

advies

kennis

coaching

## 2nd OPINION

# BRAND, DE PUNT ONDERZOEKSRaad VOOR DE VEILIGHEID

Datum : 5 november 2009  
Van : ir. R.A.P. van Herpen  
Pagina's : **6** (en 1 bijlage)  
Referentie : Nz090360abA0.rhe  
Betreft : **OVV-rapport 'Brand, De Punt'**

### Inleiding

In deze notitie geeft Adviesburo Nieman een 2nd opinion op het rapport 'Brand, De Punt' van de Onderzoeksraad voor de veiligheid (OVV). De 2nd opinion beperkt zich tot het brandverloop en de hierbij onderzochte hypothesen.

### Brandverloop

In het OVV-rapport is in hoofdstuk 5 het brandverloop beschreven. De brand ontstaat nabij de meterkast, achterin het magazijn. Er treedt een snelle branduitbreiding op via de spuitpur over een deel van de wanden en over het plafond (de onderzijde van de zoldervloer). Daardoor wordt snel het moment van flash-over bereikt in het magazijn. Na flash-over is er een sterk ventilatiebeheerste brand. Het brandvermogen wordt daardoor gereduceerd zodat de gastemperatuur in het magazijn relatief laag is en de uitstromende rookgassen geen uitslaande vlammen veroorzaken. De rookgassen stijgen vervolgens op in de loods tot aan het dak. Daar wordt een rookgaslaag gevormd. Deze rookgaslaag bevat met name de gepyrolyseerde brandstof vanuit het magazijn. Uiteraard is ook van de rookgaslaag de energie-inhoud te laag om ontbranding te veroorzaken.

Ontbranding van de rookgaslaag (rookgasexplosie) kan optreden indien er op een gegeven moment op enig punt juist voldoende ontstekingsenergie aanwezig is. Het meest voor de hand liggende punt is daarbij de uitstroomopening van het magazijn naar de loods. Wanneer hier (uitslaande) vlammen optreden kunnen deze via de opstijgende rookgaspluim de rookgaslaag ontsteken.

Uitslaande vlammen treden alleen op als het ventilatiebeheerste brandvermogen in het magazijn tot een voldoende hoge gastemperatuur leidt. Blijkbaar is dat hier niet het



Adviesburo Nieman BV  
Vestiging Utrecht  
Sophialaan 1a  
Postbus 40217  
3504 AA Utrecht

T (030) 241 34 27  
F (030) 241 02 66  
ing. J. van den Engel  
ing. H. Koekoek

Vestiging Zwolle  
Dr. Van Loekeren -  
Campagneweg 16  
Postbus 40147  
8004 DC Zwolle

T (038) 467 00 30  
F (038) 467 00 40  
ir. R.A.P. van Herpen  
mw. ing. J.B. Delsing

Vestiging Rijswijk  
Nassaukade 1  
Postbus 1737  
2280 DT Rijswijk

T (070) 340 17 20  
F (070) 340 17 37  
ing. J.G. Bouwman

Vestiging Eindhoven  
Verdunplein 17  
Postbus 1385  
5602 BJ Eindhoven

T (040) 264 58 20  
F (040) 264 58 21  
ing. A. de Jong

Internet

info@nieman.nl  
www.nieman.nl

ABN-Amro

41.56.18.770

Rabobank

39.44.40.943

Handelsregister

Utrecht 30086383

geval. Echter, het ventilatiebeheerste brandvermogen in het magazijn is niet constant. Vanwege de relatief kleine openingen in de brandruimte vertoont de brand een pulserend karakter. Dat houdt in dat de brand van tijd tot tijd oplaait en er juist op die momenten uitslaande vlammen vanuit het magazijn naar de loods kunnen optreden. Op dat moment kan de rookgaslaag worden ontstoken.

Overigens zou ontsteking van de rookgaslaag na verloop van tijd evengoed bij een constant ventilatiebeheerst brandvermogen (dus niet pulserend) kunnen optreden. Zelfs bij een gering brandvermogen kan de gastemperatuur in de brandruimte na verloop van tijd zodanig oplopen dat bij uitstroming de energie-inhoud toereikend is om in een vlam te verbranden. Ook dan wordt de rookgaslaag ontstoken.

Als conclusie kan worden gesteld dat het geschetste brandverloop plausibel lijkt. Of de oorzaak van het plotseling ontsteken van de rookgaslaag door een uitslaande vlam het gevolg is van een pulserende brand in het magazijn of van een meer geleidelijk toename van de gastemperatuur in het magazijn doet hierbij niet ter zake.

### **Hypothesen**

In het OVV-rapport is in bijlage 4 een aantal hypothesen onderzocht omtrent het brandverloop:

1. De PUR-spuitsisolatie veroorzaakt een snelle flash-over in het magazijn.
2. Er woedt een oscillerende brand in het magazijn.
3. Rookgassen vanuit het magazijn resulteren in rookgasexplosie.
4. De explosie is niet gerelateerd aan de rookgassen.
5. Uitbreiding van brand naar andere werkplaatsen in loods, vóór rookgasexplosie.
6. brand verplaatst zich snel naar zoldering boven werkplaatsen.
7. Vergassing dakpanelen zorgt voor explosief gasmengsel.

#### Ad 1. De PUR-spuitsisolatie veroorzaakt een snelle flash-over in het magazijn

Het OVV-rapport geeft aan dat de snelle vlamuitbreiding in het magazijn verklaard kan worden door een snelle betrokkenheid van de zoldervloer boven het magazijn. Op basis van thermische eigenschappen en brandklasse wordt de PUR-spuitsisolatie als oorzaak hiervoor aangegeven. Dit staat niet ter discussie.

#### Ad 2. Er woedt een oscillerende brand in het magazijn

Het is mogelijk dat vanwege de relatief kleine opening die naar het magazijn aanwezig is in combinatie met een smeulbrand met lage zuurstofconcentraties, een pulserende brand ontstaat in het magazijn. Overigens is deze hypothese niet van doorslaggevend belang. Ook bij een niet-pulserende brand is het geschetste brandverloop mogelijk.

#### Ad 3. Rookgassen vanuit het magazijn resulteren in rookgasexplosie

Het is zeer goed mogelijk dat rookgaslaag in de loods op een gegeven moment is ontstoken waardoor een rookgasexplosie is opgetreden, zoals geschetst in het brandverloop. De voorwaarden waaronder de rookgasexplosie wordt verondersteld zijn echter vatbaar voor discussie.

### *3a: Brandbare gassen in de rookgaslaag*

Op basis van bijlage 4 van het OVV-rapport kan worden geconcludeerd dat is uitgegaan van rookgas in de loods, bestaande uit de gepyrolyseerde brandstof in het magazijn. De brandstof bestaat voornamelijk uit spuitpur, de houten zoldervloer en mogelijk ook de inventaris in het magazijn..

Voor de spuitpur is het echter aannemelijk dat deze grotendeels is verbrand voordat uitstroming naar de loods optreedt. Deze is immers verantwoordelijk voor de snelle branduitbreiding en zal de beschikking gehad hebben over de zuurstof in het ruimtevolume van het magazijn. Pyrolyseproducten van de spuitpur zullen daarom slechts beperkt in de rookgaslaag voorkomen.

Vervolgens ontstaat een zuurstofbeheerste brand, blijkbaar met een zodanig geringe toetreding van zuurstof dat verbranding geheel stopt en alleen nog pyrolyse plaatsvindt. Het is daarbij overigens de vraag of de pyrolysediepte in de houten balken overeen komt met de inbranddiepte (in geval van een brandstofbeheerste situatie). Ook omdat gesteld wordt dat de temperatuur in het magazijn zo laag is dat geen uitslaande vlammen optreden is lijkt de pyrolysesnelheid in de houten balken overschat.

Hoewel de inventaris ook kan pyrolyseren is de bijdrage hiervan naar verwachting gering. Immers, de temperatuur in het magazijn is relatief laag. Daarnaast stond de inventaris niet in direct contact met de spuitpur (anders dan de houten zoldervloer) en zal daardoor ook niet zijn aangestoken.

Als conclusie kan derhalve worden getrokken dat de potentiële energie-inhoud van de rookgaslaag in de loods is overschat en lager zal zijn dan 14.000 MJ

### *3b: Beschikbare zuurstofmassa in de loods*

De beschikbare zuurstofmassa voor verbranding van de rookgaslaag bevindt zich in het luchtvolume dat door de rookgaslaag in de loods wordt ingenomen. De hoeveelheid energie die daarbij kan vrijkomen wordt bepaald op basis van stoichiometrische verbranding van een cellulose-achtige brandstof (stoichiometrische constante:  $r = 1,27$ ). In de tekst van het OVV-rapport wordt verondersteld dat de rookgaslaag een rijk brandstofmengsel bevat. De brandstof/zuurstofverhouding is in dat geval hoger dan bij stoichiometrische verbranding, er is een overschot aan brandstof. Dit heeft de volgende consequenties:

- Door het brandstofoverschot is de verbranding bij rookgasexplosie onvolledig. Er kunnen vervolgens nieuwe brandhaarden ontstaan in de loods.
- De potentiële verbrandingsenergie van de rookgaslaag zal in geval van een rijk brandstofmengsel groter moeten zijn dan 14.000 MJ.

Het is bij het geschetste brandscenario niet aannemelijk dat de potentiële verbrandingsenergie van de rookgaslaag groter is dan 14.000 MJ. Eventueel zou het vergassen van de PUR-isolatie in de dakpanelen hieraan kunnen bijdragen. Echter, daarvoor is de temperatuur van de rookgaslaag in dit scenario niet hoog genoeg.

Bij een lagere potentiële verbrandingsenergie van de rookgaslaag dan 14.000 MJ kan verbranding evengoed op explosieve wijze plaatsvinden. De kracht van de explosie is dan uiteraard minder.

Als conclusie kan derhalve worden getrokken dat de rookgaslaag waarschijnlijk niet stoichiometrisch verbrandt op basis van de hierin aanwezige zuurstofmassa, maar dat verbranding plaatsvindt met een overmaat aan luchtvolume wat minder dan 14.000 MJ verbrandingsenergie oplevert.

### *3c: Rookgasexplosie*

Zoals gesteld in het voorgaande is stoichiometrische verbranding niet noodzakelijk om een rookgasexplosie te veroorzaken. Ook een arm mengsel (met een lagere brandstof/zuurstof verhouding dan bij stoichiometrische verbranding) kan tot een rookgasexplosie leiden, mits de brandstof/zuurstof verhouding hoger is dan de LFL-limiet (lower flammability limit) en er een ontstekingsbron aanwezig is (b.v. door een uitslaande vlam vanuit het magazijn).

In de bijlage is vastgesteld dat de LFL-limiet voor cellulose-achtige brandstof rond circa 2,7 % (v/v) ligt. Gesteld dat het volume van de rookgaslaag 3750 m<sup>3</sup> bedraagt, dan is het benodigde volume brandstof hierin dus 100 m<sup>3</sup>. Bij 25 °C komt dit overeen met circa 4,13 kMol brandstof. Uitgaande van een cellulosebrandstof (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>) met een verbrandingsenthalpie van 1,78·10<sup>6</sup> J/mol bedraagt de energie-inhoud van de rookgaslaag bij de LFL-limiet ongeveer 7.300 MJ.

Zowel de waarnemingen als de verschijnselen komen beter overeen met een rookgasexplosie van een arm brandstofmengsel dan met een rookgasexplosie van een rijk brandstofmengsel.

### Ad 4. De explosie is niet gerelateerd aan de rookgassen

De hypothese dat er een explosie is opgetreden die niet is gerelateerd aan opgehoopte onverbrande rookgassen maar die door een gasfles, benzinetank of ander vergelijkbaar object is veroorzaakt wordt als onwaarschijnlijk gekwalificeerd. Dat is terecht, gezien het schadebeeld en waarnemingen van getuigen.

### Ad 5. Uitbreiding van brand naar andere werkplaatsen in loods, vóór rookgasexplosie.

De hypothese dat er voor het optreden van de rookgasexplosie al een zodanige branduitbreiding zou zijn vanuit het magazijn naar andere werkplaatsen dat deze volledig bij de brand betrokken zouden worden wordt door het schadebeeld niet onderbouwd. Het is dan ook terecht om te veronderstellen dat de andere werkplaatsen voor het optreden van de rookgasexplosie niet volledig bij de brand betrokken waren.

### Ad 6. Brand verplaatst zich snel naar zoldering boven andere werkplaatsen

Deze hypothese gaat ervan uit dat de brand zich vanuit het magazijn snel naar de open zolder boven de andere werkplaatsen verplaatst. Van hieruit zou de brand dan later vergassing van de dakconstructie kunnen veroorzaken. Het is bovendien waarschijnlijk dat er openingen aanwezig zijn tussen magazijn en de open zolder. Echter, uit deze opening zullen net als in de deuropening tussen magazijn en loods brandbare rookgassen van lage temperatuur uitstromen. Verbranding in een open vlam ter plaatse van de uitstroomopeningen of ter plaatse van op de zolder aanwezige vuurlast staat haaks op het accumuleren van brandbare rookgassen tegen het dak van de loods.

De gestelde hypothese leidt dus tot een ander brandverloop dan het geschetste en wordt niet ondersteund door schadebeeld en getuigenverklaringen. Bij open vlammen

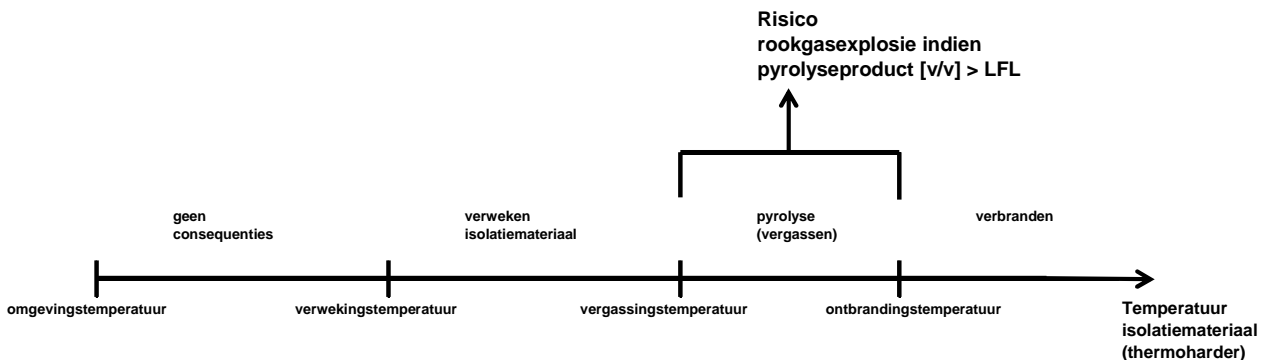
in de loods zijn de geaccumuleerde rookgassen niet of in elk geval aanzienlijk minder brandbaar. De rookgasexplosie zou dan veroorzaakt moeten zijn door vergassing van de dakpanelen als gevolg van een hoge temperatuur van de rookgaslaag. Echter, open vlammen en een hoge temperatuur van de rookgaslaag zijn niet waargenomen.

Ad 7. Vergassing dakpanelen zorgt voor explosief gasmengsel

Deze hypothese wordt niet ondersteund door schadebeeld en getuigenverklaringen, dit is bij de voorgaande hypothese toegelicht. De temperatuur van de rookgaslaag is niet voldoende hoog (grenswaarde: 200 a 300 °C) voor vergassing van de dakpanelen. Daarnaast wordt in het OVV-rapport vastgesteld dat, gesteld dat de temperatuur van de rookgaslaag wel voldoende hoog zou zijn, het vergassen van de dakpanelen te traag verloopt om binnen de gestelde tijd tot een rookgasexplosie te leiden.

Het OVV-rapport veronderstelt dat de rookgasexplosie optreedt bij een rijk brandstofmengsel. Echter, zodra de LFL-waarde voor het mengsel wordt overschreden is een rookgasexplosie mogelijk, zie het gestelde bij hypothese 3. Voor geïmpregneerde PUR is een inschatting van de LFL-waarde gegeven in de bijlage. Dit in acht nemende moet nog steeds worden gesteld dat de hypothese binnen het geschetste brandscenario onwaarschijnlijk is.

Bij andere brandscenario's met hogere rookgaslaagtemperaturen kan het vergassen van de dakpanelen aan de onderzijde ervan zeker een rol spelen in het temperatuurinterval tussen vergassingstemperatuur (pyrolyseren) en ontbrandingstemperatuur. Indien deze temperatuurgrenzen niet gelijk zijn aan elkaar is er een risico van rookgasexplosie aanwezig. Afhankelijk van het volume van de rookgaslaag en de geïmpregneerde brandstofmassa kan de LFL-waarde worden overschreden in de rookgaslaag. Dat levert een risico van rookgasexplosie.



*Figuur: Vereenvoudigde weergave van consequenties van opwarming van het isolatiemateriaal (PUR) in de dakpanelen, het vergassen en mogelijk ontbranden ervan.*

## Evaluatie

Ten aanzien van het geschetste brandverloop en de daarbij onderzochte hypothesen kan over het OVV-rapport het volgende geconcludeerd worden:

### *Brandverloop*

Het geschetste brandverloop lijkt plausibel. Of de oorzaak van het plotseling ontbranden van de rookgaslaag door een uitslaande vlam het gevolg is van een pulserende brand in het magazijn of van een meer geleidelijk toename van de gastemperatuur in het magazijn doet hierbij niet ter zake.

### *Hypothesen*

In het beschreven mechanisme voor de rookgasexplosie is onduidelijk waarom is uitgegaan van een stoichiometrische verbranding van de rookgaslaag. Aannemelijker is dat ontbranding van een arm brandstofmengsel heeft plaatsgevonden. Daarvoor is aanmerkelijk minder brandstof nodig en komt ook aanmerkelijk minder energie vrij (7.300 MJ in plaats van 14.000 MJ).

Dat betekent dat in dit geval minder hout (zoldervloer) en inventaris behoeft te worden vergast om een rookgasexplosie te kunnen veroorzaken.

Het is niet aannemelijk dat de vergassing van de dakpanelen heeft bijgedragen aan de verbrandingsenergie van de rookgaslaag. In het geschetste scenario is daarvoor de rookgaslaag onvoldoende warm.

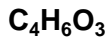
Zwolle, 5 november 2009  
Adviesburo Nieman B.V.

ir. R.A.P. van Herpen



Bijlage 1: LFL-limiet voor gasvormige brandstof

## Bijlage 1 LFL-limiet voor gasvormige brandstof



### Cellulosebrandstof (fiktief) LFL en UFL limieten

molecuulgewicht: 102.0886 [kg/kMol]  
 vormingsenthalpie:  $-5.63 [10^5 \text{ J/mol}]$  (solid, fiktief)  
 verbrandingsenthalpie:  $-17.87 [10^5 \text{ J/mol}]$  ( $\text{H}_2\text{O}$ : gas)  
 verbrandingswaarde:  $-17.50 [\text{MJ/kg}]$  (onderwaarde)

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

$M_F = 102.0886$ [kg/kMol]	$n_F = 1$	} $r = 1.254$
$M_{\text{O}_2} = 31.9988$ [kg/kMol]	$n_{\text{O}_2} = 4$	
	$n_{\text{CO}_2} = 4$	
	$n_{\text{H}_2\text{O}} = 3$	

#### warmtecapaciteit rookgas

$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$  (g)  $C_p = 233$  [J/(mol.K)] bij 1000 K  
 $\text{H}_2\text{O}$  (g)  $C_p = 40.7$  [J/(mol.K)]  
 $\text{CO}_2$   $C_p = 51.6$  [J/(mol.K)]  
 $\text{O}_2$   $C_p = 33.9$  [J/(mol.K)]  
 $\text{N}_2$   $C_p = 32.1$  [J/(mol.K)]  
 (NIST Chemistry Webbook; bij 300 - 1600 K)

#### uitgangstemperaturen

$T_a = 298$  [K]  
 $T_{f,\text{lower}} = 1600$  [K]  
 $T_{f,\text{upper}} = 1600$  [K]

#### maximum overmaat aan zuurstof per mol brandstof

(voor ontsteking brandstof; adiabatisch)

$$x = 3.627 [\text{mol } \text{O}_2 / \text{mol } F]$$

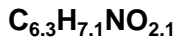
$$\boxed{LFL = 2.7 [\%] \text{ v/v}}$$

#### maximum overmaat aan brandstof per mol brandstof

$$x = 2.408 [\text{mol } F / \text{mol } F]$$

$$\boxed{UFL = 15.2 [\%] \text{ v/v}}$$





**Polyurethaan PUR**  
**LFL en UFL limieten**

(SFPE Handbook of fire protection)

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

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

$M_F = 130.3$ [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)  $C_p = 40.7$  [J/(mol.K)]  
 CO<sub>2</sub>  $C_p = 51.6$  [J/(mol.K)]  
 O<sub>2</sub>  $C_p = 33.9$  [J/(mol.K)]  
 N<sub>2</sub>  $C_p = 32.1$  [J/(mol.K)]

(NIST Chemistry Webbook; bij 300 - 1600 K)

**uitgangstemperaturen**

$T_a = 298$  [K]  
 $T_{f,lower} = 1600$  [K]  
 $T_{f,upper} = 1600$  [K]

**maximum overmaat aan zuurstof per mol brandstof**

(voor ontsteking brandstof; adiabatisch)

$$x = 6.943 [mol_{O_2} / mol_F]$$

**LFL = 1.5 [%] v/v**

**maximum overmaat aan brandstof per mol brandstof**

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

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