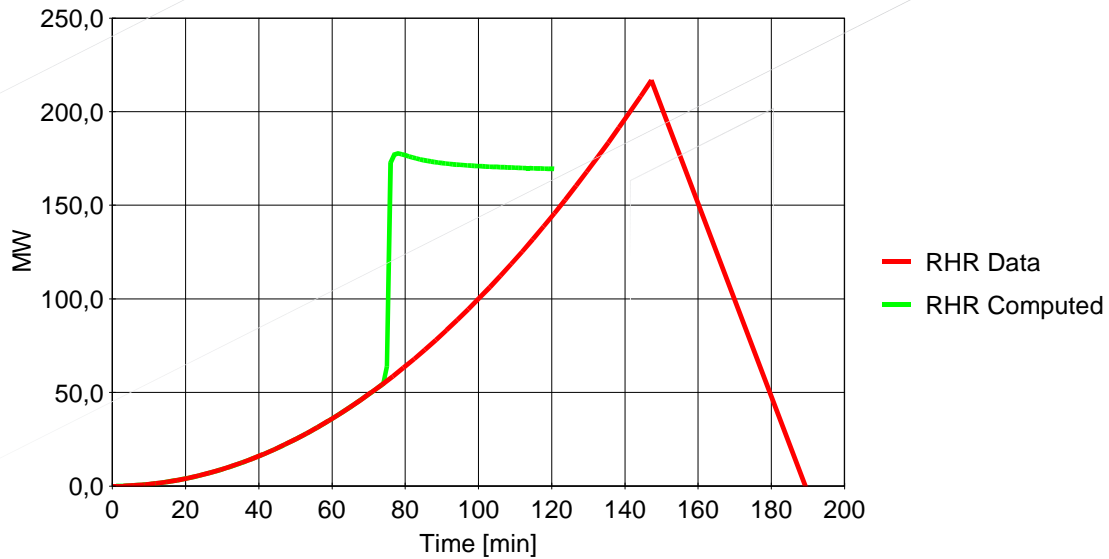


Na circa 10 minuten gaat de gestratificeerde situatie (twee-zone model) over in een gemengde situatie (één-zone model). Er is dan nog geen sprake van flash-over, dat treedt pas op na circa 22 minuten.

De LFL grenswaarde (streeplijn) van het pyrolyseproduct wordt na 20 minuten overschreden. In de praktijk zal dit een vervroeging van het flash-over moment inhouden met 2 minuten.

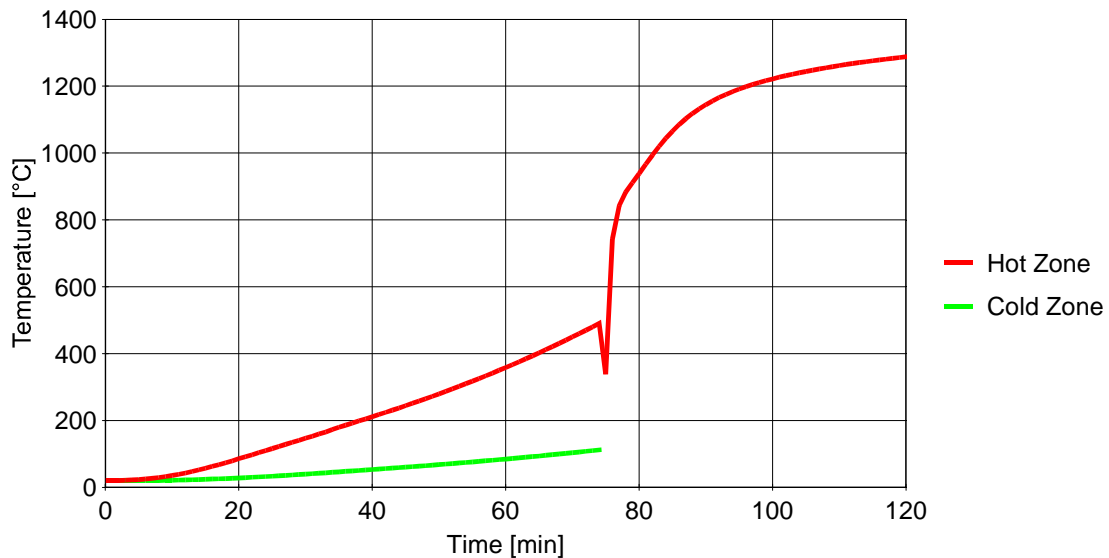
**Grote hal, thermisch lichte dakconstructie**  
**Pyrolysetemperatuur isolatielaag 200 °C**  
**Brandscenario 1000 kW/m<sup>2</sup>, t<sub>c</sub> = 600 s.**

### Rate of Heat Release

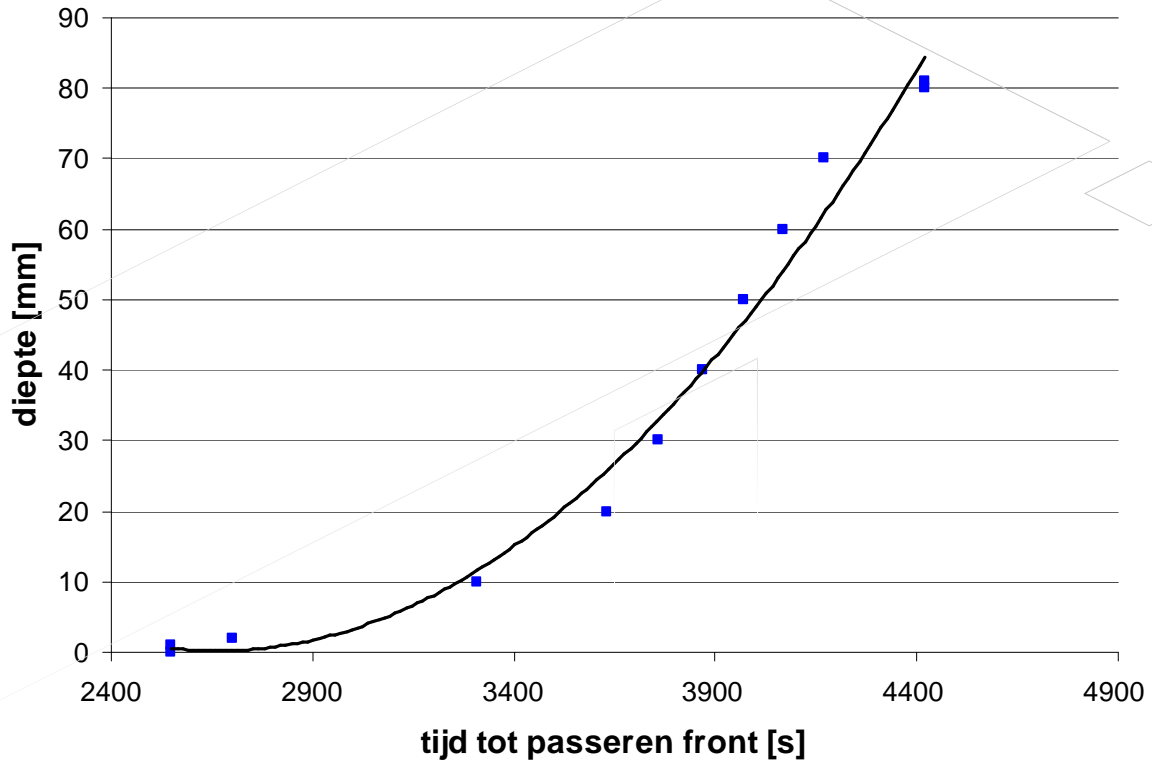


ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referen

### Gas Temperature

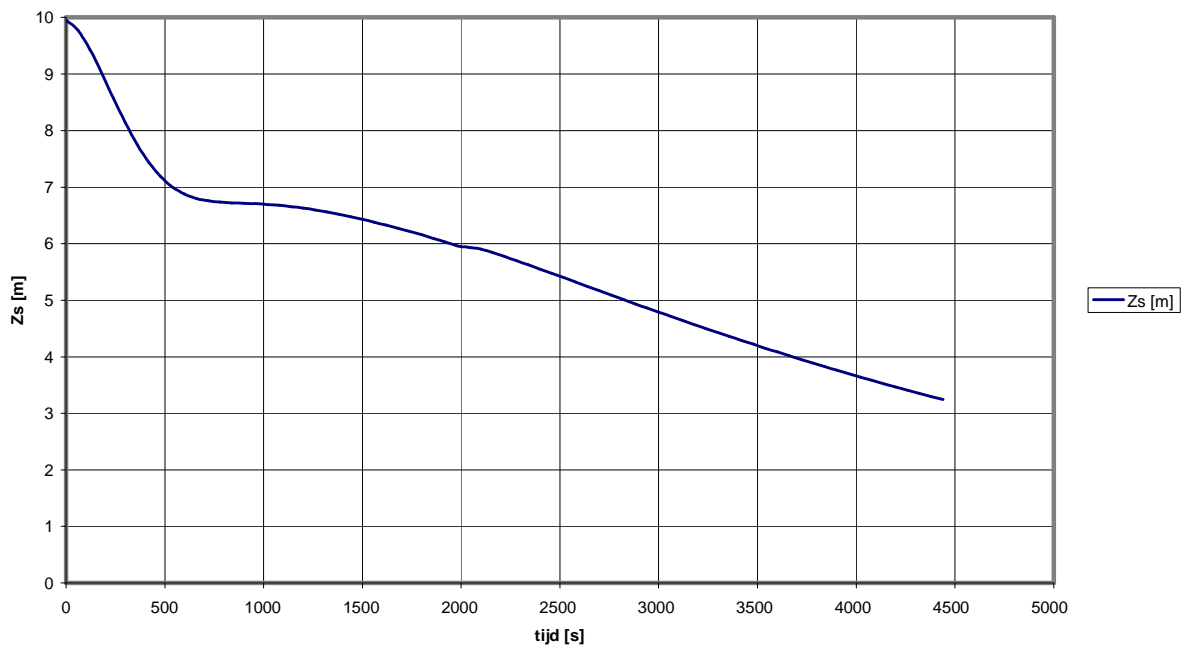


ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referen

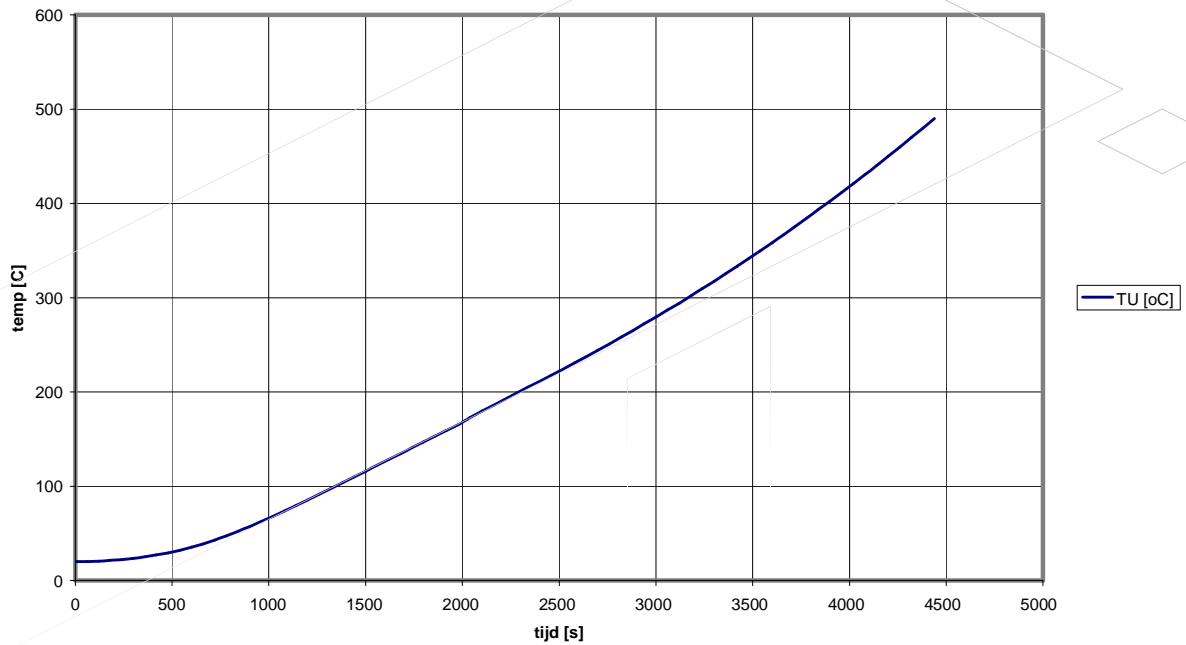


Weergave van het verloop van het pyrolysefront in de isolatielaag in de tijd vanaf het ontstaan van brand, berekend met het thermodynamische model Voltra met de randcondities volgens het fysisch brandmodel. De pyrolysetemperatuur van het isolatiemateriaal is in dit geval gesteld op 200 °C. De ontbrandingstemperatuur wordt niet bereikt.

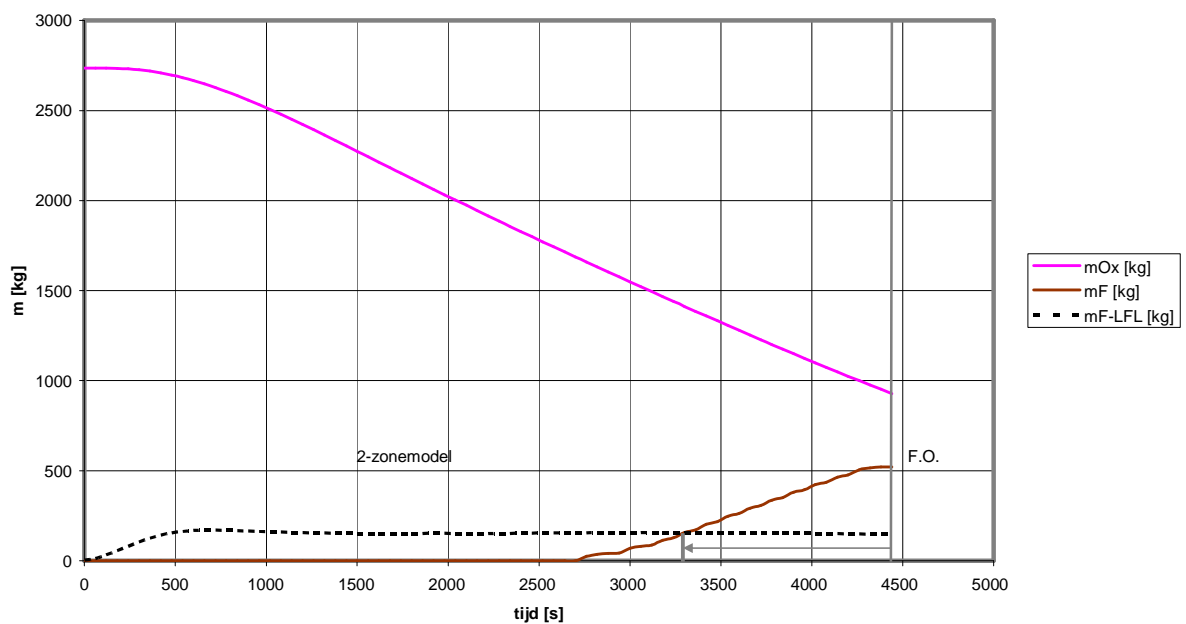
Hoogte interface



Temperatuur hete zone



Massa zuurstof in compartiment en pyrolyseproduct in hete zone

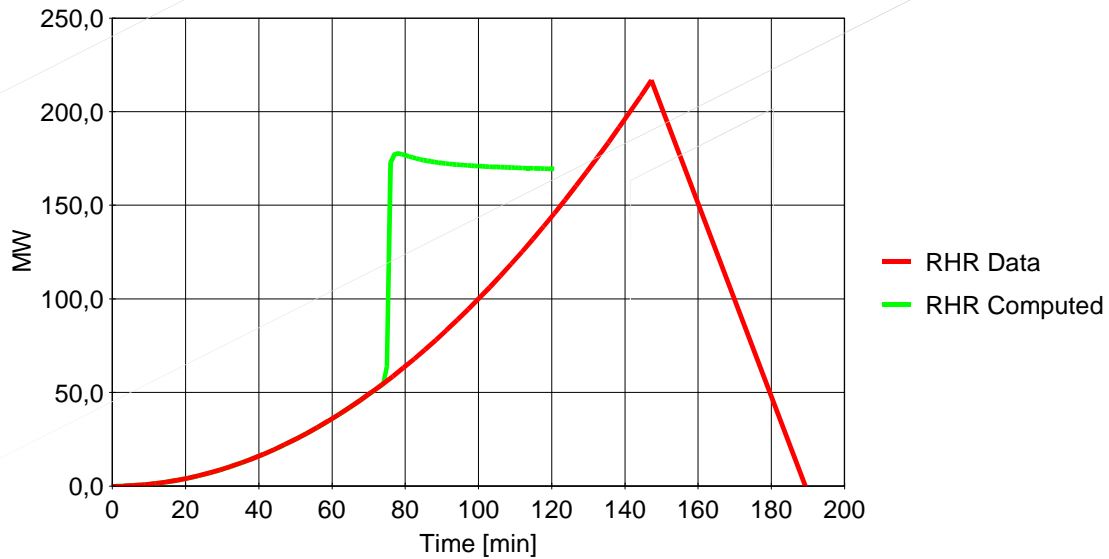


Na circa 75 minuten treedt flash-over op en daat daarmee de gestratificeerde situatie (twee-zone model) over in een gemengde situatie (één-zone model).

Pyrolyse van het isolatiemateriaal treedt in dit geval op vanaf 45 minuten na ontstaan van de brand. De LFL-grenswaarde in de hete zone wordt vervolgens overschreden na bijna 55 minuten. In de praktijk zal dit een vervroeging van het flash-over moment inhouden met circa 20 minuten.

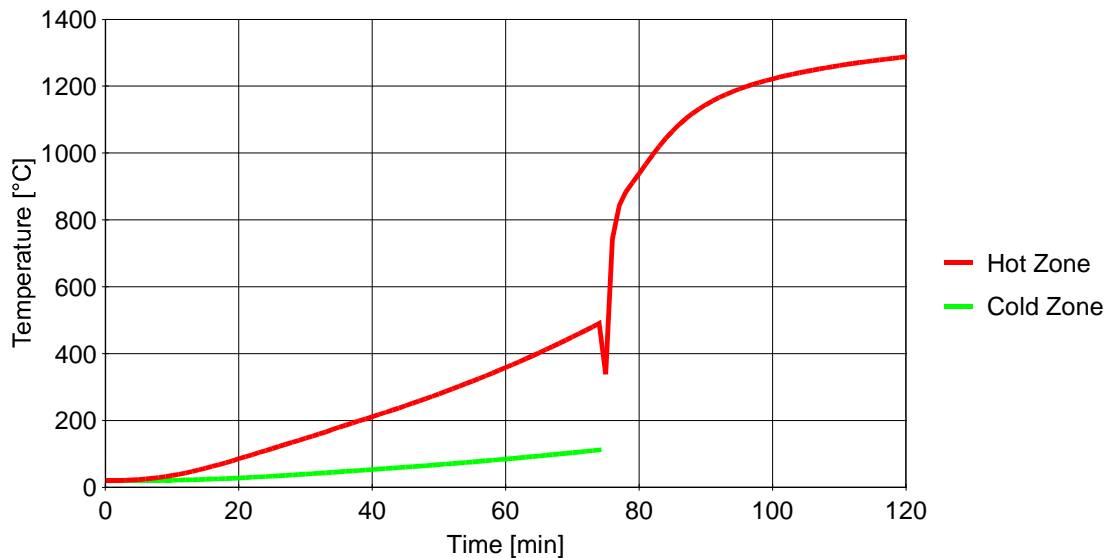
**Grote hal, thermisch lichte dakconstructie**  
**Pyrolysetemperatuur isolatielaag 300 °C**  
**Brandscenario 1000 kW/m<sup>2</sup>, t<sub>c</sub> = 600 s.**

### Rate of Heat Release

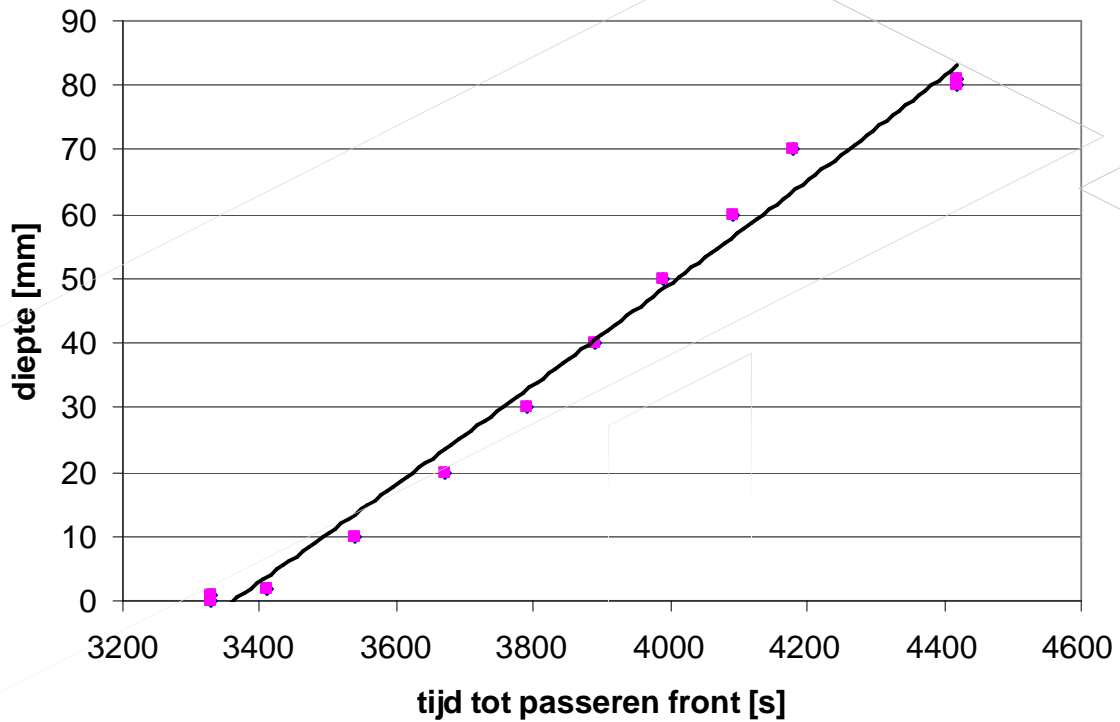


ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referen

### Gas Temperature

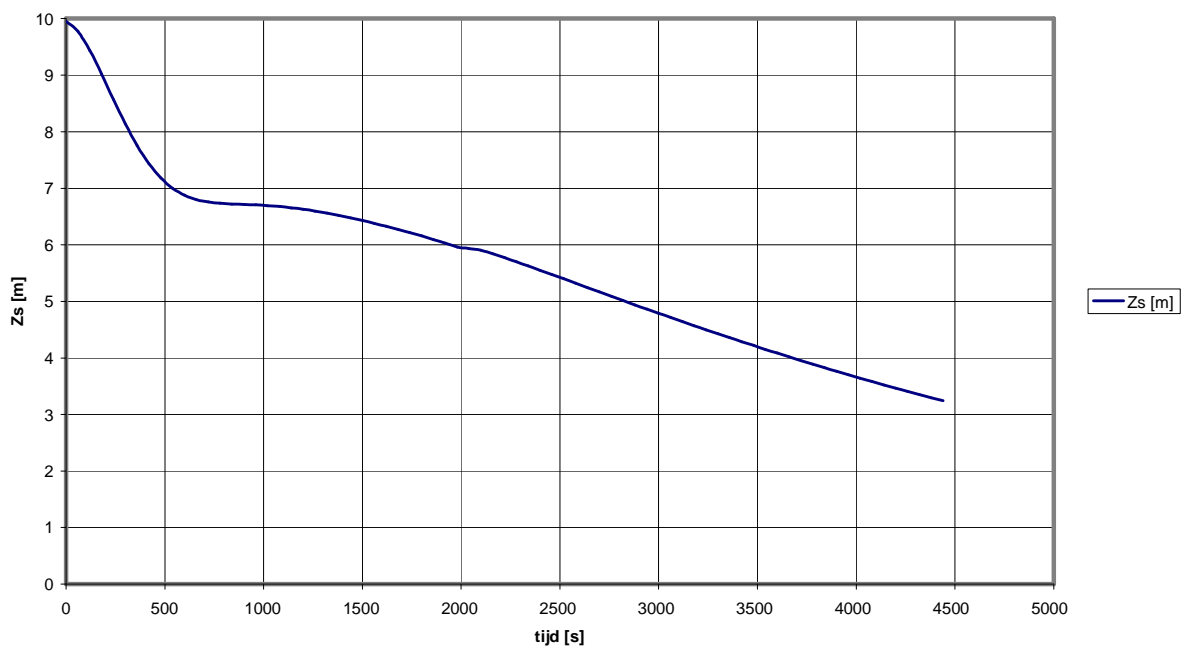


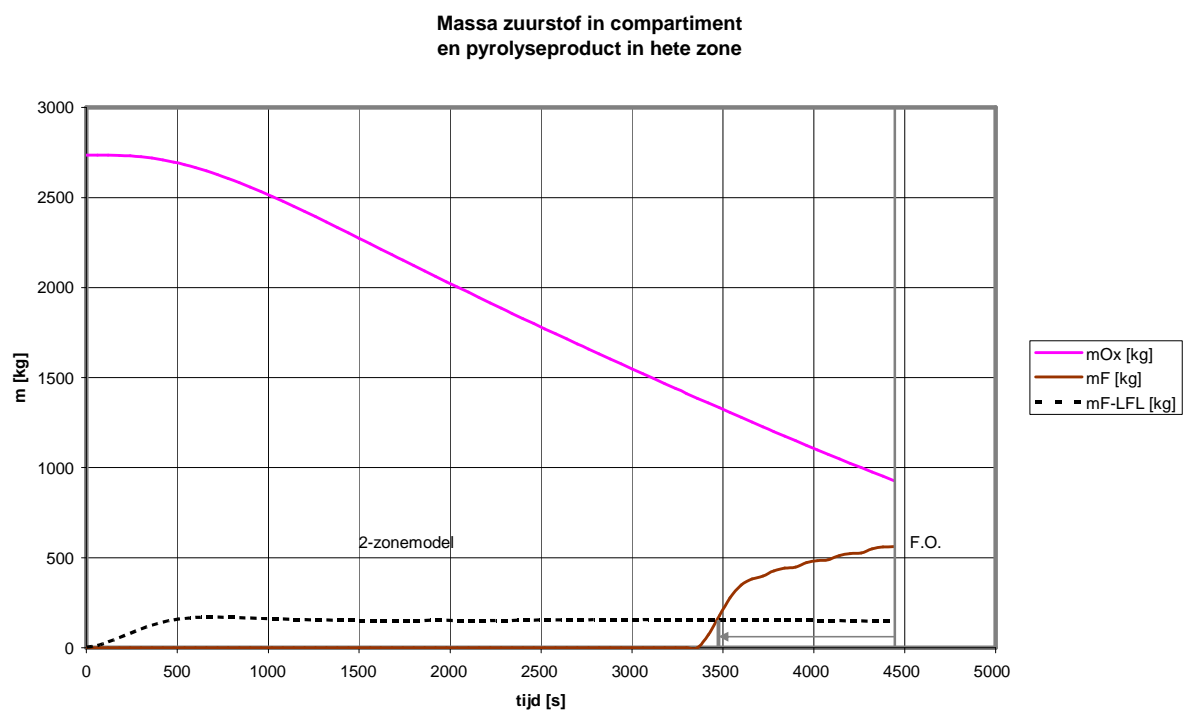
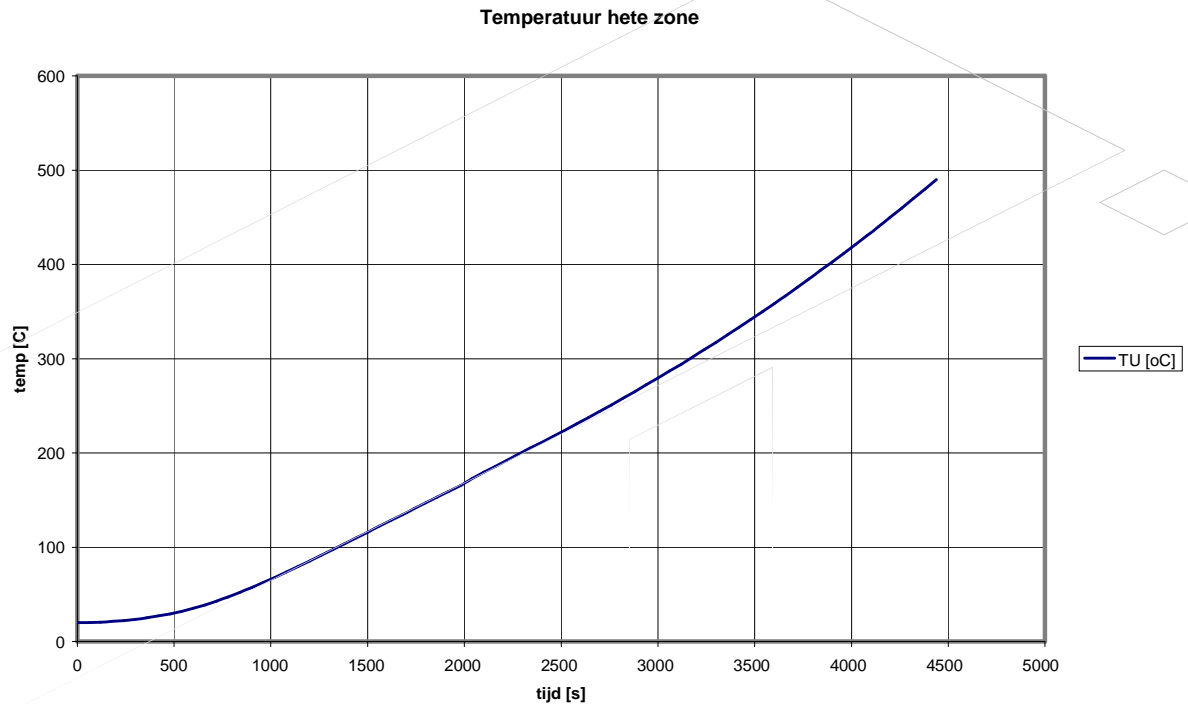
ie: grote brandruimte, thermisch lichte wanden (BC1b), langzame branduitbreiding met hoog referen



Weergave van het verloop van het pyrolysefront in de isolatielaag in de tijd vanaf het ontstaan van brand, berekend met het thermodynamische model Voltra met de randcondities volgens het fysisch brandmodel. De pyrolysetemperatuur van het isolatiemateriaal is in dit geval gesteld op 300 °C. De ontbrandingstemperatuur wordt niet bereikt.

Hoogte interface





Na circa 75 minuten treedt flash-over op en daat daarmee de gestratificeerde situatie (twee-zone model) over in een gemengde situatie (één-zone model).

Pyrolyse van het isolatiemateriaal treedt in dit geval op vanaf 56 minuten na ontstaan van de brand. De LFL-grenswaarde in de hete zone wordt vervolgens overschreden na iets meer dan 58 minuten. In de praktijk zal dit een vervroeging van het flash-over moment inhouden met circa 17 minuten.



info@nieman.nl  
www.nieman.nl

#### **Vestiging Utrecht**

Postbus 40217 - 3504 AA Utrecht  
Sophialaan 1A - 3542 AR Utrecht  
Tel.: 030 - 241 34 27  
Fax: 030 - 241 02 66

#### **Vestiging Zwolle**

Postbus 40147 - 8004 DC Zwolle  
Dr. Van Lookeren Campagneweg 16  
8025 BX Zwolle  
Tel.: 038 - 467 00 30  
Fax: 038 - 467 00 40

#### **Vestiging Rijswijk**

Postbus 1757 - 2280 DT Rijswijk  
Nassaukade 1 - 2281 ZA Rijswijk  
Tel.: 070 - 340 17 20  
Fax: 070 - 340 17 37

#### **Vestiging Eindhoven**

Postbus 1385 - 5602 BJ Eindhoven  
Verdunplein 17 - 5627 SZ Eindhoven  
Tel.: 040 - 264 58 20  
Fax: 040 - 264 58 21

