

Rookgasexplosies - oorzaken en mechanismen

Status	definitief
Versie	001
Rapport	B.2017.0218.01.R001
Datum	25 februari 2020



Colofon

Opdrachtgever	NII / IFV / DGMR
Contactpersoon opdrachtgever	E. Las (NII) L. de Witte (IFV) Ir. R.J.M. van Mierlo (DGMR)
Project	Onderzoek Rookgasexplosies
Betreft	
Uw kenmerk	B.2017.0218.01.R001
Rapport	B.2017.0218.01.R001
Datum	25 februari 2020
Versie	001
Status	definitief
Uitgevoerd door	DGMR Bouw B.V. Casuariestraat 5 2511 VB Den Haag Postbus 370 2501 CJ Den Haag
Contactpersoon	
Auteur	ir. R.J.M. (Rudolf) van Mierlo 088 346 77 61 rmi@dgmr.nl
Projectadviseur	ir. R.J.M. (Rudolf) van Mierlo 088 346 77 61 rmi@dgmr.nl
2e lezer/secr.	BDI

Inhoud

1. Inleiding	4
2. Productie en ontsteking van brandbare gasmengsels	5
2.1 Introductie	5
2.2 Brandbare gasmengsels	5
2.3 Productie van brandbare gassen	11
3. Explosieverschijnselen bij brand	15
3.1 Introductie	15
3.2 Explosieve verbranding van gassen	15
3.3 Flashover	17
3.4 Backdraft	18
3.5 Rookgasexplosie	19
3.6 Vergelijking tussen flashover, backdraft en rookgasexplosie	21
4. Verspreiding van rookgassen	23
4.1 Introductie	23
4.2 Drukverschillen	23
4.3 Openingen in scheidingen	26
4.4 Stromingen door openingen	26
5. De rol van gebouw, bouwmaterialen en inventaris	28
5.1 Productie van brandbare gassen	28
5.2 Verbranding van pyrolysegassen	29
5.3 Verspreiding van brandbare gassen	30
5.4 Accumulatie van pyrolysegassen	31
5.5 Schade aan de constructie en de omgeving	32
5.6 Voorbeeld-gebouwen	32
6. Signalen voorafgaand aan explosieve verbranding	34
6.1 Eigenschappen van de brand	34
6.2 Eigenschappen van het gebouw	34
7. Gangbare uitspraken over rookgasexplosies	35
7.1 Introductie	35
7.2 Uitspraken	35
Bijlagen	
Bijlage 1	Ontstekingsgrenzen van gangbare gassen bij omgevingstemperatuur (Tabellen uit SFPE Handbook [SFPE2016], 2 blz.)
Bijlage 2	Literatuur

1. Inleiding

Brandweerkorpsen ervaren tijdens brandbestrijding regelmatig een onverwachte versnelling in de brandontwikkeling. Het vermoeden bestaat dat rookgasexplosies daarvan een oorzaak zijn. De oorzaak is echter meestal te onduidelijk om te weten of een rookgasexplosie een rol heeft gespeeld. Gezien het gevaar van rookgasexplosies voor de repressieteams, zeker als die in het gebouw actief zijn, is deze situatie zeer onbevredigend. Door deze combinatie van belang en onduidelijkheid krijgen vermoedens vaak een te groot gewicht. Een analyse van de mogelijke oorzaken is daarom gewenst voor zowel de veilige inzet van repressieteams als het brandveilig ontwerpen en gebruiken van gebouwen.

Met dit rapport is getracht een belangrijke stap te zetten naar duidelijkheid over het verschijnsel rookgasexplosie en een breed gedragen standpunt over de wijze van omgaan ermee. Daarvoor is eerst onderzoek nodig om de kennis over het verschijnsel te verzamelen en daaruit een samenhangend beeld op te stellen van de oorzaken, de omstandigheden en het verloop ervan en van de verschijnselen die een rookgasexplosie aankondigen.

Dit rapport heeft een technisch-wetenschappelijke karakter, zodat de direct betrokkenen bij activiteiten op dit gebied goed onderbouwd kunnen worden geïnformeerd. Daarbij is ook aandacht voor:

- De relatie met andere snelle brandverschijnselen (backdraft, flashover).
- De mogelijke rol van brandbare producten.
- De gebouwindeling.
- Gangbare veronderstellingen.

Dit onderzoek is gebaseerd op een analyse van bestaande kennis. Aanvullende testen en berekeningen zijn hierbij niet uitgevoerd. Van de lezer wordt basiskennis over brand en brandfysica verwacht, met name over warmteoverdracht en het gedrag van gassen.

2. Productie en ontsteking van brandbare gasmengsels

2.1 Introductie

Rookgasexplosies ontstaan door het zeer snel verbranden van brandbare gassen die zijn ontstaan door ontleding van brandstoffen of bij onvolledige verbranding. In dit hoofdstuk bekijken we hoe die brandbare gassen worden geproduceerd, wanneer die gassen een brandbaar mengsel vormen met zuurstof en hoe dat gasmengsel dan verbrandt. We behandelen deze stappen in omgekeerde volgorde, omdat dit de uitleg vereenvoudigt. Dus eerst de verbranding, dan de brandbaarheid van het gasmengsel en daarna de productie van de brandbare gassen.

2.2 Brandbare gasmengsels

2.2.1 Verbranding van gassen

Verbranden is het chemisch reageren van een stof met zuurstof, waarbij warmte vrijkomt. Voor een snelle verbrandingsreactie moeten de reagerende stoffen heet genoeg zijn: hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de reactie verloopt. Een gebied met een hogere temperatuur dan de omgeving verliest via convectie, straling en geleiding warmte aan haar omgeving. Als de vrijkomende reactiewarmte voldoende is om de warmteverliezen te compenseren, dan blijft de temperatuur hoog en houdt de reactie zichzelf in stand.

Verbranding bestaat in twee gedaanten: vlammende verbranding en smeulende verbranding. We bekijken hier de vlammende verbranding, omdat die verbranding het meest acute gevaar veroorzaakt.

Vlammende verbranding is een reactie tussen gassen. Een vaste of vloeibare stof moet voor vlammende verbranding dus eerst worden omgezet naar een brandbaar gas. Deze omzetting wordt behandeld in paragraaf 2.3. In deze paragraaf bekijken we de verbranding van een gasmengsel, zonder ons bezig te houden met de oorsprong van de gasvormige brandstof.

Om chemisch te reageren moeten de zuurstof- en brandstofmoleculen in de vlam voldoende bewegingsenergie hebben, dus voldoende heet zijn. Hoe hoger de bewegingsenergie, dus hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de stoffen met elkaar reageren¹. Om inzicht te krijgen in de processen tijdens de verbranding kijken we nu naar de condities waaronder de verbranding kan starten.

Om snel te reageren moeten de zuurstof- en de gasvormige brandstofmoleculen voorafgaand aan de reactie al goed gemengd zijn. Een reactie verloopt veel langzamer als de gassen niet (goed) zijn voorgemengd, zoals bij uitslaande vlammen waarin een hete brandstofrijke rookgaslaag de zuurstofrijke buitenlucht instroomt. De snelheid van mengen van brandstof en zuurstof bepaalt en beperkt dan de reactiesnelheid. Een vlam waarin de zuurstofmoleculen zich nog tijdens het verbrandingsproces tussen de brandstofmoleculen moeten mengen (en andersom) noemen we een diffuse² vlam. Als beide gassen voorafgaand aan de verbranding al goed gemengd zijn spreken we van een voorgemengde vlam.

¹ De snelheid van chemische reacties is sterk van de temperatuur afhankelijk, vooral bij lage temperaturen. Als indicatie: bij een temperatuurverhoging van 0°C naar 100°C neemt de reactiesnelheid toe met een factor 1.000 tot 1.000.000, afhankelijk van de energie die nodig is om de reactie te starten ('activerings-energie'). Bij een verhoging 600°C naar 700°C met een factor 2 tot 10. Bron: [BABR2003].

² Diffusie is het proces waarbij een gas mengt met een ander gas en zich daarbij verplaatst door verschillen in concentratie.

Een explosieve verbranding is alleen mogelijk waar het brandstof-zuurstof mengsel goed voorgemengd is.

Ontsteken door zelfontbranding

We bekijken eerst wat er gebeurt met een niet brandend, maar wel ontsteekbaar mengsel als de temperatuur van het mengsel geleidelijk stijgt³.

In een gas bewegen moleculen met verschillende snelheden en in alle richtingen. De gemiddelde snelheid neemt toe bij stijgende temperatuur. Bij elke temperatuur zijn er moleculen die snel genoeg bewegen en dus voldoende energie hebben om te reageren. Bij lage temperatuur is het aantal daardoor ontstane reacties veel te klein om de warmteverliezen te compenseren, zodat de reactie niet zelf-onderhoudend is. Bij een toenemende temperatuur neemt de reactiesnelheid en dus de warmteproductie door de reactie sneller toe dan de warmteverliezen. Boven een bepaalde temperatuur wordt de warmteproductie groter dan de warmteverliezen; dit is de zelfontbrandings-temperatuur. Boven die temperatuur versnelt de reactie zichzelf en neemt de temperatuur verder toe totdat de reactie zo snel gaat dat de warmteverliezen naar de omgeving bijna verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de warmteproductie: bijna alle verbrandingsenergie wordt dan omgezet in de temperatuurtoename van het gasmengsel. De warmtecapaciteit van het gasmengsel bepaalt dan de maximale gastemperatuur. Deze temperatuur noemen we de adiabatische⁴ gastemperatuur. De reactie stopt pas als de brandstof of de zuurstof is verbruikt.

Als de zelfontbrandingstemperatuur lokaal is overschreden en de zelfontbranding dus lokaal is gestart, plant de vlam zich voort door het hele gebied waarin het gasmengsel ontsteekbaar is. Vlak voor het vlamfront wordt het ontsteekbare mengsel opgewarmd tot boven de zelfontbrandingstemperatuur, om daarna snel tot de vlamtemperatuur toe te nemen en zelf het vlamfront te vormen dat het aangrenzende nog niet ontstoken mengsel opwarmt.

Ontsteken door een ontstekingsbron

De tweede mogelijkheid van ontsteking is die met een ontstekingsbron. Een kortstondige hittebron, zoals een vonk die een kleine hoeveelheid gasmengsel tot boven de zelfontbrandings-temperatuur verhit, kan hiermee de verbrandingsreactie op gang brengen.

De kleinste hoeveelheid energie die de reactie op gang brengt noemen we de ontstekingsenergie. De vrijkomende warmte verspreidt zich in het 'koude' mengsel eromheen door geleiding, straling en convectie. De verbranding verloopt daarna op dezelfde wijze als bij een lokale zelfontbranding. Als de reactiewarmte langzaam vrijkomt, dan wordt de warmte afgevoerd zonder aangrenzend gas voldoende te verhitten om te ontsteken. Als de vonk voorbij is, dan stopt de verbranding helemaal. Als de reactiewarmte langzaam vrijkomt bij een langdurig aanwezige ontstekingsbron, zoals een vlam, kan door convectie een continue 'vers' mengsel worden aangevoerd en reageren; de brand blijft dan beperkt tot de directe omgeving van de ontstekingsbron.

Als de vrijkomende reactiewarmte voldoende is om de warmteverliezen te compenseren, dan blijft de temperatuur ook na het stoppen van de ontstekingsbron hoog en houdt de reactie zichzelf in stand.

³ We gebruiken hierbij een eenvoudig molecuulmodel, dat toch nog bruikbaar is om de processen tijdens verbranding verantwoord toe te lichten.

⁴ 'Adiabatisch' wil zeggen zonder warmteverlies naar de omgeving.

De mengverhouding brandstof-zuurstof

Een bepaalde brandstof reageert met zuurstof in een vaste verhouding. Bijvoorbeeld één molecuul van een bepaalde brandstof met twee moleculen zuurstof, zoals kan worden weergegeven in een reactievergelijking⁵. Zuurstof is normaal in gasvorm beschikbaar in de omringende lucht (circa 20,95 volume-%) en soms in vaste of vloeibare vorm in de molecuulstructuur van de brandstof zelf. We bekijken hier de concentratie aan brandbare gassen die in lucht tot een brandbaar mengsel leidt.

De reactie gaat het snelst en de vlam is het heetst bij de mengverhouding van brandstof en zuurstof waarbij alle brandstof en zuurstof tijdens de reactie volledig wordt verbruikt. De reactie gaat langzamer naar mate de mengverhouding meer van die ideale mengverhouding afwijkt. Bij zo'n niet-ideale mengverhouding blijven er namelijk moleculen over van de component (brandstof of zuurstof) die er in overmaat is. Die overmaat heeft ook warmte opgenomen, maar draagt niet bij aan de reactie en dus niet aan de warmteproductie. De vlamtemperatuur is daardoor lager dan bij een ideale mengverhouding.

We noemen de ideale mengverhouding voor de reactie van twee stoffen de stoichiometrische verhouding. Als de mengverhouding te sterk afwijkt van de stoichiometrische verhouding gaat er te veel warmte verloren aan de opwarming van niet aan de reactie bijdragende gassen, zodat de verbrandingsreactie zichzelf niet in stand kan houden. Het mengsel noemen we dan 'te rijk' of 'te arm' aan brandstof. De brandstofconcentraties waartussen nog juist verbranding mogelijk is, heten de onderste en bovenste ontstekingsgrens of explosiegrens (zie paragraaf 2.2.2).

Niet-homogeen gasmengsel

Een gasmengsel in een ruimte hoeft niet overal dezelfde samenstelling te hebben. Bij een gaslek in een ruimte of bij grote temperatuurverschillen kan de concentratie van een bepaalde gascomponent bijvoorbeeld sterk variëren over de ruimte. Dit is belangrijk als we willen weten of een brandbaar gas in een concentratie binnen de explosiegrenzen aanwezig is. Als de gemiddelde concentratie bijvoorbeeld onder de onderste explosiegrens ligt, kan lokaal toch een explosief mengsel aanwezig zijn. De kracht van een explosieve verbranding van zo'n lokaal brandbaar mengsel is wel minder dan als de gehele ruimte daarmee gevuld is (zie ook paragraaf 3.2).

2.2.2 De ontstekingsgrenzen LFL en UFL

De brandstofconcentraties waartussen nog juist verbranding mogelijk is, heten de onderste en bovenste ontstekingsgrens of explosiegrens. In de literatuur worden hiervoor vaak de Engelse termen gebruikt: de Lower/Upper Flammability Limit (LFL en UFL) en de Lower/Upper Explosion Limit (LEL en UEL). Omdat mengsels dicht bij de onderste en bovenste grens langzamer reageren en niet altijd explosief verbranden, geeft de benaming 'onderste of bovenste ontstekingsgrens' beter weer wat er tussen deze grenzen gebeurt. We gebruiken hier daarom de termen LFL en UFL.

De LFL en UFL zijn alleen goed gedefinieerd voor een homogeen gasmengsel. De LFL en de UFL zijn dan de onderste en bovenste concentratie van de brandstof in het gasmengsel met zuurstof waartussen een vlamfront zich door het mengsel kan voortplanten. De LFL- en UFL-waarden van gasmengsels worden daarom meestal bepaald in een buis met homogeen mengsel en een ontstekingsbron, waarbij wordt beoordeeld of de vlam zich ten minste over een bepaalde afstand door de buis kan voortplanten⁶.

We bespreken hier alle concentraties, en dus ook de LFL- en UFL-waarden, op basis van volumepercentages, tenzij anders aangegeven.

⁵ Als voorbeeld: de reactievergelijking voor de verbranding van methaan: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.

⁶ De voortplantingsrichting ten opzichte van de zwaartekracht maakt hierbij verschil uit, doordat de verbrandingsproducten de neiging hebben op te stijgen door hun hogere temperatuur en dus geringere dichtheid.

De LFL neemt voor de meeste koolwaterstoffen lineair af bij toenemende temperatuur, de UFL neemt toe, zoals blijkt uit de twee iets naar rechts divergerende lijnen in figuur 1. De LFL wordt uiteindelijk 0% als de temperatuur van het mengsel gelijk is aan de laagst mogelijke vlamtemperatuur, voor koolwaterstoffen is dat circa 1.600 K. Deze relatie van LFL bij toenemende temperatuur geldt niet boven de temperatuur waarbij het brandbare gas ontleedt; er ontstaan dan andere (lichtere) moleculen met andere LFL- en UFL-waarden⁹.

LFL- en UFL-waarden zijn voor veel stoffen beschikbaar, een overzicht is opgenomen in bijlage 1¹⁰. Voor niet getabelleerde stoffen en als handzame indicatie zijn schattingen beschikbaar.

Bijvoorbeeld:

- Voor veel koolwaterstoffen: LFL \approx 0,5 tot 0,55 x de stoichiometrische concentratie. Bij koolwaterstoffen met halogenen liggen de waarden hoger.
- Algemene bepaling van de LFL voor koolwaterstoffen met of zonder halogenen (BABR2003, Blz. 110 => Monakhov): LFL \approx 100 / (a· β + b), met a = 8,684 en b = 4,679 en $\beta = N_C + N_S + (N_H - N_X)/4 - N_O/2$, met N_C , N_S , N_H , en N_O als het aantal atomen koolstof (C), zwavel (S), waterstof (H) en zuurstof (O) in het brandstof-molecuul en met N_X het aantal halogeen atomen (F, Cl, BR en I).

Let op: Er zijn enkele brandstoffen die in verbrandingseigenschappen sterk afwijken van alle andere brandstoffen: de bekendste zijn waterstof en acetyleen. Gebruik voor deze stoffen alleen de specifiek voor die stoffen in de literatuur beschikbare waarden en geen schattingen met bredere toepassing.

De LFL neemt, uitgedrukt in volumeprocenten, voor koolwaterstoffen continu af voor toenemend molecuulgewicht, maar als we de LFL uitdrukken in massaconcentratie (in kg/m³) blijkt de LFL ongeveer constant te zijn. Aangezien ook de verbrandingswaarde per kg ongeveer hetzelfde is voor verschillende koolwaterstoffen, komt de LFL voor koolwaterstoffen hierdoor ongeveer overeen met een vaste energiedichtheid van 1,5 tot 2 MJ/m³. Dit geeft een indicatie van de energie die kan vrijkomen bij een ontsteking dicht bij de LFL. Bij de stoichiometrische mengverhouding is de energiedichtheid voor koolwaterstoffen ongeveer het dubbele, 3,0 tot 3,5 MJ/m³. Deze laatste waarde geldt overigens voor bijna alle gasvormige brandstoffen in lucht¹¹.

We hebben hier vooral de temperatuurafhankelijkheid van de LFL bekeken. Voor de UFL is het veel moeilijker algemeen geldende uitspraken te doen, maar meestal stijgt de UFL bij stijgende temperatuur.

2.2.3 De ontstekingsgrenzen van mengsels

Voor mengsels van meerdere gassen is de LFL-waarde te bepalen als gewogen gemiddelde van de LFL's van de aanwezige gassen, met de wet van Le Chatelier.

Voor het gasmengsel met drie componenten 1, 2, 3, aanwezig in de concentraties C_1 , C_2 , C_3 , met LFL-waarden LFL₁, LFL₂, LFL₃, is volgens deze wet de LFL dan bijvoorbeeld [BABR2003]: $LFL_{\text{mengsel}} = 100 / (C_1/LFL_1 + C_2/LFL_2 + C_3/LFL_3)$

⁹ De ontleding in lichtere/kleinere moleculen noemen we pyrolyse; zie ook 2.3.2.

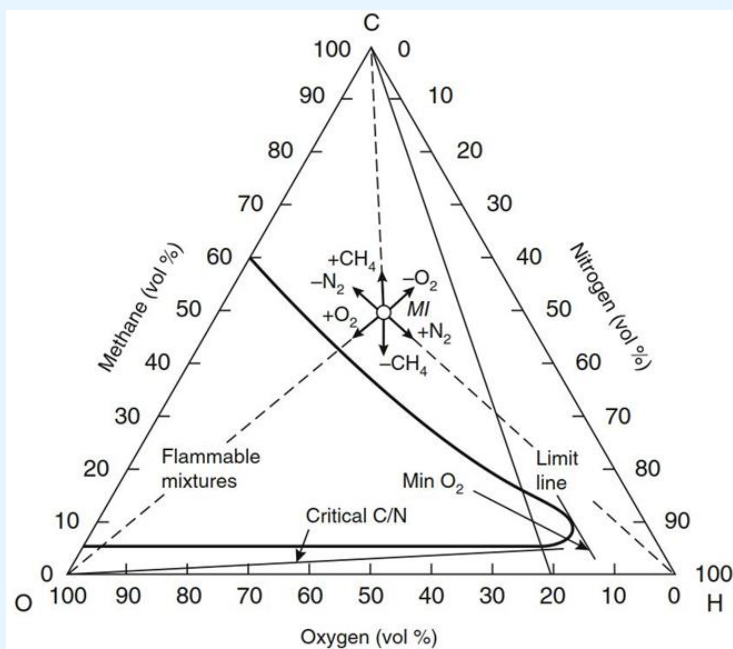
¹⁰ Merk op dat de meeste in bijlage 1 genoemde LFL- en UFL-waarden geldig zijn voor een begintemperatuur van 70 °C; de overige voor temperaturen tussen 29 °C en 247 °C.

¹¹ De waarde van 3,0 tot 3,5 MJ/m³ bij stoichiometrische mengverhouding geldt voor bijna alle gasvormige brandstoffen in lucht. Dit is direct in te zien door de verbrandingsreactie te bekijken vanuit de zuurstof, dat gemiddeld 13,1 MJ/kg produceert (\pm 5%). Met een luchtdichtheid van 1,18 kg/m³ bij 298 K en 21% zuurstof in lucht volgt dat 1 m³ lucht ca. 3,25 MJ kan produceren bij volledige verbranding.

Deze wet, die een schatting geeft voor mengsels van gassen, veronderstelt onder andere dat de gassen elkaars verbrandingsgedrag niet beïnvloeden. In de praktijk gaat de wet vooral goed op voor de LFL van brandstoffen met sterk gelijkende eigenschappen. Voor waterstof- of acetyleenhoudende mengsels en sommige gechloroerde koolwaterstoffen geeft de wet geen goede schatting [MA2015].

Ontsteekbare mengsels, mengsels dus met een brandstofconcentratie tussen LFL en UFL, kunnen inert (niet-ontsteekbaar) worden gemaakt door een inert gas toe te voegen (een gas dat niet bijdraagt aan verbranding). In de praktijk van de brandbestrijding is dat inerte gas meestal waterdamp, ingebracht als water in een vloeistofnevel in een omgeving die ruim warmer is dan 100°C, zodat de vloeistofdruppels snel verdampen. Merk wel op dat het inbrengen van een inert gas in een mengsel met een brandstofconcentratie boven de UFL dit mengsel juist tussen de LFL en de UFL kan brengen en dus ontsteekbaar kan maken, terwijl dat mengsel van tevoren niet ontsteekbaar was!

Het wel of niet ontsteekbaar zijn van gasmengsels is inzichtelijk te maken met verbrandingsdiagrammen. Voor een mengsel van zuurstof-stikstof-methaan is zo'n diagram¹² afgebeeld in figuur 2.



figuur 2: Een verbrandingsdiagram voor een zuurstof-stikstof-methaan mengsel (=lucht-methaan-mengsel) bij omgevingstemperatuur.

De lijn van 21% zuurstof (plus 79% stikstof) op de onderas naar de top van de driehoek (100% methaan) representeert een mengsel van lucht met 0% tot 100% methaan. De snijpunten van deze lijn met de randen van het gebied 'flammable mixtures' zijn de LFL en UFL in lucht.

Ook is te zien dat methaan bij omgevingstemperatuur geen ontsteekbaar mengsel kan vormen als het zuurstofpercentage lager is dan 12% ('limit line': lijn evenwijdig aan de rechter schuine zijde, rakend aan het gebied 'flammable mixtures') [SFPE2016, blz.539]

¹² De verbrandingsdiagrammen vereisen wat oefening om snel te kunnen lezen. Zie voor een uitleg bijvoorbeeld [SFPE2016], hoofdstuk 17.

Voor gasmengsels van gangbare zuivere gassen in lucht bij omgevingstemperatuur zijn verbrandingsdiagrammen beschikbaar. Voor hogere temperaturen is een diagram daarvan bij benadering af te leiden. De diagrammen zijn vaak nuttig in de industriële brandveiligheid, omdat zuivere mengsels daar voorkomen.

Voor gasmengsels van lucht met pyrolyse- en verbrandingsproducten, de gasmengsels die bij een brand ontstaan, is zo'n diagram echter niet beschikbaar, omdat de samenstelling van die gasmengsels zeer variabel is. Verbrandingsdiagrammen kunnen dan bijvoorbeeld gebruikt worden om begrip te krijgen bij de gevolgen van verdunning, maar dus niet voor het bepalen van enigszins nauwkeurige ontstekingsgrenzen.

2.3 Productie van brandbare gassen

In de vorige paragraaf hebben we de eigenschappen van een brandbaar gasmengsel bekeken. In deze paragraaf gaat de aandacht uit naar het voorafgaande proces: de productie van de gasvormige brandstof.

2.3.1 Brandbare gassen, geproduceerd door vloeistoffen

Uit een vloeistof ontsnappen altijd moleculen (er is altijd verdamping), zodat boven de vloeistof een dampconcentratie¹³ (een gas dus) van die stof aanwezig is. Die verdamping neemt sterk toe met stijgende temperatuur, zodat opwarmen van een vloeibare brandstof uiteindelijk tot een brandbaar brandstof-lucht-mengsel boven de vloeistof leidt.

Bij een homogene vloeistof met constante temperatuur in een gesloten vat is de damp boven de vloeistof overal van dezelfde concentratie en in evenwicht met de vloeistof (er verdampen evenveel moleculen als er terugkeren naar de vloeistof). Een gasmengsel is dan overal in het vat even brandbaar. De dampconcentratie komt overeen met de dampdruk van de vloeistof bij die temperatuur. Als de vloeistof een mengsel is van meerdere stoffen, dan is bij evenwicht de concentratie van elk van de stoffen in de damp gelijk aan de partiële dampdruk van die stof.

In de open lucht (een open vat) neemt de concentratie boven de vloeistof af bij toenemende afstand van het vloeistofoppervlak, omdat de damp steeds verder wordt opgemengd. Hoe warmer de vloeistof, hoe groter de stroom van verdampte vloeistof en hoe hoger de dampconcentratie boven de vloeistof. Bij geleidelijk opwarmen van de vloeistof ontstaat als eerste een brandbaar mengsel vlak boven de vloeistof, zodra de temperatuur van de vloeistof zo hoog is dat de partiële dampdruk boven de LFL uitkomt. Dit gebied met brandbaar mengsel groeit bij verder opwarmen. Bij nog verder opwarmen ontstaat boven de vloeistof een gebied waar het gasmengsel te rijk is aan brandstof (een gebied waarin de partiële dampdruk boven de UFL ligt). Ook dit gebied groeit bij nog verder verwarmen.

Het besproken verdampingstraject is in figuur 2.1 weergegeven door lijn 3: bij oplopende temperatuur neemt de concentratie van de damp, dat wil zeggen van de brandstof, toe. Bij T_L snijdt lijn 3 de LFL-lijn (2) en bij T_u de UFL-lijn (1).

¹³ We gebruiken hier het woord 'damp' voor de gasfase boven de vloeistoffase van dezelfde stof, zoals in de natuurkunde gebruikelijk is voor een gas bij een temperatuur, waarbij het gas door compressie weer een vloeistof kan worden. In de volksmond wordt 'damp' ook wel voor kleine vloeistofdruppeltje in lucht gebruikt; het woord 'nevel' is daarvoor echter beter geschikt.

Vlampunt en brandpunt:

Het vlammpunt van de vloeistof (Eng.: flash point) is de laagste temperatuur waarbij de vloeistof voldoende damp afgeeft om in lucht tot ontbranding te kunnen komen bij contact met een kleine ontstekingsbron. De damp boven een vloeistof met een temperatuur boven het vlammpunt is te ontsteken met een ontstekingsbron als de ontstekingsenergie groot genoeg is. De damp boven een vloeistof onder het vlammpunt kan niet ontsteken. Daarom kan een lek van benzine (vlampunt -65 °C) over de straat wel tot een plasbrand leiden en een lek van diesel (vlampunt 52-96 °C) niet. Merk op dat het vlammpunt geldt voor een vloeistofspiegel en niet als de vloeistof wordt opgenomen in een poreus oppervlak, bijvoorbeeld zand of poreuze steen ([DRYS2011]).

Een aan het vlammpunt gerelateerd begrip is het brandpunt (Eng.: fire point); dit is de laagste temperatuur waarbij de vloeistof al voldoende damp afgeeft om tot ontbranding te kunnen komen én de verbranding te onderhouden na contact met een ontstekingsbron. Het brandpunt ligt meestal enkele tot enkele tientallen graden hoger dan het vlammpunt, soms echter veel hoger zoals bij zware oliën met zeer hoge vlammpunten.

Het vlammpunt is een indicator van het gevaar dat een brandbare vloeistof betekent voor de omgeving. Vloeibare brandstoffen worden daarom in gevarenclassen ingedeeld op grond van hun vlammpunt: hoe lager de vlammpunttemperatuur hoe gevaarlijker.

Het gemeten vlammpunt en brandpunt zijn enigszins afhankelijk van de manier van meten. In de literatuur zijn daarom voor dezelfde stof enigszins verschillende waarden terug te vinden. De belangrijkste vlammpuntsbepalingen zijn die in een gesloten vat (Eng.: 'closed-cup') en een open vat (Eng.: 'open-cup'). Zoals eerder vermeld is in een gesloten vat bij constante temperatuur de damp overal van dezelfde concentratie. Een ontstekingsbron in de damp zal overal hetzelfde resultaat opleveren: wel of niet ontsteking. In een open vat neemt de concentratie af bij toenemende afstand van het vloeistofoppervlak. Of de damp te ontsteken is hangt dan dus af van de afstand tot de vloeistof. Hierdoor ligt het vlammpunt in een 'open cup' wat hoger dan in een 'closed cup' en is het open cup vlammpunt meer afhankelijk van de manier van meten. De open cup variant representeert wel beter de meeste situaties met brandbare gasmengsels in gebouwen, want ook daar neemt de concentratie meestal af bij toenemende afstand tot een vloeistofoppervlak.

Veel vloeistoffen bestaan uit een mengsel van verschillende stoffen (bijv. aardolieproducten zoals benzine, kerosine en diesel). Het vlammpunt van het mengsel is dan een temperatuurtraject, vaak aangegeven als 'vanaf deze temperatuur', omdat de meest vluchtige component bij die temperatuur het vlammpunt heeft. De minder vluchtige componenten in het mengsel hebben een hoger vlammpunt dat pas relevant wordt als de meest vluchtige component grotendeels of geheel is verdampt.

De zelfontbrandingstemperatuur (Eng.: auto ignition temperature, AIT) van de damp boven het vloeistofoppervlak ligt een stuk hoger dan het vlammpunt en het brandpunt van de vloeistof (zie bijlage 1). In tegenstelling tot bij het vlammpunt en het brandpunt, is boven de zelfontbrandingstemperatuur geen ontstekingsbron nodig. De damp ontsteekt vanzelf, omdat de reactie in de damp meer warmte produceert dan er warmteverliezen zijn. Merk op dat bij atmosferische druk de zelfontbrandingstemperatuur van de meeste vloeistoffen hoger ligt dan het kookpunt, zodat er bij die druk geen vloeistof meer is.

Verdampen kost energie, zodat er permanent energie naar de vloeistof moet worden aangevoerd om de verdamping op gang te houden.

Bij een brandende vloeistof is het bijna alleen de straling vanuit de vlammen die deze energie aanvoert.¹⁴ Aangezien bij vlammende verbranding slechts circa 30% van de verbrandingswarmte in de vorm van straling vrijkomt en daarvan maar een beperkt deel (minder dan de helft) in de richting van de vloeistof gaat en die vloeistof verwarmt, moet een zichzelf¹⁵ onderhoudende vloeistofbrand een factor 7 of meer warmte produceren dan benodigd voor verdamping van de vloeistof.

2.3.2 Brandbare gassen, geproduceerd door vaste stoffen

Bij voldoende verhitting valt een deel van de moleculen van veel vaste stoffen uiteen in kleinere moleculen die gasvormig én brandbaar zijn. Dit ontledingsproces noemen we pyrolyse en de temperatuur waarboven het optreedt, de pyrolysetemperatuur. De gasvormige brandstof die zo ontstaat, de pyrolysegassen, bestaat uit andere moleculen dan de oorspronkelijke vaste stof. Hoe sterker de opwarming van de vaste stof, hoe meer warmte in de stof beschikbaar is voor pyrolyse, hoe groter de stroom van pyrolysegassen vanuit het oppervlak en hoe hoger de concentratie aan pyrolysegassen erboven, zodat op den duur een brandbaar mengsel ontstaat boven het oppervlak, zoals bij vloeistoffen.

Voor vaste stoffen wordt vooral de term 'ontstekingstemperatuur' gebruikt om aan te geven bij welke oppervlaktetemperatuur van een vaste stof deze stof voldoende pyrolysegassen loslaat om, bij de atmosferische hoeveelheid zuurstof, een verbranding in stand te houden.

In de gesloten variant ('closed cup') zijn de begrippen vlampunt en brandpunt voor vaste stoffen niet bruikbaar. In die situatie neemt de concentratie van pyrolysegassen bij continue verhitting boven de pyrolysetemperatuur namelijk continu toe. Er gaan geen pyrolysegassen terug naar de brandstof en er is dus ook geen evenwichtsconcentratie zoals bij vloeistoffen.

In de open variant zijn de begrippen vlampunt en brandpunt voor vaste stoffen wel bruikbaar, maar veel slechter gedefinieerd; dat wil zeggen, van veel meer omstandigheden afhankelijk. De concentratie van de pyrolysegassen is, net als bij vloeistoffen, afhankelijk van de afstand tot het oppervlak. Door verschillende oriëntaties van het oppervlak ('vloer-', 'wand-', 'plafond-oriëntatie' of iets daar tussenin) ontstaan, in tegenstelling tot bij vloeistoffen, ook verschillende stromingscondities boven het oppervlak. Daarnaast is de productie van de pyrolysegassen afhankelijk van de temperatuurverdeling in de vaste stof, niet alleen van de oppervlakte-temperatuur; een verdeling die van veel meer factoren afhankelijk en veel moeilijker te bepalen is dan bij vloeistoffen. Daarom gebruiken we bij vaste stoffen de begrippen pyrolysetemperatuur en ontstekingstemperatuur in plaats van vlampunt of brandpunt.

Een korte verwarming bij hoge temperatuur en een lange verwarming bij lagere temperatuur kunnen bijvoorbeeld leiden tot dezelfde oppervlaktetemperatuur, maar tot verschillende temperaturen dieper in het materiaal. Hierdoor kan de totale stroom van vrijkomende pyrolysegassen sterk verschillen. De pyrolyse-productie is dus ook afhankelijk van de voorafgaande temperatuurhistorie.

Als materialen zijn samengesteld uit meerdere stoffen met elk een eigen ontledingstemperatuur, is het resultaat voor het samengestelde materiaal geen vaste temperatuur, maar een temperatuurtraject.

¹⁴ Convectieve warmteoverdracht is dan verwaarloosbaar omdat de opgewarmde gassen opstijgen en nauwelijks in contact komen met de vloeistof. Geleiding is in de gasfase vrijwel altijd verwaarloosbaar bij verbranding.

¹⁵ Dit geldt als de verhitting wordt veroorzaakt door de verbranding van de geproduceerde damp/pyrolysegassen en niet bij verhitting door een externe bron.

De zelfontbrandingstemperatuur van de pyrolysegassen boven het oppervlak van een vaste stof ligt, net als bij vloeistoffen, een stuk hoger dan de ontstekingsstemperatuur van die stof (zie bijvoorbeeld bijlage1).

Pyrolyse, het ontleden van grote moleculen in kleine, kost energie, zodat er permanent energie moet worden aangevoerd om de pyrolyse op gang te houden.

Bij een brandende vaste stof is het, afhankelijk van de oriëntatie van het materiaaloppervlak, een combinatie van straling, convectie en geleiding vanuit de vlammen en opgewarmde materialen die deze energie aanvoert. Bij een 'vloer-oriëntatie' geldt hetzelfde als voor vloeistoffen: een zichzelf¹⁶ onderhoudende brand moet een factor 7 of meer warmte produceren dan benodigd voor pyrolyse. Bij een 'plafond-oriëntatie' is dat veel minder, omdat de vlammen en hete gassen niet van het oppervlak wegstromen, zodat er veel convectieve warmteoverdracht is naar het oppervlak.

Ook smeulende verbranding kan tot de productie van pyrolysegassen leiden. Voor een goede kwantificering daarvan is weinig informatie beschikbaar, maar het lijkt wel verantwoord om aan te nemen dat die productie in de meeste branden qua hoeveelheid brandbare gassen een ondergeschikte rol heeft. Het is eerder de productie onder afgeschermden condities waardoor een smeulbrand een risico kan vormen. De productie kan dan namelijk lang onopgemerkt blijven en lokaal tot een ontsteekbaar mengsel leiden.

2.3.3 Brandbare gassen, geproduceerd bij onvolledige verbranding

Tijdens verbranding van pyrolysegassen hoeft niet alle brandstof in één keer te verbranden.

Bij onvoldoende zuurstof of te lage temperatuur zal een deel van de pyrolysegassen onverbrand blijven, of gedeeltelijk verbranden. Het bekendste product van een onvolledige verbrandingsreactie is koolmonoxide (CO), vooral ontstaan door afwezigheid van voldoende zuurstof.

Onverbrande pyrolysegassen en onvolledige verbranding zijn heel gangbaar bij gebouwbranden. We komen hierop terug in het volgende hoofdstuk.

¹⁶ Dit geldt als de verhitting wordt veroorzaakt door verbranding van de geproduceerde pyrolysegassen en niet bij verhitting door een externe bron.

3. Explosieverschijnselen bij brand

3.1 Introductie

Een compartimentsbrand die zich ongestoord ontwikkelt, doorloopt vaak enkele vaste stadia (groeifase, brandfase en dooffase) totdat hij stopt door gebrek aan brandstof. Het doven van de brand door een gebrek aan zuurstof komt ook voor, maar het brandverloop is dan meestal anders. De meeste stadia verlopen geleidelijk, alleen de 'flashover', de overgang tussen groeifase en brandfase, is een plotselinge versnelling, waardoor een brand in een kleine ruimte in korte tijd kan uitgroeien van lokaal naar een volledig ontwikkelde brand in de gehele ruimte. Deze versnelling kan gevaarlijk zijn voor repressieteams, maar heeft geen explosief karakter. Een volledig ontwikkelde brand ontstaat niet altijd via flashover, maar dit gebeurt wel vaak.

Rookgasexplosies ontstaan zelden, maar kunnen zeer gevaarlijk zijn als ze optreden. Backdrafts, ook wel backdraughts genoemd, ontstaan vaker, maar hebben meestal minder explosieve kracht. Deze twee vormen van explosieve verbranding worden in dit hoofdstuk toegelicht en onderling en met de vaker optredende flashover vergeleken.

De termen explosie en explosieve verbranding:

In de volksmond wordt het woord explosie voor veel verschijnselen gebruikt; meestal als het verschijnsel een kort hard geluidseffect oplevert.

Wij gebruiken hier de term explosieve verbranding als de verbranding een waarneembaar drukeffect heeft in de vorm van geluid, plotseling expanderende/uitstromende gassen of schade aan objecten. De term explosie gebruiken we hier voor de snelle variant van de explosieve verbranding van gassen, met als indicatie een verbranding binnen 1 seconde.

Als de verbranding zo langzaam gaat dat het geen hoorbare of zichtbare expansie van gassen veroorzaakt, spreken we liever van (snelle) 'verbranding'.

3.2 Explosieve verbranding van gassen

Explosieve verbranding van gassen¹⁷ is alleen mogelijk in een voorgemengd mengsel met brandstof en zuurstof in een ontsteekbare verhouding, dat wil zeggen in concentraties binnen de explosiegrenzen. Verbranding van een niet voorgemengd mengsel in een diffuse vlam, waarbij de zuurstof vanuit de buitenkant van de vlam in het vlamvolume moet instromen, verloopt altijd veel langzamer en zonder explosieverschijnselen.

De destructieve kracht van de explosieve verbranding wordt vooral veroorzaakt door de snelle verwarming en daardoor snelle druktoename of expansie van het gasmengsel. De drukopbouw die hierdoor in theorie kan ontstaan in een volledig met een stoichiometrisch mengsel gevulde ruimte zonder openingen is voor veel stoffen 7 à 8 bar. Dit volgt uit een vlamtemperatuur die 7 à 8x zo hoog is als de omgevingstemperatuur (van 300 K naar 2.100 K à 2.400 K) als we uitgaan van de ideale gaswet¹⁸. Als de ruimte openingen heeft, is de druktoename minder en kan het volume toenemen, wat zichtbaar is door de plotselinge uitstroom van gassen door de openingen. De kracht van de explosieve verbranding kan naast de thermische expansie ook een bijdrage hebben van de chemische expansie, al is die beperkt. Als links en rechts in een reactievergelijking evenveel mol gasvormige stof aanwezig is¹⁹, levert de reactie geen chemische expansie.

¹⁷ Explosieve verbranding van vaste stoffen of vloeibare stoffen verloopt anders dan in deze paragraaf is aangegeven. Dat betreft vooral explosies door munitie of vuurwerk, of door stofwolken.

¹⁸ Bij constant volume geldt: p/T is constant.

¹⁹ Het volume van ideale gassen is evenredig met het aantal moleculen en dus met het aantal mol stof.

Als na de reactie meer gasvormige molen aanwezig zijn, dus als grote moleculen naar kleinere worden omgezet, ontstaat deze extra expansie wel. Deze expansie is echter maximaal een tiental²⁰ procenten.

De maximale expansie die in de praktijk optreedt door de combinatie van thermische en chemische expansie is ongeveer een factor 10, incidenteel nog iets hoger.

Ook de vorm van de ruimte waarin de expansie optreedt heeft invloed op de lokaal in de ruimte optredende drukken, door reflecties van de drukgolf tegen de wanden. [BABR2003] geeft aan dat drukken tot 20 à 30 bar gemeten zijn.

De hierboven besproken explosieverschijnselen planten zich voort door een ontsteekbaar mengsel door warmtetransport in de voortplantingsrichting. Zolang de voortplantingssnelheid onder de geluidssnelheid blijft, noemen we deze explosies 'deflagraties'. Als de voortplantingssnelheid de geluidssnelheid heeft bereikt, kan de explosie zich daarna voortplanten door de energie in de drukgolf in plaats van door het warmtetransport in de voortplantingsrichting. De voortplanting van de explosie kan dan verder versnellen. We spreken dan van een 'detonatie'. De druktoename kan dan in incidentele gevallen zelfs enkele honderden bars zijn.

Het is de auteurs niet bekend of rookgasexplosies in de praktijk ooit, en zo ja onder welke omstandigheden, de vorm van een detonatie kunnen aannemen.

Als slechts een deel van de ruimte met een ontsteekbaar mengsel is gevuld, is de explosieve kracht daarvan hetzelfde deel van de kracht die zou zijn veroorzaakt in de volledige met hetzelfde ontsteekbaar mengsel gevulde ruimte. Dit gebeurt vaak bij rookgasexplosies. Als het overige deel van de ruimte deels is gevuld met een te rijk mengsel en deels met een te arm mengsel dan zal de explosieve verbranding ook menging van het arme en rijke mengsel kunnen veroorzaken, waardoor de explosie in kracht toeneemt. Ook dat gebeurt vaak bij rookgasexplosies.

Ook een mengverhouding in de buurt van de ontstekingsgrenzen (dus ver van de stoichiometrische verhouding) leidt tot minder explosieve kracht, omdat de vlamtemperatuur daarbij lager is. De tabel in figuur 3 illustreert dat.

Methane in air (vol%)	Pressure rise (atm)
5.0	0.06
5.5	0.7
6.0	3.9
8.0	6.5
10.0	7.5

figuur 3: Druktoename bij explosieve verbranding van methaan bij verschillende volume-percentages binnen en net buiten de ontstekingsgrenzen. [BABR2003, blz.106]

²⁰ Kijkend naar de gangbare verbrandingsreacties lijkt het wellicht alsof dit enkele tientallen procenten kan zijn, maar dan vergeten we de in lucht aanwezige overmaat aan stikstof, die niet aan de reactie meedoet, maar wel de relatieve toename in molen beperkt.

Ter Illustratie: Het aansteken van het (ongeveer) stoichiometrisch mengsel dat uit de openingen van de brander van een gasfornuis stroomt, levert een verwaarloosbare explosie op, omdat het mengsel maar een heel klein deel inneemt van het volume van de keuken.

Zelfs bij vertraagd ontsteken blijft de druk nog beperkt omdat het uitgestroomde gas verdunt en alleen vlak bij de brander nog een concentratie boven de LFL heeft. Alleen als het gas lange tijd kan uitstromen voordat er een vonk of lucifervlam bij komt, kan de hele keuken gevuld zijn met een mengsel binnen de explosiegrenzen en kan een krachtige explosie ontstaan.

De kracht van de explosie bepaalt samen met de grootte van de openingen in de omhulling van de ruimte de overdruk en de potentiële schade. In de praktijk hebben de meeste ruimten wel enkele openingen, of ontstaan er openingen na de eerste drukopbouw, bijvoorbeeld door het bezwijken van ruiten (bij ca. 20 tot 70 mbar [BENG2001]). De overdruk is hierdoor meestal veel lager dan volgt uit de expansieverhouding van het gasmengsel.

Voor heftige explosieverschijnselen bij brand moeten we dus op zoek naar de condities waaronder een voorgemengd en ontsteekbaar mengsel in een groot deel van een ruimte ontstaat.

3.3 Flashover

Een flash-over is een plotselinge versnelling van de geleidelijke groei van een brand. Vóór de flashover is de brand nog lokaal, dat wil zeggen omvat maar een klein deel van de ruimte, zoals één of enkele brandende voorwerpen. De brand is dan nog brandstof-beheerst, wat wil zeggen dat er voldoende zuurstof is en dat de groei door de aard en plaats van de aanwezige brandstof wordt bepaald. Naarmate de rooklaag boven in de ruimte heter wordt, straalt deze steeds sterker op de andere voorwerpen in de ruimte. Die voorwerpen starten hierdoor met de productie van pyrolysegassen. Bij de start van de flashover is de straling²¹ vanuit de rooklaag boven in de ruimte zo hoog geworden dat de brandbare voorwerpen in de gehele ruimte, ook onder de rooklaag, in korte tijd ontsteken. Dat gebeurt bij een rooklaagtemperatuur van ca. 500 tot 600 °C en een straling van ca. 20 kW/m². Het vermogen en de temperatuur van de brand nemen hierbij plots sterk toe. Na de flashover heerst in (bijna) de gehele ruimte een volledig ontwikkelde brand, met een temperatuur van 800 °C tot 1.200 °C. Een flashover vormt dus de overgang tussen de groeifase en de brandfase.

Door de plotselinge versnelling van de verbranding en het daarbij horende zuurstofverbruik leidt een flashover vaak tot de overgang van een brandstof-beheerste naar een zuurstof-beheerste brand.

Voorafgaand aan de flashover is de straling vanuit de rooklaag en daardoor de concentratie aan pyrolysegassen boven de brandbare materialen nog onvoldoende om deze allemaal tot ontbranding te brengen. Bij de flashover ligt de verhouding pyrolysegassen/zuurstof dichtbij de brandbare oppervlakken wel binnen de ontstekingsgrenzen; in de rest van de ruimte is er geen ontsteekbaar mengsel. De vlammen die in de rest van de ruimte ontstaan zijn dus diffuse vlammen.

Deze vlammen planten zich maar langzaam voort. Een flashover is hierdoor geen sterk explosief proces, maar een versnelde brandgroei in circa 10 tot 30 seconden (indicatieve waarde) van lokale brand naar volledig ontwikkelde brand.

²¹ Naast de straling op alle voorwerpen in de ruimte levert ook de convectieve warmteoverdracht naar voorwerpen in de rooklaag een bijdrage aan de productie van pyrolysegassen en de ontsteking. Aangezien de meeste voorwerpen zich op de grond en dus onder de rooklaag bevinden, is de straling vanuit de rooklaag meestal dominant voor de opwarming.

Voor het verschijnsel flashover worden ook andere termen gebruikt, zoals flameover en rollover. En onder flashover wordt soms een wat afwijkend verschijnsel in de overgang van groeifase naar brandfase verstaan. Wij gebruiken hier voor de flashover de definitie van NFPA 921:

Flashover: “De overgangsfase in de ontwikkeling van een compartimentsbrand waarin aan warmtestraling blootgestelde oppervlakken vrijwel tegelijkertijd hun ontstekings-temperatuur bereiken en de brand zich snel verspreidt door de ruimte, leidend tot een brand in de gehele ruimte”.

Het hier beschreven verschijnsel flashover treedt op in kleine ruimten, zoals kamers in woningen. In grotere ruimten vindt de overgang naar pyrolyse en ontsteking niet overal tegelijk plaats, omdat de temperatuur in de rooklaag en daardoor de straling vanuit de rooklaag sterk kan variëren over de ruimte. In zeer grote ruimten kan een op een flashover lijkend verschijnsel zich geleidelijk voortplanten in de ruimte; de term flashover is daarvoor echter minder gebruikelijk.

Als een ruimte grote openingen naar buiten heeft, of als die vóór flashover ontstaan door breken van de ruiten, dan kan de rooklaag zo dun blijven of zo worden afgekoeld dat flashover helemaal niet plaatsvindt. De brand blijft dan brandstofbeheerst ook al neemt hij de hele ruimte in. Een flashover vindt ook niet plaats als de brand de meeste zuurstof heeft verbruikt vóórdat de rooklaag de voor flashover benodigde temperatuur bereikt en er weinig verse lucht binnen stroomt. De brand wordt dan sterk onderdrukt (sterk ventilatie-beheerst) of zelfs gesmoord. Wanneer daarna plotseling lucht instroomt, bijvoorbeeld door het bezwijken van beglazing of het openen van een deur, kan een backdraft ontstaan, waarover meer in de volgende paragraaf.

3.4 Backdraft

Een backdraft treedt op in een ruimte als er voldoende brandbare gassen zijn en de temperatuur hoog genoeg is, maar er te weinig zuurstof aanwezig is voor verbranding. De concentratie aan brandbare gassen is dan dus hoger dan de UFL. Als dan lokaal zuurstof wordt toegevoegd, meestal in de vorm van koude verse lucht onder in de ruimte door het openen van een deur of het wegvallen van een raam, dan ontstaat er in het overgangsgebied tussen het zuurstofarme en het zuurstofrijke gebied een ontsteekbaar mengsel. Als dit mengsel een ontstekingsbron tegenkomt, verbrandt het explosief (tijdsindicatie: binnen enkele tot een tiental seconden).

Voorafgaand aan een backdraft is er onvoldoende zuurstof voor substantiële verbranding, de brand is dus sterk ventilatie-beheerst. Deze situatie ontstaat doordat een brand de zuurstof in de ruimte (grotendeels) heeft opgebruikt en er onvoldoende openingen zijn om zuurstof aan te voeren. Als dan een deur wordt geopend of een ruit bezwijkt, stroomt lucht met zuurstof de ruimte binnen. De koude lucht is zwaarder dan de gassen in de ruimte, zodat de koude lucht zich over de vloer verspreidt. Tussen de hete rook met overmaat brandstof en de koude verse lucht met overmaat zuurstof ontstaat een laag waarin de mengverhouding tussen de explosiegrenzen ligt. Dit mengsel wordt ontstoken als het in contact komt met de lokaal nog aanwezige brand. Of dit al snel gebeurt hangt dus af van de plaats van de brand ten opzichte van de voorgesmeerde laag. Als dit snel gebeurt, dan is het volume van het ontsteekbare mengsel nog beperkt en is de explosieve kracht van de verbranding nog klein. Naarmate het langer duurt voordat de voorgesmeerde laag in contact komt met een ontstekingsbron, kan het volume aan ontsteekbaar mengsel en dus de kracht van de explosie groter zijn. Dit laatste zal vooral kunnen optreden als er alleen ontstekingsbronnen hoog in de ruimte aanwezig zijn.

De explosieve verbranding zorgt voor verdere vermenging van de zuurstofarme bovenlaag en zuurstofrijke onderlaag, zodat in die gebieden ook verbranding volgt, meestal in de vorm van diffuse vlammen waarin verbranding relatief langzaam verloopt, met weinig explosieve kracht. De backdraft is het korte stadium van explosieve verbranding, meestal gedurende één of enkele seconden. Als de ontsteekbare laag dik is en dus het explosieve kracht groot, dan zetten de gassen zo snel uit dat de vlammen als een vuurbal met hoge snelheid uit de openingen komen. Merk op dat de backdraft zijn kracht ontleent aan de uitgestelde ontsteking. Als het ontsteekbare mengsel al snel in contact komt met een ontstekingsbron, nog voordat het in volume heeft kunnen aangroeien, dan is de kracht van de explosieve verbranding gering. Als de rookgassen in de ruimte veel heter zijn dan de zelfontbrandingstemperatuur, zodat het met lucht opgemengde mengsel ook nog heter is, treedt direct ontsteking op en kan er geen volume met ontsteekbare gassen worden opgebouwd. Bij plotselinge zuurstoftoetreding in een zeer heet zuurstofarm mengsel ontstaat dus geen explosie, maar een snelle verbranding.

Ook voor het begrip backdraft worden internationaal veel verschillende definities gebruikt. We hanteren hier een combinatie van een ISO- en een NFPA-definitie²²:

Backdraft: "Snelle vlamme verbranding veroorzaakt door het plotseling instromen van lucht in een ruimte met zuurstofarme producten van onvolledige verbranding."

In aanvulling op de definitie is een belangrijke eigenschap van een backdraft dat de ingestroomde zuurstof en de rookgassen voorafgaand aan ontsteking lokaal een voorgemengd mengsel vormen.

Vergelijken we de backdraft met de flashover, dan is het belangrijkste verschil dat er vlak voor een flashover onvoldoende brandstof in gasvorm aanwezig is (vanwege een 'tekort' aan warmte om pyrolysegassen te produceren) en vlak voor een backdraft onvoldoende zuurstof. Tijdens de flashover ontstaan vrijwel alleen diffuse vlammen, tijdens een backdraft ontstaan voorgemengde vlammen in de ontsteekbare tussenlaag en diffuse vlammen daaromheen.

3.5 Rookgasexplosie

Een rookgasexplosie treedt op als er in de ruimte voldoende brandbare gassen en zuurstof zijn voor verbranding, maar een ontstekingsbron ontbreekt en de temperatuur te laag is voor zelfontbranding. Bij een plotselinge ontsteking, bijvoorbeeld door een vonk of een brandend deeltje, ontstaat dan een explosieve verbranding (tijdsindicatie: binnen enkele seconden) in het gehele volume waarin het ontsteekbare mengsel aanwezig is.

Voor het verschijnsel rookgasexplosie worden internationaal meerdere termen gebruikt, zoals 'smoke explosion', 'fire gas explosion', en 'fire gas ignition', al kan de inhoud van de begrippen verschillen. Er is geen internationaal geaccepteerde definitie voor rookgasexplosie, maar de meeste bevatten de elementen 'rookgassen lekkend naar aangrenzende ruimte', 'vorming ontsteekbaar mengsel in aangrenzende ruimte', en 'bij ontsteking een grote overdruk veroorzakend'.

²² De definitie van een backdraft volgens NFPA 921: "A deflagration resulting from the sudden introduction of air into a confined space containing oxygen-deficient products of incomplete combustion."
De definitie volgens ISO 13943: "Rapid flaming combustion caused by the sudden introduction of air into a confined oxygen-deficient space that contains hot products of incomplete combustion. In some cases, these conditions can result in an explosion."

Wij gebruiken hier voor de rookgasexplosie daarom de definitie:

Rookgasexplosie: “Zeer snelle verbranding van een voorgemengd mengsel van zuurstof en rookgassen afkomstig van brand in een andere ruimte, met een sterk drukeffect en veroorzaakt door de introductie van een ontstekingsbron in het mengsel”.

Voorafgaand aan een rookgasexplosie is er een brandbaar mengsel. De brandbare gassen daarin bestaan uit pyrolysegassen en/of de reactieproducten van onvolledige verbranding, zoals koolmonoxide. Een brandbaar mengsel van enig volume kan zich vrijwel alleen buiten de brandruimte vormen. In de brandruimte ontsteekt dit mengsel bijna altijd direct nadat het mengsel ontstaat (dat wil zeggen nadat een mengverhouding ontstaat tussen de LFL en UFL), zodat het volume met brandbaar mengsel beperkt blijft en een explosie weinig kracht heeft.



figuur 4: Een rookgasexplosie in een ruimte grenzend aan de brandruimte. Onvolledig verbrande ontledingsgassen uit de brandruimte zijn naar de aangrenzende ruimte gelekt en ontsteken als een brandend deeltje of een vlam door de lekopening komt. Bron: [BENG2001, blz.151]

De brandbare gassen waarmee een ontsteekbaar mengsel ontstaat in een aan de brandruimte grenzende ruimte kunnen zowel afkomstig zijn uit de brandruimte zelf als van daar buiten:

- Brandbare gassen ontstaan in de brandruimte: Veel volledig ontwikkelde branden raken na enige tijd ventilatie-beheerst, zodat de brandruimte ook onverbrande brandbare gassen bevat. Deze gassen, die een brandstofconcentratie hebben boven de UFL (zo niet, dan zouden ze al verbrand zijn), kunnen via openingen in de scheidingen naar aangrenzende ruimten stromen en zich daar vermengen met de koude zuurstofrijke lucht.
- Brandbare gassen ontstaan buiten de brandruimte: Een brand verhit de materialen in wanden en plafonds/daken rondom en de materialen die hiertegen zijn bevestigd of geplaatst en brengt deze tot pyrolyse. Dit gaat al snel bij de materialen aan de brandzijde van de scheidingen, maar naar mate de warmte verder doordringt ook bij de materialen aan de ‘koude’ kant van de scheidingen. De pyrolysegassen die vrij komen aan de kant van de brandruimte zullen meestal direct verbranden (als er zuurstof is). De pyrolysegassen die op den duur ontstaan aan de andere zijde van de constructies komen daar vrij en vermengen zich met koude zuurstofrijke lucht.

De brandbare gassen kunnen in de aangrenzende ruimte het volgende veroorzaken:

- Snelle ontsteking, zonder rookgasexplosie: Na voldoende opmenging om de brandstofconcentratie tussen de ontstekingsgrenzen te brengen, kan het mengsel direct ontsteken door zelfontbranding (als de temperatuur daar nog hoog genoeg voor is) of door meegevoerde hete deeltjes ('vliegvluur'). In de aangrenzende ruimte resteren dan de verbrandingsgassen, maar geen brandbare gassen, zodat zich geen brandbaar mengsel opbouwt in de aangrenzende ruimte en geen rookgasexplosie mogelijk is.
- Uitgestelde ontsteking, rookgasexplosie mogelijk: De opmenging met zuurstofrijke omgevingslucht leidt lokaal eerst tot een ontsteekbaar mengsel en na verdere menging tot een brandstofconcentratie onder de LFL-waarde. Het tijdelijk ontsteekbaar mengsel ontsteekt niet door een te lage temperatuur voor zelfontbranding en de afwezigheid van meegevoerde hete deeltjes ('vliegvluur'). Als de toestroom van rookgassen (brandstofconcentratie boven UFL) daarna aanhoudt, komt de brandstofconcentratie in de aangrenzende ruimte of in een warme rooklaag aan het plafond van die ruimte op den duur weer boven de LFL-waarde. Daarna zijn de condities aanwezig voor een rookgasexplosie.

Rookgassen kunnen wel explosief ontbranden door ontsteking in de brandruimte zelf, maar dat gebeurt zeer zelden en het scenario lijkt op dat van een backdraft. Het betreft het volgende scenario: Een ruimte heeft slechts een kleine opening naar buiten. De brand in die ruimte heeft de zuurstof grotendeels verbruikt. Als dan plotseling zuurstof toestroomt, kan een backdraft ontstaan, maar als geen zuurstof toestroomt en de brand nog verder gesmoord raakt, dan koelt de brandruimte op den duur af. Door dit afkoelen en daardoor krimpen van het gasmengsel wordt verse lucht naar binnen gezogen en er ontstaat een ontsteekbaar mengsel dat zich over een groot deel van de ruimte kan uitbreiden. Als de vrijwel gesmoorde brand na enige tijd toch het mengsel ontsteekt, dan volgt een rookgasexplosie. Deze rookgasexplosie heeft ook veel kenmerken van een backdraft; het is eigenlijk een grensgeval tussen de twee verschijnselen.

Voor een rookgasexplosie geldt, net als voor de backdraft, dat hij zijn kracht ontleent aan de uitgestelde ontsteking. Bij snel contact met een ontstekingsbron, voordat zich een groot volume met ontsteekbaar mengsel heeft kunnen opbouwen, is de kracht van zowel een rookgasexplosie als een backdraft gering.

Zoals in de introductie vermeld, is de kracht van de rookgasexplosie evenredig met het deel van de ruimte dat met een ontsteekbaar mengsel is gevuld. Daarnaast is de afstand tot de stoichiometrische mengverhouding van invloed op de explosiekracht.

3.6 Vergelijking tussen flashover, backdraft en rookgasexplosie

De rookgasexplosie, de backdraft en de flashover hebben duidelijk verschillende oorzaken. Bij elk van de drie verschijnselen ontbreekt vooraf één van de componenten van de branddriehoek:

- vlak voor een rookgasexplosie is er onvoldoende warmte/geen ontstekingsbron;
- vlak voor een backdraft is er onvoldoende zuurstof;
- vlak voor een flashover is er onvoldoende brandstof in gasvorm.



De explosieve kracht van deze verschijnselen verschilt sterk, wat ook zichtbaar is in de wijze van verbranding:

- In een rookgasexplosie ontstaan in het hele ontsteekbare volume voorgemengde vlammen. Dit levert de meest explosieve kracht als een groot deel van het ruimtevolumen een ontsteekbaar mengsel bevat. Als de ruimte (bijna) geheel omsloten is, ontstaat een extra grote drukopbouw.
- In een backdraft ontstaan voorgemengde vlammen in de tussenlaag met het ontsteekbare mengsel en diffuse vlammen daaromheen. Dit levert ook een explosieve kracht, maar minder sterk dan de rookgasexplosie, omdat het volumedeel met een direct ontsteekbaar mengsel bij een backdraft meestal kleiner is en een beperkt deel van de ruimte beslaat. De drukopbouw is daardoor vaak beperkter.
- In een flashover ontstaan vrijwel alleen diffuse vlammen; de versnelde verbranding is niet explosief.

Soms kan een verschijnsel op meer dan een van de genoemde verschijnselen lijken. Het voorbeeld van een grensgeval tussen een backdraft en een rookgasexplosie is al gegeven in de vorige paragraaf: een sterk gesmoorde brand die door afkoeling lucht aanzuigt en het mengsel pas ontsteekt wanneer een groot deel van de ruimte ermee gevuld is. Met als resultaat een rookgasexplosie.

Een rookgasexplosie en een flashover zullen niet snel worden verward, maar een snelle verbranding kan soms zowel op een backdraft als een flashover lijken. Het voorbeeld daarvan is een ventilatie-beheerste brand waarbij een deur wordt geopend of een raam wegvalt en het daarna gevormde ontsteekbare mengsel al snel wordt ontstoken. De totale energie in het ontsteekbare mengsel is dan nog te klein om brandbare gassen uit de openingen te stuwen (een indicatie voor een backdraft). Het verschijnsel lijkt dan op een verlate flashover, maar ontstaat op een andere wijze.

4. Verspreiding van rookgassen

4.1 Introductie

Rookgasexplosies ontstaan niet vaak, maar als ze ontstaan is dat bijna altijd door de opbouw van een grote hoeveelheid ontsteekbaar mengsel in een andere ruimte dan de brandruimte. In dit hoofdstuk beantwoorden we de vraag hoe die gassen daar in grote hoeveelheden terecht kunnen komen.

In de volgende paragrafen is aangegeven hoe drukverschillen in en rond gebouwen kunnen ontstaan. Deze drukverschillen veroorzaken stromingen door openingen. Ook de resulterende volumedebieten worden hierna behandeld.

4.2 Drukverschillen

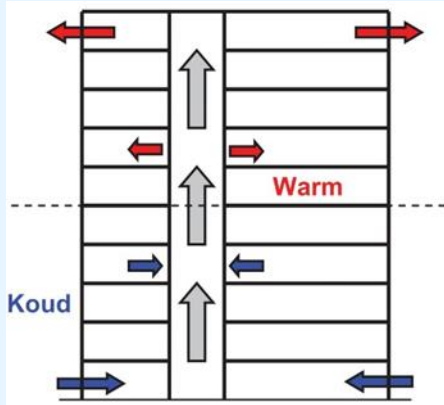
Gassen verplaatsen zich alleen onder invloed van een drukverschil. Voor inzicht in de rookverspreiding in gebouwen is dus inzicht nodig in de mogelijke oorzaken van drukverschillen. Deze oorzaken zijn als volgt in te delen:

- Temperatuurverschil tussen rook en omgevingslucht:
 - Schoorsteeneffect
 - Stratificatie
- Winddruk
- Expansie van gassen door opwarming
- Werking van ventilatiesystemen

4.2.1 Schoorsteeneffect

De luchtdruk in de atmosfeer neemt af in de hoogte. Die afname is vrijwel lineair over hoogteverschillen die in gebouwen kunnen bestaan. Als we denken dat de luchtdruk veroorzaakt wordt door het gewicht van de gehele luchtkolom die er in de aardse atmosfeer bovenop staat, is het logisch dat de druk hoger is als de temperatuur van de luchtkolom erboven lager is. De dichtheid van koude lucht is namelijk groter dan van warme lucht. De drukwijziging in de hoogterichting is daardoor ook groter als de temperatuur lager is.

Als twee kolommen lucht, bijvoorbeeld de buitenlucht en een schacht, een verschillende temperatuur hebben en boven en onder met elkaar zijn verbonden, dan ontstaat door het drukverschil aan de bovenzijde van de kolommen een stroming van de warme naar de koude lucht, en aan de onderzijde een stroming van de koude naar de warme lucht, zoals geïllustreerd in figuur 5. Dit effect treedt ook op in een schoorsteen, vandaar de benaming.



figuur 6: De luchtstromingen in een gebouw die ontstaan door het schoorsteeneffect bij een buiten-temperatuur die lager is dan de binnentemperatuur. De binnen- en buitendruk zijn hier gelijk op halve hoogte (stippellijn). Bron: [TROM2014]

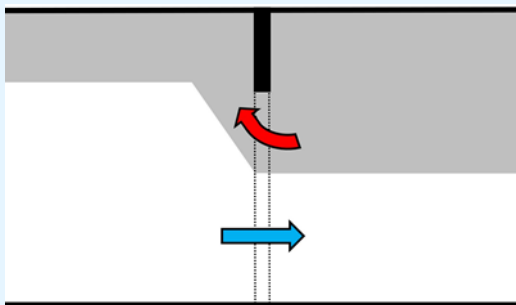
Het opgebouwde drukverschil Δp is evenredig met het hoogteverschil en de dichtheid:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h, \text{ met: } \Delta p = \text{drukverschil in Pa; } \rho = \text{dichtheid in kg/m}^3, g = \text{zwaartekracht-} \\ \text{versnelling (9,8 m/s}^2\text{), } \Delta h = \text{hoogteverschil in m, } T = \text{temperatuur in K}$$

Bijvoorbeeld: Bij twee 100 meter hoge luchtkolommen, een temperatuurverschil van 30°C en gelijke druk op halve hoogte, levert dit een drukverschil van +50 Pa aan de bovenzijde en van -50 Pa aan de onderzijde. Bij 300°C het tienvoudige!

4.2.2 Stratificatie

Bij twee aangrenzende ruimten met verschillende temperatuur en een hoge opening daartussen, zoals een open deur, ontstaan twee stromingen door de opening: een hete stroming bovenlangs van de warme naar de koude kant en een koude stroming onderlangs in de andere richting. Feitelijk is dit het schoorsteeneffect, alleen is het resultaat daarvan kenmerkend voor een opening waarover het drukverschil sterk verloopt: bovenin de opening een drukafname en dus een stromingsrichting, van de warme naar de koude kant, onderin een drukafname in de andere richting, met twee lagen (stratificatie) in de opening.



figuur 7: Stromingen door een deuropening bij verschillende temperaturen en rooklaagvorming.

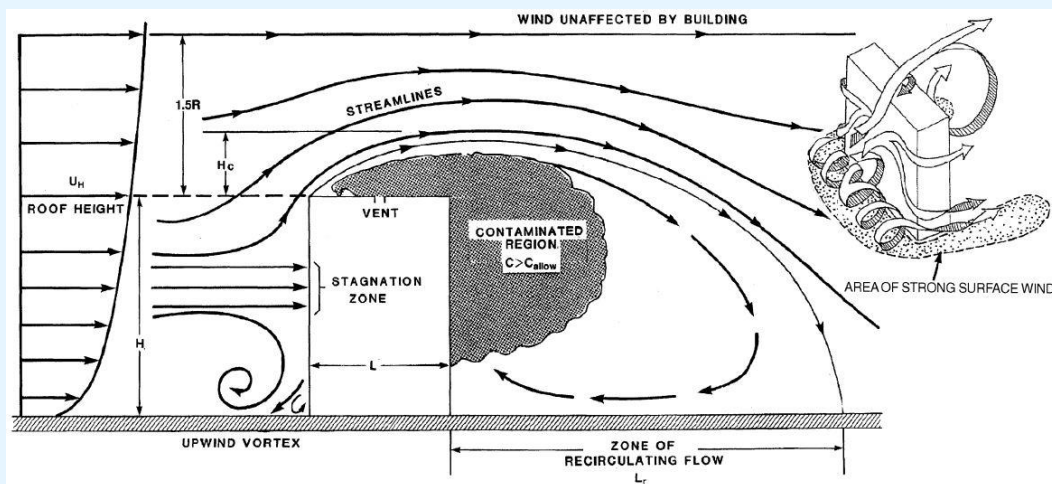
4.2.3 Winddruk

De wind op een gebouw veroorzaakt een overdruk aan de kant waar de wind vandaan komt (aanwindse kant) en een onderdruk aan de achterzijde, bovenkant en zijkanten van het gebouw. Daar waar de wind recht tot stilstand komt tegen de gevel is de druk maximaal (gelijk aan $\frac{1}{2} \rho v^2$ in Pa), op andere plaatsen is deze lager of zelfs negatief.

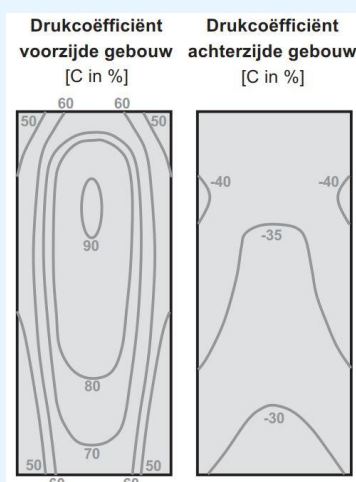
De druk op elk punt van een gevel wordt daarom meestal uitgedrukt met:

$$p_{\text{wind}} \approx C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2, \text{ met: } p_{\text{wind}} = \text{winddruk in Pa; } \rho = \text{dichtheid in kg/m}^3, v = \text{windsnelheid in m/s, } C = \text{drukcoëfficiënt in [-]}$$

Figuur 8a en 8b: Verdeling van winddruk over de gebouwgevels



figuur 8a: Verloop van de stromingslijnen rond een gebouw



figuur 8b: de druk coëfficiënt C in % op de aanwindse (links) en afwindse gevel van het gebouw (rechts).
Bron: [ASHREA2005]

De factor C varieert over de gevels tussen -0,4 en +1, zoals zichtbaar in figuur 8b). De C aan de aanwindse kant is positief (winddruk), aan de andere kanten negatief (windtrek).

4.2.4 Expansie

Lucht en rookgassen gedragen zich ongeveer als ideale gassen. Daarvoor geldt de ideale gaswet:

$p \cdot V / T$ is constant, met: p = druk in Pa; V = volume in m³, T = temperatuur in Kelvin

Hieruit volgt dat het volume van een gas bijvoorbeeld verdubbelt bij verdubbeling van (absolute) temperatuur en gelijkblijvende druk. Als de temperatuur in een brandruimte in korte tijd toeneemt van 300 K (27°C) naar 600 K, verdubbelt het volume bij gelijkblijvende druk. Als de wanden geen openingen bevatten blijft het beschikbare gasvolume gelijk en verdubbelt de druk, tot 2 bar (200.000 Pa). Het is duidelijk dat snelle expansie van de lucht door opwarming een grote druk kan opleveren, waardoor openingen worden geforceerd in de omhulling en de rookgassen met grote snelheid door de openingen ontsnappen.

Bij een rookgasexplosie neemt de temperatuur in één of enkele seconden toe van circa 300 K tot de temperatuur van een voorgemengde vlam, maximaal ca. 2.400 K, dus maximaal tot het achtvoud. Dit leidt dus tot een 8-voudig volume of, bij een dichte ruimte, tot in theorie 8 bar. In praktijk zullen dan altijd openingen worden geforceerd.

4.2.5 Ventilatiesystemen

Ventilatiesystemen, zowel de 'normale' luchtverversing als stuw- en overdrukventilatie, leggen drukverschillen en stromingen op in een gebouw. Deze drukken zijn klein ten opzichte van de drukken die worden veroorzaakt door het schoorsteeneffect, de winddruk en de expansie, maar kunnen nog invloed hebben bij aanvang van de brand.

We merken op dat brand- en rookcompartimentering in gebouwen meestal nog wordt uitgevoerd met brandwerende kleppen en opschuimende roosters, die sluiten bij een verhoogde temperatuur. Totdat de verhoogde temperatuur bereikt wordt, vormt het ventilatiesysteem een open verbinding tussen alle ruimten. Alleen de door het ventilatiesysteem opgelegde druk beperkt dan de rookverspreiding door het systeem. Bij het wegvallen van de druk (uitschakelen van de ventilatie) is vrije rookverspreiding mogelijk totdat de verhoogde temperatuur kleppen en roosters sluit.

4.3 Openingen in scheidingen

Drukverschillen over scheidingen leiden alleen tot stromingen als er ook openingen zijn. Die openingen zijn er bijna altijd in normale bouw, zowel in de vorm van gaten als van kieren/naden. Daarnaast veroorzaakt een brand extra openingen door vervorming bij verhitting van de constructie. Zeker in scheidingen zonder speciale status, maar ook in brandwerende en rookwerende scheidingen. Het betreft dan vooral de aansluitingen tussen scheidingsconstructies, de doorvoeringen door scheidingen en het wegvallen van delen van de scheidingen zoals beglazing.

4.4 Stromingen door openingen

De hoeveelheid lucht of rook die door een opening in een scheiding stroomt is afhankelijk van het drukverschil, de grootte van de opening en enigszins van de vorm van de opening. Als vuistregel geldt het volgende verband voor grote openingen (kleinste afmeting meer dan enkele millimeters):

$V \approx 0,8 \cdot A \cdot (\Delta p)^{0,5}$, met: V = volumedebiet in m³/s; A = oppervlakte opening in m²; Δp = drukverschil in Pa

Voor kleine openingen, bijvoorbeeld kieren, is de exponent van Δp groter, namelijk 0,7 tot 0,9 (in plaats van 0,5).

Een bewegende luchtstroming heeft een lagere druk dan stilstaande lucht. Dit is een bekende natuurkundige wet (van Bernoulli). De drukverlaging is evenredig met het kwadraat van de snelheid. Een windstroming parallel langs de zijkant van een gebouw of over het dak zal daardoor bijvoorbeeld een onderdruk veroorzaken ten opzichte van de omgeving en dus lucht aanzuigen. Hoe sneller de stroming, hoe groter de onderdruk.

Een stroming uit een opening in een scheiding zuigt hierdoor lucht aan uit de omgeving. Passen we dit toe op een stroom rookgassen die uitstroomt in een rookvrije ruimte met lagere temperatuur, dan worden de rookgassen bij uitstromen snel verdund en gekoeld door opmenging van de omringende lucht. Dit verdunnen gaat sneller naarmate de snelheid door de opening groter is en de opening meer spleetvormig is.

5. De rol van gebouw, bouwmaterialen en inventaris

In dit hoofdstuk bekijken we de invloed van het gebouw, de bouwmaterialen en de inventaris op de productie, op de plaats van verbranding en op de verspreiding van pyrolysegassen.

5.1 Productie van brandbare gassen

Veel vaste stoffen kunnen bij verhoogde temperatuur ontleden in brandbare gassen. Dat geldt zowel voor de bouwmaterialen als voor de inventaris²³. Brandbare gassen kunnen dus zowel door bouwmaterialen als door inventaris geproduceerd worden. De belangrijke vragen zijn daarbij: waar worden deze gassen geproduceerd, in welk stadium van de brand en in welke hoeveelheden?

In eerste instantie produceren brandbare materialen in de buurt van de brand de meeste pyrolysegassen. Naar mate brandbare materialen aan hogere temperaturen boven de pyrolysetemperatuur wordt blootgesteld, neemt de productie van pyrolysegassen eerst toe, om pas af te nemen wanneer de stoffen grotendeels zijn ontleed. Rond een lokale brand gebeurt die opwarming vooral door convectie en straling van het brandende object. De opgewarmde materialen zijn dan vooral inventarismaterialen in de ruimte, tenzij de brand is ontstaan bij een wand.

Na vorming van een hete rooklaag aan het plafond van de ruimte worden het plafond en de bovenzijden van de wanden via convectie en straling verwarmd door de rooklaag en ze worden door dezelfde rooklaag gedeeltelijk afgeschermd voor straling vanuit de primaire brandhaard. Het zijn daar vooral bouw- en afwerkings-materialen die opgewarmd worden. De materialen onder de hete rooklaag, de inventaris en de bouwmaterialen, worden dan alleen door straling verwarmd; nu vanuit de primaire brandhaard en de rooklaag. Aangezien in de praktijk het totale brandbare oppervlak van de bouwmaterialen in een ruimte kleiner is dan het brandbare oppervlak van de inventaris en de inventaris meestal brandbaarder is, komen de pyrolysegassen vooral van de inventaris.

Merk op dat de pyrolysegassen meestal direct verbranden op het moment dat ze in hoge concentraties vrijkomen in de ruimte, omdat de temperatuur daarvoor hoog genoeg is (zelfontbranding) of omdat er ontstekingsbronnen als gloeiende en vlammend brandende deeltjes rondvliegen. In dat geval bouwt zich dus geen ontsteekbaar mengsel op in de ruimte.

In een ruimte met onbrandbare wanden en plafonds zijn de pyrolysegassen vrijwel²⁴ alleen afkomstig van de inventaris. In ruimten met brandbare (delen in) wanden en plafonds kan een groot deel afkomstig zijn uit die scheidingen. Hoeveel pyrolysegassen uit inventaris en bouwproducten vrij komen, hangt van de afzonderlijke materialen af en bij een samengesteld product ook sterk van de opbouw.

De productie van pyrolysegassen kan voor een materiaaloppervlak worden berekend op basis van de warmte-indringing in het oppervlak, de thermische eigenschappen van de materialen en de pyrolyse-energie (energie nodig voor ontleding). Een verdere uitwerking van zo'n berekening ligt buiten het kader van deze publicatie. Zie daarvoor bijvoorbeeld [SFPE2016].

Bij samengestelde producten is de berekening een stuk ingewikkelder. Het is bijvoorbeeld vaak niet te berekenen of de brandbare gassen de kern van het constructieonderdeel snel kunnen verlaten door een (enigszins) gasdichte toplaag.

²³ In dit rapport wordt de term inventaris gebruikt voor alles dat geen bouwproduct is.

²⁴ De meeste onbrandbare wanden en plafonds bevatten wel wat kleine brandbare componenten als wandcontactdozen, plafondarmaturen en kozijnen.

Daarnaast is mechanische deformatie, waarbij lagen van elkaar loslaten en naden of breuken in de toplaag het vrijkomen van brandbare gassen vergemakkelijken, vaak niet te berekenen. Natuurlijk kan het vrijkomen van pyrolysegassen uit een onderlaag worden bepaald door de toplaag afwezig te veronderstellen, maar dat levert meestal een grote overschatting van de hoeveelheid vrijkomende gassen op.

Alle pyrolysegassen van de inventaris komen (in eerste instantie) in de ruimte. De pyrolysegassen van een scheiding gaan grotendeels naar de brandruimte, maar kunnen ook gedeeltelijk rechtstreeks naar de aangrenzende ruimten.

Bij een in de dikte symmetrisch opgebouwde scheiding is het deel van de pyrolysegassen dat naar de brandruimte gaat, meestal (veel) groter dan naar de andere zijde, omdat de brandzijde van de scheiding het meest in temperatuur toeneemt en het oppervlak aan de brandzijde het meest wordt aangetast (toplaag beschadigd, naden geopend).

Bij een niet-symmetrische opbouw is het vrijkomen van pyrolysegassen moeilijker voorspelbaar. Het deel naar de koude zijde kan veel groter zijn als de brandbare materialen hoofdzakelijk aan de koude kant zitten en de scheiding een kleine warmteweerstand heeft. Een voorbeeld daarvan is een dak van stalen damwandprofiel met brandbare toplaag/toplagen. De pyrolysegassen komen geheel aan de buitenzijde vrij zolang het stalen dakvlak geen openingen heeft.

5.2 Verbranding van pyrolysegassen

Een deel van de pyrolysegassen verbrandt direct op de plaats waar ze vrijkomen in de vlammen van de lokale brand, een ander deel verspreidt zich in de ruimte waarin de brand heerst of stroomt naar andere ruimten of naar buiten. De niet direct verbrande pyrolysegassen ontsteken daarna pas waar de concentratie tussen de LFL en UFL ligt en een ontstekingsbron aanwezig is, bijvoorbeeld in de vorm van rondvliegende brandende of gloeiende deeltjes, of de zich uitbreidende vlammen van de lokale brand. Merk op dat de afstand tussen de LFL en de UFL sterk toeneemt bij sterk verhoogde temperatuur. In een hete brandruimte (van circa 800°C) zal de LFL bijvoorbeeld ongeveer de helft zijn van het percentage bij omgevingstemperatuur.

In een ruimte met een volledig ontwikkelde brand en met voldoende zuurstof, een brandstof-beheerste brand dus, verbranden de pyrolysegassen in die ruimte. Bij onvoldoende ventilatie, een ventilatie-beheerste brand, verbranden de pyrolysegassen gedeeltelijk in of buiten de openingen in de omhulling van de ruimte, daar waar deze gassen zuurstof ontmoeten en zichtbaar als uitlaande vlammen. Voor die uitstroom van gassen is een drukopbouw nodig, bijvoorbeeld door stratificatie (zie paragraaf 4.2.2).

Bij een uitstroom van brandbare gassen door kleine openingen als kieren, kan die gasstroom heel snel zoveel afkoelen door veel inmenging van koude lucht en afkoeling aan de wanden van de opening, dat er geen verbranding optreedt in de aangrenzende ruimte. Hierdoor kan zich daar op den duur een ontsteekbaar mengsel opbouwen.

Waar de pyrolysegassen terecht komen hangt vooral af van de stromingen in en rond het gebouw en van de pompwerking van de brand. In de volgende paragraaf gaan we daar verder op in.

5.3 Verspreiding van brandbare gassen

5.3.1 Standaard scheidingen

Bouwkundige scheidingen in gebouwen vertonen altijd enige lekkage. Eenzijdige verhoging van de temperatuur door brand leidt meestal tot vervorming van een constructie, zodat openingen kunnen ontstaan waar die niet waren of worden vergroot waar ze al waren. Bij niet-brandwerende constructies kan dit tot zeer grote openingen leiden of bezwijken van de constructie, zoals bij doorbranden van panelen of breken van beglazing.

Merk op dat de lekkage door standaard scheidingen ook wordt veroorzaakt door doorvoeringen (kabelgoten, leidingen, ventilatiekanalen) en aansluitingen op andere constructies (aansluitingen tussen wand en dak bijvoorbeeld).

5.3.2 Brandwerende en rookwerende scheidingen

De Nederlandse bouwwetgeving kent weliswaar beperkingen aan openingen in brandwerende en rookwerende scheidingen, maar de lekkage door de scheidingen kan nog groot zijn.

Een brandwerende scheiding mag soms zelfs meerdere openingen bevatten met een maximale afmeting van 25 mm diameter of een maximale lengte en breedte van 150 mm x 6 mm. Daar kan in de praktijk veel rook doorheen komen.

Ook rookwerende scheidingen laten (nog) veel rook door. Het Bouwbesluit heeft namelijk sinds de invoering in 1992 het aspect rookwerendheid van een scheidingsconstructie geregeld via de brandwerendheid ervan. De opmerkingen over brandwerende scheidingen gelden dus ook voor rookscheidingen. Daarnaast is de brandwerendheid een eigenschap die pas bij hogere temperaturen aanwezig hoeft te zijn. Bij door verhoogde temperatuur geactiveerde brandwerende voorzieningen, zoals opschuimende strips, is dat bijvoorbeeld vanaf ca. 200 - 250°C. In de praktijk betekent dit dat ook rookwerende constructies binnen de wettelijke eisen grote hoeveelheden rook mogen doorlaten, zeker bij temperaturen onder de 200°C.

De wetgever is van plan binnen enkele jaren andere eisen voor rookwerendheid verplicht te stellen voor nieuwbouw. Dat betekent echter dat in bestaande bouw nog vele jaren met veel rooklekkage rekening moet worden gehouden; ook in rookwerende scheidingen.

Het voorgaande geldt niet alleen voor de scheidingsconstructie zelf, maar ook en zelfs vooral, voor de doorvoeringen door die constructie, zoals kabelgoten, leidingen en kanalen en de aansluitingen op andere constructies.

De ventilatiekanalen vormen een speciale categorie binnen de doorvoeringen, omdat niet alleen de aansluiting op de wand (rondom het kanaal) relevant is, maar ook het traject door het kanaal zelf. Dat laatste traject wordt meestal brand- en rookwerend gemaakt met geactiveerde brandkleppen. Als nu een 'normaal' luchtverversingssysteem wordt afgeschakeld vóórdát de kleppen in de kanalen sluiten, wat helaas nog vaak wordt gedaan, dan levert het systeem in feite open verbindingen tussen alle ruimten die door het systeem van ventilatie worden voorzien.

Zoals eerder aangegeven kunnen pyrolysegassen ook ontstaan aan de koude kant van een scheiding door verhitting vanaf de brandzijde, zonder dat er (op die plaats) openingen in de scheiding aanwezig zijn. De hoeveelheid aan brandbare gassen die zo in een niet-brandruimte terecht komt, is bij brandwerende scheidingen meestal veel kleiner dan de hoeveelheid die zich door openingen kan verspreiden, maar bij niet-brandwerende scheidingen kan het een belangrijke hoeveelheid zijn.

5.3.3 Trajecten van rookverspreiding

Rookgassen zullen meestal worden verspreid vanuit een brandruimte. In een brandruimte zullen de rookgassen in een vroeg stadium van brand vooral boven in de ruimte aanwezig zijn. In een later stadium van brand is de rook over een groot deel van de ruimtehoogte verspreid.

Tijdens de temperatuuroptocht in de brandruimte zullen de gassen, gedreven door expansie van de gassen, door openingen naar aangrenzende ruimten of naar buiten worden gestuwd; door de verhoogde temperatuur gebeurt dit vooral boven in de ruimte (zie paragraaf 4.2.2).

Rookgassen kunnen ook vanuit andere ruimten dan de brandruimte worden geproduceerd en verspreid. Dat betreft dan vooral kleine ruimten als schachten, spouwen, plenums en andere holten grenzend aan de brandruimte. Deze kleine ruimten kunnen door de brand via geleiding, convectie en straling worden verwarmd, in temperatuur stijgen, een druk opbouwen en hierdoor een stroming naar andere ruimten veroorzaken. Als er in deze ruimten opgewarmde brandbare materialen zijn, die vanuit de brandruimte pyrolysegassen produceren, dan kunnen deze pyrolysegassen worden meegevoerd met de stroming als ze niet vroegtijdig ontsteken. Het belang van dit scenario, rookgassen geproduceerd en verspreid vanuit andere ruimten dan de brandruimte, zit in het feit dat de temperatuur in die ruimten plaatselijk (bijvoorbeeld in contact met een hete scheiding) voldoende kan zijn voor pyrolyse, maar onvoldoende voor zelfontbranding en dat er vaak geen ontstekingsbronnen aanwezig zijn. Zeker wanneer het gaat om holten in constructies zijn de mogelijke rookverspreidingstrajecten naar andere ruimten moeilijk te overzien.

Merk op dat de in paragraaf 4.2 besproken drukverschillen, en met name de winddruk, tot onverwachte trajecten van rookverspreiding kunnen leiden:

- Een winddruk op de gevelopening van een brandruimte veroorzaakt een overdruk in die ruimte en extra verspreiding van rookgassen naar aangrenzende ruimten.
- Een met hete rook gevulde schacht veroorzaakt een sterk schoorsteeneffect, met rookverspreiding naar ruimten die boven aan de schacht grenzen.

5.4 Accumulatie van pyrolysegassen

Pyrolysegassen bouwen zich op aan het plafond van een ruimte als ze warmer zijn dan de andere gassen in de ruimte. Ze mengen homogeen op als ze ongeveer even warm zijn of worden. In kleine en goed omsloten ruimten, zoals plenums en dakkappen en in een warme laag aan het plafond van een grotere ruimte, kan er heel snel een ontsteekbaar mengsel gevormd worden.

Op den duur kunnen zelfs grote ruimten geheel of grotendeels gevuld worden met een ontsteekbaar mengsel.

Het hangt voornamelijk af van het totale volume en de mengverhouding van het ontsteekbaar mengsel welke energie bij de verbranding vrij komt. Als er naast ontsteekbare mengsels ook volumes met een te rijk en een te arm mengsel in de ruimte voorkomen, zullen die door de explosie kunnen mengen en ook explosief verbranden. Vanwege het mengproces gaat dat laatste echter minder snel.

5.5 Schade aan de constructie en de omgeving

Voor de omhulling²⁵ van de ruimte bepaalt bij een explosie welke drukken en krachten er worden opgebouwd en hoeveel schade de explosie aanricht. Openingen in de omhulling van de ruimte reduceren de druktoename en de schade (zie ook paragraaf 3.2). Objecten in de ruimte hebben invloed op de mate waarin de gassen worden gemengd als ze door de ruimte stromen en om de objecten 'wervelen'. De objecten hebben daardoor invloed op de snelheid van de explosieve verbranding van de niet volledig voorgemengde gassen.

5.6 Voorbeeld-gebouwen

In deze paragrafen behandelen we van enkele gebouwsoorten eigenschappen die de kans op explosieve verschijnselen bij brand vergroten.

5.6.1 Moderne, goed geïsoleerde en lekdichte woningen

Goed geïsoleerde scheidingen leiden tot minder warmteverlies en hogere temperaturen. Zwaardere beglazing bezwijkt meestal aanzienlijk later, zodat smoren van de brand en accumulatie van onverbrande gassen waarschijnlijker worden. Beide parameters maken daarnaast drukopbouw door de brand waarschijnlijker. De kans op een backdraft wordt hierdoor groter in een dergelijke woning. De kans op een rookgasexplosie kan daarnaast toenemen in ruimten aangrenzend aan de brandruimte. Hoe groot de toename is van deze kansen valt niet in het algemeen te zeggen.

5.6.2 Hoogbouw met schachten

Hoogbouw wordt uitgevoerd met relatief lekdichte gevels. Dit beïnvloedt de kans op een backdraft en een rookgasexplosie, zoals in 5.6.1. aangegeven. De schoorsteenwerking zorgt er daarnaast voor dat rookgassen zich snel kunnen verspreiden tot op grote afstand van de brand en met name naar hogere verdiepingen. In schachten kan zich bijvoorbeeld onopgemerkt een groot volume aan rookgassen verzamelen. Naar mate de afstand die is afgelegd door de rookgassen toeneemt, wordt de kans op de vorming van een ontsteekbaar mengsel wel steeds kleiner vanwege de verdunning tijdens de verplaatsing.

Schachten in hoogbouw zijn dus vooral explosierisico-verhogende ruimten als ze direct grenzen aan de brandruimte en de rookgassen zich maar beperkt verplaatsen. Hiermee leveren de schachten een risico vergelijkbaar met diverse andere typen holten nabij een brand.

5.6.3 Industriebouwen

Industriebouwen kunnen vooral een vergrote kans op rookgasexplosies hebben vanwege de veel voorkomende slechte afdichtingen in scheidingen en de lichte constructie van scheidingen. De slechte afdichtingen maken wegstromen van onverbrande gassen relatief eenvoudig mogelijk. De lichte constructies warmen relatief snel op, zodat eventuele brandbare materialen aan de andere zijde van de constructie snel tot pyrolyse kunnen worden gebracht zonder dat een eventueel ontsteekbaar mengsel snel door de brand ontstoken en ongevaarlijk wordt gemaakt. Dit laatste geldt bijvoorbeeld voor een staaldak met kunststof isolatie boven meerdere ruimten in het zelfde brandcompartiment. De dakbedekking boven de isolatie zal meestal vrij goed dicht zijn; als de laag onder de isolatie dat niet is, kunnen ontledingsproducten van de kunststof isolatie in de onderliggende ruimte komen. Als de onderliggende ruimte de brandruimte is, levert dit geen risico: de ontledingsproducten worden dan in de brandruimte verbrand. Het risico ontstaat als de pyrolysegassen ook in andere ruimten terecht kunnen komen.

²⁵ Ook constructieonderdelen en andere objecten in de ruimte hebben invloed op de ontwikkelde drukken, maar dat geldt vooral voor volumes met vooraf niet-ontsteekbare mengsels die door menging ontsteekbaar worden. De stromingsobstakels in de ruimte versterken dan de menging.

5.6.4 Bedrijfsverzamelgebouwen

Bedrijfsverzamelgebouwen is geen sterk afwijkende gebouwsoort. De enige afwijking is de verwachting bij de meeste gebruikers dat ieder van de afzonderlijke bedrijven redelijk gevrijwaard is van wat een buurbedrijf in het zelfde pand doet en dat is vaak niet zo. Aangezien vaak meerdere bedrijven één brandcompartiment delen, kan tussen verschillende bedrijven hetzelfde gebeuren als beschreven in 5.6.3.

6. Signalen voorafgaand aan explosieve verbranding

Rookgasexplosies komen weinig voor, maar kunnen zeer gevaarlijk zijn als ze optreden.

Een versnelde brandontwikkeling als een flashover en een explosieve verbranding als een backdraft kondigen zich in meer (flashover) of mindere mate (backdraft) aan door visueel waarneembare verschijnselen. Bij een flashover duurt het dan nog een tiental tot enkele tientallen seconden voordat de flashover optreedt, bij een backdraft is dat een stuk korter: enkele tot een tiental seconden.

Rookgasexplosies kondigen zich echter bijna niet aan, dat wil zeggen er zijn nauwelijks signalen die met brede geldigheid aangeven dat een rookgasexplosie op korte termijn te verwachten is. En na de eerste tekenen gaat het bij een rookgasexplosie om maximaal enkele seconden totdat deze optreedt.

Er zijn wel signalen die gebruikt kunnen worden om een *meer dan gemiddelde kans op optreden* van een rookgasexplosie aan te geven. Het gaat dan om de eigenschappen van de brand en van het gebouw waarin de brand woedt.

6.1 Eigenschappen van de brand

Als rookgasexplosies optreden is dat bijna altijd buiten de brandruimte(n). Een rookgasexplosie in een brandruimte is echt zeldzaam en treedt alleen op als de brand gedurende lange tijd nagenoeg gesmoord is en er geen zichtbare brand meer woedt (zie ook paragraaf 3.5) en is dan een grensgeval met een backdraft. We beperken ons hier daarom tot rookgasexplosies buiten de brandruimte.

Ontledingsgassen en onvolledig verbrande gassen zijn vaak afkomstig van een ventilatie-beheerste volledig ontwikkeld brand. De aanwezigheid van zo'n brand is dus een signaal dat in ruimten rond de brand eventueel de condities voor een rookgasexplosie kunnen ontstaan. Of dat ook werkelijk gebeurt is sterk afhankelijk van de openingen in de inwendige scheidingen en het drukverschil daarover.

Welke signalen van de brand wijzen op een verhoogde kans op een rookgasexplosie?:

- Een brand in een gebouw met meerdere ruimten, die lang grotendeels is gesmoord.
- Zeer sterke rookontwikkeling in de brandruimte (duidt op een ondergeventileerde brand).
- Lange uitslaande vlammen vanuit de brandruimte (duidt op een ondergeventileerde brand).
- Neerslag van een olieachtig of vettig residu op wanden en ramen in andere ruimten dan de brandruimte.
- Mogelijk ook: Licht gekleurde witte/gele rook in andere ruimten dan de brandruimte.

6.2 Eigenschappen van het gebouw

Welke signalen van het gebouw wijzen op een verhoogde kans op een rookgasexplosie?:

- Het ontbreken van brandwerende scheidingen tussen de brandruimte en aangrenzende ruimten (De aanwezigheid van die scheidingen geeft overigens geen zekerheid dat brandbare gassen zich niet verspreiden).
- Aanwezigheid van holle ruimten boven of naast de brandruimte (vanwege rookgasexplosies met een beperkte, maar nog steeds gevaarlijke, explosiekracht).
- Openingen in de gevel van de brandruimte in combinatie met wind op de gevel.
- Recent gebouw met goede kierafdichting, zonder openingen in de gevel van de brandruimte.

7. Gangbare uitspraken over rookgasexplosies

7.1 Introductie

Aan de hand van een aantal gangbare uitspraken over rookgasexplosies, wordt de theorie toegepast en de betrouwbaarheid van de uitspraak beoordeeld.

7.2 Uitspraken

7.2.1 Pyrolyse leidt tot een rookgasexplosie

“Als de brandbare materialen in een brandruimte meer pyrolysegassen produceren dan nodig om de concentratie in de rooklaag boven de LFL te brengen, ontstaat een rookgasexplosie in de brandruimte”.

Klopt dit? Nee!

- Geproduceerde pyrolysegassen verbranden geheel of gedeeltelijk in de brandruimte, zodat daar vrijwel nooit een rookgasexplosie optreedt. In ruimten grenzend aan een brandruimte kan het soms wel gebeuren. Daarvoor is een concentratie boven de UEL nodig in delen van de brandruimte van waaruit gassen weglekken naar aangrenzende ruimten. Als deze rookgassen in een aangrenzende ruimte mengen met zuurstof zonder snelle ontsteking, dan kan zich een ontsteekbaar mengsel vormen met een groot volume. Op den duur is dan een rookgasexplosie mogelijk (bij verschijnen van een ontstekingsbron).

7.2.2 Rookgaskoeling verhindert een rookgasexplosie

“Koelen met verneveld water kan een rookgasexplosie voorkomen”.

Klopt dit? Soms, maar het is niet waarschijnlijk!

- Een rookgasexplosie treedt op bij het verschijnen van een ontstekingsbron in een ontsteekbaar mengsel. De temperatuur van het mengsel heeft bij de gangbare temperaturen alleen een beperkt effect op de LFL- en UFL-waarden. Het koelend effect van water is dus niet zo belangrijk voor het optreden van een rookgasexplosie. Het verdunnend effect van waterdamp kan wel belangrijk zijn: als het mengsel vooraf ontsteekbaar was, kan het door verdunnen onder de LFL raken; als het mengsel niet ontsteekbaar was door overmaat aan brandstof, kan het door verdunnen echter ook ontsteekbaar worden. De waternevel verdunt vooral effectief als de temperatuur van het mengsel boven de 100 °C ligt, zodat de nevel snel verdampt. Koelen met verneveld water helpt dus weinig, verdunnen kan een rookgasexplosie voorkomen, maar verdunnen kan een rookgasexplosie ook juist mogelijk maken.
- Zowel door de koelende werking als door de impuls van het water zal extra luchtbeweging optreden. In een ruimte met een brandstofrijke rooklaag en een zuurstofrijke onderlaag kan het mengen een (veel) groter volume aan ontsteekbaar mengsel veroorzaken, zodat de eventuele rookgasexplosie (veel) sterker wordt.
- Bij een eventueel explosieve verbranding verminderen de warmtecapaciteit van het water en de traagheid van de druppels de kracht van de explosie enigszins.

7.2.3 Explosie of verbranding

“Een explosief mengsel en een ontstekingsbron veroorzaken samen een rookgasexplosie“.

Klopt dit? Soms wel, soms niet. Het hangt ervan af wanneer je iets een explosie noemt!

- We beschouwen een explosieve verbranding als een rookgasexplosie als er een sterk drukeffect optreedt. Om dat drukeffect in een ruimte te krijgen moet een niet verwaarloosbaar deel van het ruimtevolumen uit een ontsteekbaar mengsel bestaan. Een geleidelijk geproduceerd ontsteekbaar mengsel dat snel na de start van de productie wordt ontstoken, heeft nog niet het benodigde volume bereikt en zal daarom geen rookgasexplosie veroorzaken. Bij een verder toenemend volume en een uitgestelde ontsteking kan dat wel. Als voorbeeld een gasfornuis: het aansteken van een pit geeft even een explosieve verbranding, omdat rond de pit een volume ontstaat met een ontsteekbaar mengsel. Als het aansteken snel gebeurt is het drukeffect ervan verwaarloosbaar en noemen we het geen explosie.

7.2.4 Zichtbaar explosieve rook

“Aan de kleur van de rook is te zien of een mengsel explosief is”.

Klopt dit? Gedeeltelijk!

- De kans op een rookgasexplosie bestaat vooral bij een zwaar ondergeventileerde brand in een aangrenzende ruimte. De kleur van rook uit de brandruimte kan iets zeggen over het ondergeventileerd zijn van de brand en dus iets over de kans op een rookgasexplosie in de aangrenzende ruimte.
- De kleur van rook kan soms iets zeggen over de kans op een explosief mengsel. Zo wordt een dunne witte of gele rook in de praktijk vaak gezien als ‘waarschijnlijk pyrolysegassen’. Als dergelijke rook zichtbaar is in een ruimte grenzend aan de brandruimte geeft dit een indicatie voor verhoogde kans op een ontsteekbaar mengsel.
- Merk op dat in veel, vooral populaire, publicaties de suggestie wordt gewekt dat van de kleur van rook veel valt af te leiden. Deze claims zijn vaak weinig onderbouwd. De kleur van de rook kan beter gebruikt worden in combinatie met andere verschijnselen om met enige betrouwbaarheid een uitspraak te doen over de brand en de kans op ontsteking van gassen.

7.2.5 Brandbare bouwmaterialen veroorzaken rookgasexplosies

“De aanwezigheid van brandbare bouwmaterialen in een ruimte is de belangrijkste indicator voor de kans op een rookgasexplosie in die ruimte; in ruimten met weinig of geen brandbare bouwmaterialen is die kans heel klein”.

Klopt dit? Nee!

- Brandbare materialen produceren pyrolysegassen als ze voldoende verwarmd worden, of ze nu bouw materiaal zijn of een ander materiaal zoals inventaris; zowel de aanwezige bouwmaterialen als de inventaris spelen dus een rol.
- De meest brandbare inhoud van een gebouw en de snelst pyrolysegassen producerende inhoud van een gebouw is meestal de inventaris.
- Geproduceerde pyrolysegassen verbranden geheel of gedeeltelijk in de brandruimte, zodat daar vrijwel nooit een rookgasexplosie optreedt. In ruimten grenzend aan een brandruimte kan het soms wel gebeuren.
- Bouwkundige scheidingen kunnen pyrolysegassen produceren buiten de brandruimte, aan de koude kant van de scheiding. Inventaris doet dat niet.

7.2.6 Rookgasexplosie leidt tot veel schade

“Een rookgasexplosie is zo sterk dat veel schade ontstaat aan het gebouw”.

Klopt dit? Soms wel, soms niet!

- De kracht van een rookgasexplosie is sterk afhankelijk van het volume van het ontsteekbaar mengsel. De schade die de rookgasexplosie aanricht hangt vervolgens sterk af van de overdruk die de explosie veroorzaakt. Die overdruk is klein als slechts een klein deel van de ruimte een ontsteekbaar mengsel bevat en/of de ruimte grote openingen heeft naar buiten. Een rookgasexplosie kan dus vaak schade toebrengen aan een gebouw, maar de schade kan klein tot zeer omvangrijk zijn.

7.2.7 Rookgasexplosies komen vaker voor in moderne woningen

“Door de bouwwijze van moderne energiezuinige woningen gaan er vaker rookgasexplosies ontstaan” .

Klopt dit? Waarschijnlijk wel, maar hoeveel is onbekend!

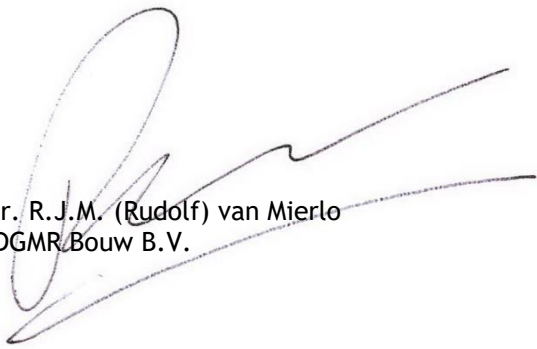
- Energiezuinige woningen hebben zware beglazing die niet snel wegvalt bij brand. Branden in dergelijke woningen zullen eerder smoren dan in andere woningen. Hierdoor stijgt de kans op een backdraft en op verspreiding van onverbrande gassen naar aangrenzende ruimten. Hierdoor neemt ook de kans op een rookgasexplosie toe. Hoe groot die toename is, valt (nog) niet te zeggen.

7.2.8 Rookgasexplosies kunnen op kleine schaal worden nagebootst

“Het produceren van rookgasexplosies op kleine schaal geeft een goed inzicht in de mechanismen op grote schaal”

Klopt dit? Gedeeltelijk!

- Fysische grootheden en verschijnselen zoals temperatuur, stromingssnelheid, mengprocessen en reactiesnelheid zijn op verschillende manier afhankelijk van de schaalgrootte. Bij verkleinen van de werkelijkheid tot een klein model zullen fysische verschijnselen daarom meestal anders verlopen. Met kennis van de invloed van de schaal levert dit kwalitatief inzicht, maar nog geen inzicht in de praktische waarde van de kwantitatieve metingen.
- Veel gebruikte schaalmodellen voor rookgasexplosies zitten constructief anders in elkaar dan gebouwen in de praktijk. Verhitting en vervorming van de constructie heeft in het schaalmodel dan een ander effect dan in de praktijk.
- Conclusies voor de praktijk op basis van metingen in het schaalmodel moeten daarom met grote voorzichtigheid worden getrokken.



ir. R.J.M. (Rudolf) van Mierlo
DGMR Bouw B.V.

Bijlage 1

Titel

Ontstekingsgrenzen van gangbare gassen bij omgevingstemperatuur
(Tabellen uit SFPE Handbook [SFPE2016], 2 blz.)

Table 2-7.1 Summary of Limits of Flammability, Lower Temperature Limits (T_L), and Minimum Autoignition Temperatures (AIT) of Individual Gases and Vapors in Air at Atmospheric Pressure¹

Combustible	Limits of Flammability (vol %)				Combustible	Limits of Flammability (vol %)			
	LFL ^y	UFL ^y	T_L (°C)	AIT (°C)		LFL ^y	UFL ^y	T_L (°C)	AIT (°C)
Acetal	1.6	10	37	230	Cumene	0.88 ^a	6.5 ^a	—	425
Acetaldehyde	4.0	60	—	175	Cyanogen	6.6	—	—	—
Acetic acid	5.4 ^a	—	40	465	Cycloheptane	1.1	6.7	—	—
Acetic anhydride	2.7 ^b	10 ^c	47	390	Cyclohexane	1.3	7.8	—	245
Acetanilide	1.0 ^d	—	—	545	Cyclohexanol	1.2 ^d	—	—	300
Acetone	2.6	13	—	465	Cyclohexene	1.2 ^a	—	—	—
Acetophenone	1.1 ^d	—	—	570	Cyclohexyl acetate	1.0 ^d	—	—	335
Acetylacetone	1.7 ^d	—	—	340	Cyclopropane	2.4	10.4	—	500
Acetyl chloride	5.0 ^d	—	—	390	Cymene	0.85 ^a	6.5 ^a	—	435
Acetylene	2.5	100	—	305	Decaborane	0.2	—	—	—
Acrolein	2.8	31	—	235	Decalin	0.74 ^a	4.9 ^a	57	250
Acrylonitrile	3.0	—	-6	—	<i>n</i> -Decane	0.75 ⁱ	5.6 ^m	46	210
Acetone-cyanohydrin	2.2	12	—	—	Deuterium	4.9	75	—	—
Adipic acid	1.6 ^d	—	—	420	Diborane	0.8	88	—	—
Aldol	2.0 ^d	—	—	250	Diesel fuel (60 cetane)	—	—	—	225
Allyl alcohol	2.5	18	22	—	Diethyl amine	1.8	10	—	—
Allyl amine	2.2	22	—	375	Diethyl analine	0.8 ^d	—	80	630
Allyl bromide	2.7 ^d	—	—	295	1,4-Diethyl benzene	0.8 ^a	—	—	430
Allyl chloride	2.9	—	-32	485	Diethyl cyclohexene	0.75	—	—	240
<i>o</i> -Aminodiphenyl	0.66	4.1	—	450	Diethyl ether	1.9	36	—	160
Ammonia	15	28	—	—	3,3-Diethyl pentane	0.7 ^a	—	—	290
<i>n</i> -Amyl acetate	1.0 ^a	7.1 ^a	25	360	Diethyl ketone	1.6	—	—	450
<i>n</i> -Amyl alcohol	1.4 ^a	10 ^a	38	300	Diisobutyl carbinol	0.82 ^a	6.1 ^j	—	—
<i>tert</i> -Amyl alcohol	1.4 ^d	—	—	435	Diisobutyl ketone	0.79 ^a	6.2 ^a	—	—
<i>n</i> -Amyl chloride	1.6 ^e	8.6 ^a	—	260	2,4-Diisocyanate	—	—	120	—
<i>tert</i> -Amyl chloride	1.5 ^f	—	-12	345	Diisopropyl ether	1.4	7.9	—	—
<i>n</i> -Amyl ether	0.7 ^d	—	—	170	Dimethyl amine	2.8	—	—	400
Amyl nitrite	1.0 ^d	—	—	210	2,2-Dimethyl butane	1.2	7.0	—	—
<i>n</i> -Amyl propionate	1.0 ^d	—	—	380	2,3-Dimethyl butane	1.2	7.0	—	—
Amylene	1.4	8.7	—	275	Dimethyl decalin	0.69 ^a	5.3 ^j	—	235
Aniline	1.2 ^g	8.3 ^g	—	615	Dimethyl dichlorosilane	3.4	—	—	—
Anthracene	0.65 ^d	—	—	540	Dimethyl ether	3.4	27	—	350
<i>n</i> -Amyl nitrate	1.1	—	—	195	<i>n,n</i> -Dimethyl formamide	1.8 ^a	14 ^a	57	435
Benzene	1.3 ^a	7.9 ^a	—	560	2,3-Dimethyl pentane	1.1	6.8	—	335
Benzyl benzoate	0.7 ^d	—	—	480	2,2-Dimethyl propane	1.4	7.5	—	450
Benzyl chloride	1.2 ^d	—	—	585	Dimethyl sulfide	2.2	20	—	205
Bicyclohexyl	0.65 ^a	5.1 ^h	74	245	Dimethyl sulfoxide	—	—	84	—
Biphenyl	0.70 ⁱ	—	110	540	Dioxane	2.0	22	—	265
2-Biphenylamine	0.8 ^d	—	—	450	Dipentene	0.75 ^h	6.1 ^h	45	237
Bromobenzene	1.6 ^d	—	—	565	Diphenylamine	0.7 ^d	—	—	635
Butadiene (1,3)	2.0	12	—	420	Diphenyl ether	0.8 ^d	—	—	620
<i>n</i> -Butane	1.8	8.4	-72	405	Diphenyl methane	0.7 ^d	—	—	485
1,3-Butandiol	1.9 ^d	—	—	395	Divinyl ether	1.7	27	—	—
Butene-1	1.6	10	—	385	<i>n</i> -Dodecane	0.60 ^d	—	74	205
Butene-2	1.7	9.7	—	325	Ethane	3.0	12.4	-130	515
<i>n</i> -Butyl acetate	1.4 ^e	8.0 ^a	—	425	Ethyl acetate	2.2	11	—	—
<i>n</i> -Butyl alcohol	1.7 ^a	12 ^a	—	—	Ethyl alcohol	3.3	19 ^k	—	365
<i>sec</i> -Butyl alcohol	1.7 ^a	9.8 ^a	21	405	Ethyl amine	3.5	—	—	385
<i>tert</i> -Butyl alcohol	1.9 ^a	9.0 ^a	11	480	Ethyl benzene	1.0 ^a	6.7 ^a	—	430
<i>tert</i> -Butyl amine	1.7 ^a	8.9 ^a	—	380	Ethyl chloride	3.8	—	—	—
<i>n</i> -Butyl benzene	0.82 ^a	5.8 ^a	—	410	Ethyl cyclobutane	1.2	7.7	—	210
<i>sec</i> -Butyl benzene	0.77 ^a	5.8 ^a	—	420	Ethyl cyclohexane	2.0 ⁿ	6.6 ⁿ	—	260
<i>tert</i> -Butyl benzene	0.77 ^a	5.8 ^a	—	450	Ethyl cyclopentane	1.1	6.7	—	260
<i>n</i> -Butyl bromide	2.5 ^a	—	—	265	Ethyl formate	2.8	16	—	455
Butyl cellosolve	1.1 ^h	11 ⁱ	—	245	Ethyl lactate	1.5	—	—	400
<i>n</i> -Butyl chloride	1.8	10 ^a	—	—	Ethyl mercaptan	2.8	18	—	300
<i>n</i> -Butyl formate	1.7	8.2	—	—	Ethyl nitrate	4.0	—	—	—
<i>n</i> -Butyl stearate	0.3 ^d	—	—	355	Ethyl nitrite	3.0	50	—	—
Butyric acid	2.1 ^d	—	—	450	Ethyl propionate	1.8	11	—	440
α -Butyrolactone	2.0 ^h	—	—	—	Ethyl propyl ether	1.7	9	—	—
Carbon disulfide	1.3	50	—	90	Ethylene	2.7	36	—	490
Carbon monoxide	12.5	74	—	—	Ethyleneimine	3.6	46	—	320
Chlorobenzene	1.4	—	21	640	Ethylene glycol	3.5 ^d	—	—	400
<i>m</i> -Cresol	1.1 ^h	—	—	—	Ethylene oxide	3.6	100	—	—
Crotonaldehyde	2.1	16 ^k	—	—	Furfural alcohol	1.8 ^o	16 ^p	72	390

^a $T = 100^\circ\text{C}$. ^e $T = 50^\circ\text{C}$. ⁱ $T = 110^\circ\text{C}$. ^m $T = 86^\circ\text{C}$. ^q $T = 125^\circ\text{C}$. ^u $T = 43^\circ\text{C}$. ^x $T = 96^\circ\text{C}$. ^{aa} $T = 247^\circ\text{C}$.
^b $T = 75^\circ\text{C}$. ^f $T = 85^\circ\text{C}$. ^j $T = 175^\circ\text{C}$. ⁿ $T = 130^\circ\text{C}$. ^r $T = 200^\circ\text{C}$. ^v $T = 195^\circ\text{C}$. ^y $T = 70^\circ\text{C}$. ^{bb} $T = 30^\circ\text{C}$.
^c $T = 75^\circ\text{C}$. ^g $T = 140^\circ\text{C}$. ^k $T = 60^\circ\text{C}$. ^o $T = 72^\circ\text{C}$. ^s $T = 78^\circ\text{C}$. ^w $T = 160^\circ\text{C}$. ^z $T = 29^\circ\text{C}$. ^{cc} $T = 203^\circ\text{C}$.
^dCalculated. ^h $T = 150^\circ\text{C}$. ^l $T = 53^\circ\text{C}$. ^p $T = 117^\circ\text{C}$. ^t $T = 122^\circ\text{C}$.

Table 2-7.1 Summary of Limits of Flammability, Lower Temperature Limits (T_L), and Minimum Autoignition Temperatures (AIT) of Individual Gases and Vapors in Air at Atmospheric Pressure (Continued)¹

Combustible	Limits of Flammability (vol %)		T_L (°C)	AIT (°C)	Combustible	Limits of Flammability (vol %)		T_L (°C)	AIT (°C)
	LFL ^y	UFL ^y				LFL ^y	UFL ^y		
Gasoline:					2-Monoisopropyl				
100/130	1.3	7.1	—	440	biphenyl	0.53 ^j	3.2 ^r	141	435
115/145	1.2	7.1	—	470	Monomethylhydrazine	4	—	—	—
Glycerine	—	—	—	370	Naphthalene	0.88 ^s	5.9 ^t	—	526
<i>n</i> -Heptane	1.05	6.7	-4	215	Nicotine	0.75 ^a	—	—	—
<i>n</i> -Hexadecane	0.43 ^d	—	126	205	Nitroethane	3.4	—	30	—
<i>n</i> -Hexane	1.2	7.4	-26	225	Nitromethane	7.3	—	33	—
<i>n</i> -Hexyl alcohol	1.2 ^a	—	—	—	1-Nitropropane	2.2	—	34	—
<i>n</i> -Hexyl ether	0.6 ^d	—	—	185	2-Nitropropane	2.5	—	27	—
Hydrazine	4.7	100	—	—	<i>n</i> -Nonane	0.85 ^u	—	31	205
Hydrogen	4.0	75	—	400	<i>n</i> -Octane	0.95	—	13	220
Hydrogen cyanide	5.6	40	—	—	Paraldehyde	1.3	—	—	—
Hydrogen sulfide	4.0	44	—	—	Pentaborane	0.42	—	—	—
Isoamyl acetate ¹	1.1	7.0 ^a	25	360	<i>n</i> -Pentane	1.4	7.8	-48	260
Isoamyl alcohol ¹	1.4	9.0 ^a	—	350	Pentamethylene glycol	—	—	—	335
Isobutane	1.8	8.4	-81	460	Phthalic anhydride	1.2 ^g	9.2 ^v	140	570
Isobutyl alcohol	1.7 ^a	11 ^a	—	—	3-Picoline	1.4 ^d	—	—	500
Isobutyl benzene	0.82 ^a	6.0 ⁱ	—	430	Pinane	0.74 ^w	7.2 ^w	—	—
Isobutyl formate	2.0	8.9	—	—	Propadiene	2.16	—	—	—
Isobutylene	1.8	9.6	—	465	Propane	2.1	9.5	-102	450
Isopentane	1.4	—	—	—	1,2-Propandiol	2.5 ^d	—	—	410
Isophorone	0.84	—	—	460	β-Propiolactone	2.9 ^c	—	—	—
Isopropylacetate	1.7 ^d	—	—	—	Propionaldehyde	2.9	17	—	—
Isopropyl alcohol	2.2	—	—	—	<i>n</i> -Propyl acetate	1.8	8	—	—
Isopropyl biphenyl	0.6 ^d	—	—	440	<i>n</i> -Propyl alcohol	2.2 ^k	14 ^a	—	440
Jet fuel:					Propyl amine	2.0	—	—	—
JP-4	1.3	8	—	240	Propyl chloride	2.4 ^d	—	—	—
JP-6	—	—	—	230	<i>n</i> -Propyl nitrate	1.8 ^q	100 ^q	21	175
Kerosene	—	—	—	210	Propylene	2.4	11	—	460
Methane	5.0	15.0	-187	540	Propylene dichloride	3.1 ^d	—	—	—
Methyl acetate	3.2	16	—	—	Propylene glycol	2.6 ^x	—	—	—
Methyl acetylene	1.7	—	—	—	Propylene oxide	2.8	37	—	—
Methyl alcohol	6.7	36 ^k	—	385	Pyridine	1.8 ^k	12 ^y	—	—
Methyl amine	4.2 ^d	—	—	430	Propargyl alcohol	2.4 ^e	—	—	—
Methyl bromide	10	15	—	—	Quinoline	1.0 ^d	—	—	—
3-Methyl butene-1	1.5	9.1	—	—	Styrene	1.1 ^z	—	—	—
Methyl butyl ketone	S51.2	8.0 ^a	—	—	Sulfur	2.0 ^{aa}	—	247	—
Methyl cellosolve	2.5 ^q	20 ^g	—	380	<i>p</i> -Terphenyl	0.96 ^d	—	—	535
Methyl cellosolve acetate	1.7 ^h	—	46	—	<i>n</i> -Tetradecane	0.5 ^d	—	—	200
Methyl ethyl ether	2.2 ^d	—	—	—	Tetrahydrofuran	2.0	—	—	—
Methyl chloride	7 ^d	—	—	—	Tetralin	0.84 ^a	5.0 ⁿ	71	385
Methyl cyclohexane	1.1	6.7	—	250	2,2,3,3-Tetramethyl pentane	0.8	—	—	430
Methyl cyclopentadiene	1.3 ^a	7.6 ^a	49	445	Tetramethylene glycol	—	—	—	390
Methyl ethyl ketone	1.9	10	—	—	Toluene	1.2 ^a	7.1 ^a	—	480
Methyl ethyl ketone peroxide	—	—	40	390	Trichloroethane	—	—	—	500
Methyl formate	5.0	23	—	465	Trichloroethylene	12 ^{bb}	40 ^y	30	420
Methyl cyclohexanol	1.0 ^d	—	—	295	Triethyl amine	1.2	8.0	—	—
Methyl isobutyl carbinol	1.3 ^d	—	40	—	Triethylene glycol	0.9 ^g	9.2 ^{bb}	—	—
Methyl isopropenyl ketone	1.8 ^e	9.0 ^e	—	—	2,2,3-Trimethyl butane	1.0	—	—	420
Methyl lactate	2.2 ^a	—	—	—	Trimethyl amine	2.0	12	—	—
α-Methyl naphthalene	0.8 ^d	—	—	530	2,2,4-Trimethyl pentane	0.95	—	—	415
2, Methyl pentane	1.2 ^d	—	—	—	Trimethylene glycol	1.7 ^d	—	—	400
Methyl propionate	2.4	13	—	—	Trioxane	3.2 ^d	—	—	—
Methyl propyl ketone	1.6	8.2	—	—	Turpentine	0.7 ^a	—	—	—
Methyl styrene	1.0 ^d	—	49	495	Unsymmetrical dimethylhydrazine	2.0	95	—	—
Methyl vinyl ether	2.6	39	—	—	Vinyl acetate	2.6	—	—	—
Methylene chloride	—	—	—	615	Vinyl chloride	3.6	33	—	—
Monoisopropyl bicyclohexyl	0.52	4.1 ^r	124	230	<i>m</i> -Xylene	1.1 ^a	6.4 ^a	—	530
					<i>o</i> -Xylene	1.1 ^a	6.4 ^a	—	465
					<i>p</i> -Xylene	1.1 ^a	6.6 ^a	—	530

^a*T* = 100°C. ^e*T* = 50°C. ⁱ*T* = 110°C. ^m*T* = 86°C. ^q*T* = 125°C. ^u*T* = 43°C. ^x*T* = 96°C. ^{aa}*T* = 247°C.
^b*T* = 75°C. ^f*T* = 85°C. ^j*T* = 175°C. ⁿ*T* = 130°C. ^r*T* = 200°C. ^v*T* = 195°C. ^y*T* = 70°C. ^{bb}*T* = 30°C.
^c*T* = 75°C. ^g*T* = 140°C. ^k*T* = 60°C. ^o*T* = 72°C. ^s*T* = 78°C. ^w*T* = 160°C. ^z*T* = 29°C. ^{cc}*T* = 203°C.
^dCalculated. ^h*T* = 150°C. ^l*T* = 53°C. ^p*T* = 117°C. ^t*T* = 122°C.

Bijlage 2

Titel

Literatuur

- 1 [ASHR2005] ASHRAE Handbook, ASHRAE, 2005
- 2 [BABR2003] Babrauskas, V., Ignition Handbook, Fire Science Publishers, 2003
- 3 [DRYS2011] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 3rd ed., Wiley, 2011,
- 4 [BENG2001] Bengtsson L.-G., Enclosure Fires, Swedish Rescue Services Agency, 2001
- 5 [MA2015] Ma, T., Ignitability and Explosibility of Gases and Vapors, Springer, 2015.
- 6 [SFPE2016] Hurley, M.J., a.o., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed., Springer, 2016
- 7 [TROM2014] Tromp, A.J., Van Mierlo, R.J.M., Fire Safety Engineering - Handboek voor de bouw, Eburon, 2014
- 8 [WHAR1974] Wharry, D.M. and Hirst, R., Fire Technology - Chemistry and Combustion, IFE, 1974