



BRANDWEER

Brandweeracademie

Risicogroepen en rookverspreiding





BRANDWEER

Brandweeracademie

Instituut Fysieke Veiligheid
Brandweeracademie
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Opdrachtgever: Brandweer Nederland
Contactpersoon: C.G.H. Polman MSc
Titel: Risicogroepen en rookverspreiding
Datum: 27 juni 2019
Status: Definitief
Versie: 1.0
Auteurs: dr. ir. J. Post, drs. C. Tonnaer, ing. L. de Witte
Projectleider: drs. C. Tonnaer
Review: ing. R. Hagen MPA
Eindverantwoordelijk: ing. R. Hagen MPA
Foto cover: IFV

Inhoud

	Inleiding	4
1	Methode en uitgangspunten	6
1.1	Scenario	6
1.2	Rekenmethode	10
2	Effecten van rook	13
2.1	De samenstelling van rook	13
2.2	Soorten effecten	15
2.3	Effecten op kwetsbare groepen	16
3	De resultaten van de simulaties	17
4	Discussie en conclusies	27
4.1	Discussie	27
4.2	Conclusie	27
	Literatuur	34
1	Bijlage: FED en FEC	35
2	Bijlage: CFAST invoer parameters	39
3	Bijlage: Het resultaat van de berekening van de simulatie	42
3.1	S515: Cellulose	44
3.2	S514: Schuim	49

Inleiding

Aanleiding

De laatste jaren zien we steeds vaker dat relatief kleine branden in woon- en woonzorggebouwen leiden tot rookverspreiding door grote delen van die gebouwen. Daardoor wordt vluchten belemmerd en lopen de bewoners steeds vaker gezondheidsschade op of komen zelfs te overlijden. Hoewel het zelf kunnen vluchten ('vluchtveiligheid') een pijler is van de Nederlandse bouwregelgeving met betrekking tot brandveiligheid, moet de brandweer steeds vaker een grootschalige inzet doen om een gebouw te ontruimen, omdat dit de bewoners niet zelf gelukt is. Vaak gaat het dan om branden in appartementencomplexen waar veel verminderd zelfredzame ouderen wonen. De toename van dit soort complexen is te verklaren door het feit dat het relatieve aandeel van ouderen in Nederland al jaren groeit ('vergrijzing') en dat deze mensen (vanwege overheidsbeleid) steeds langer zelfstandig blijven wonen, al dan niet in 'seniorencomplexen'. Branden in dergelijke gebouwen leiden tot vaak ernstige geestelijke en lichamelijke gevolgen voor de bewoners en hebben leiden tot een forste maatschappelijke impact, lokaal, regionaal en soms zelfs nationaal.

Na de uitvoerige rapportages over de branden in Het Lichtpunt in Rotterdam in 2014 (Brandweeracademie, 2014) en De Notenhout in Nijmegen in 2015 (Brandweeracademie, 2015), heeft de Brandweeracademie in 2016 onderzoek gedaan naar *Branden in seniorencomplexen* (Brandweeracademie, 2016), waarin 77 branden in seniorencomplexen zijn geanalyseerd. Hieruit kwam het beeld naar voren dat de combinatie van ouderen die niet (tijdig) zelfstandig kunnen vluchten en de snelle rookverspreiding door het gehele gebouw bij een relatief kleine brand leidt tot slachtoffers.

Het onderzoek naar casuïstiek vraagt om een verdieping, te vinden in het voorliggende document. De vraag is, op welke manier de vrijkomende rook bij een brand een veilige ontvluchting van kwetsbare personen kan belemmeren. Door middel van *Fire Safety Engineering* (FSE) kan deze kwestie modelmatig benaderd worden. Een volgende stap is om door middel van praktijkexperimenten deze modelmatige benadering te valideren. Deze experimenten voert het IFV in de tweede helft van 2019 uit en hiervan wordt separaat verslag gedaan.

Onderzoeksvragen

Het scenario dat in dit onderzoek met behulp van FSE-technieken is onderzocht, is een brand in een appartement dat aan een in pandige gang is gelegen. Vervolgens is berekend hoe de rook van deze brand zich verspreidt en welke invloed dit heeft op de ontvluchtbaarheid van (kwetsbare) bewoners van een ander appartement dat aan dezelfde in pandige gang is gelegen.

Bepalend voor rookvorming bij brand is de aard van de brandstof (de inventaris) en de mate waarin de brand wordt voorzien van zuurstof via bedoelde of onbedoelde ventilatieopeningen. De rookverspreiding naar de gang en naar andere appartementen wordt in belangrijke mate bepaald door het openen van de deur van het brandcompartiment en de tijdsduur van het open blijven staan van die deur.

De onderzoeksvragen die hieruit volgen zijn:

1. Op welke wijze kan rook de ontvluchting en de overlevingskans bij brand belemmeren?
2. Welke invloed heeft de aard van de brandstof op de rookvorming?
3. Welke invloed op de rookverspreiding hebben het openen van de deur van het appartement naar de gang en de tijd dat die deur geopend blijft?

De blootstelling aan de rook heeft twee effecten op de bewoners van een appartementencomplex met inpandige gangen. Rook kan het zicht beperken waardoor de ontvluchting gehinderd wordt. Door gebrekkig of afwezig zicht kunnen mensen zich niet goed oriënteren en kunnen zich minder snel voortbewegen. Daarnaast zorgt rook ervoor dat de personen die eraan worden blootgesteld fysiek minder goed in staat zijn om te vluchten. Dit komt deels door de in rook aanwezige toxische stoffen en deels door de temperatuur. Door deze afnemende vluchtcapaciteit ontstaat er een versterkend effect en neemt de totale blootstellingstijd aan de rook fors toe, wat uiteindelijk kan leiden tot overlijden. Belangrijk hierbij is dat niet iedereen even gevoelig is voor deze effecten. Mensen die verminderd zelfredzaam zijn en een verminderde lichamelijke conditie hebben zijn extra kwetsbaar.

Deze wetenschap leidt tot een tweetal extra onderzoeksvragen:

4. Welke effecten van rook treden op bij de gemiddelde bevolking?
5. Welke effecten van rook treden op bij kwetsbare groepen?

1 Methode en uitgangspunten

1.1 Scenario

Het IFV heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar casuïstiek van branden waarbij kwetsbare groepen en verminderd zelfredzamen betrokken waren. In veel gevallen ging het om appartementencomplexen waarin een oververtegenwoordiging was van kwetsbare groepen. Zo vond er in 2014 een brand plaats in het appartementencomplex Het Lichtpunt in Rotterdam en was er in 2015 brand in De Notenhout in Nijmegen. Deze branden zijn beide uitgebreid onderzocht door de betreffende veiligheidsregio's en de Brandweeracademie (Brandweeracademie, 2014, 2015). In beide gevallen betrof het panden met inpandige gangen en een bewonerspopulatie die voor het overgrote deel bestond uit ouderen waarvan een deel verminderd zelfredzaam was. In beide gevallen verspreidde de rook zich door een groot deel van het appartementencomplex, niet alleen door de gangen, maar ook tot in de (andere) appartementen. In beide gevallen moest de brandweer zeer veel inspanning leveren om (met gebruik van vluchtmaskers) bewoners te evacueren. In geval van De Notenhout leidden de brand en de rookverspreiding tot vier doden¹. De mensen die de brand niet overleefd hebben, waren vanwege hun kwetsbaarheid niet in staat om zelfstandig te vluchten. Sommige van hen zijn door de brandweer in de inpandige gang gevonden op slechts enkele meters van hun appartement. Na deze branden in Rotterdam en Nijmegen, hebben zich nog meer branden voorgedaan in appartementencomplexen met inpandige gangen en een kwetsbare populatie. Te noemen zijn een brand in Krabbendijke (augustus 2016), een brand in Poeldijk (juni 2018) en een brand in Breukelen (juli 2018).

Naar aanleiding van deze gevallen kan gesteld worden dat een brand in een appartementencomplex met inpandige gangen als een relevant scenario gezien kan worden. Een brand ontstaat in een appartement² en breidt zich uit naar de gang en eventueel aangrenzende appartementen. In deze appartementen kunnen gezonde, zelfredzame mensen wonen, maar mogelijk ook kwetsbare mensen.

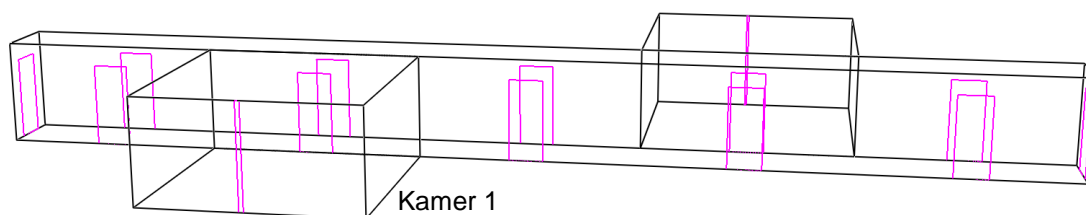
1.1.1 Gebouwontwerp

Appartementen en gang

Onderwerp van deze studie is brand in een appartementengebouw met huisvesting voor senioren, waarbij vooral rookverspreiding naar de gang en andere appartementen van belang is. Voor de simulaties is voor het appartementengebouw een model gemaakt waarbij de appartementen, met een vloeroppervlak van 40 m², aan een gang liggen van 2 meter breed en 31,6 meter lang. Aan deze gang liggen aan weerszijden vijf appartementen (zie figuur 1.1). De hoogte van de bouwlaag is 3 meter. Twee van de 10 mogelijke appartementen zijn in het model 'uitgewerkt'.

¹ Deze vier overlijdensgevallen vonden kort na de brand plaats en houden duidelijk verband met het letsel dat tijdens de brand is opgetreden. In de maanden na de brand overleden nog eens drie bewoners, maar het is onduidelijk in hoeverre deze overlijdensgevallen zijn te relateren aan de brand.

² De brand in De Notenhout in Nijmegen is een uitzondering hierop. Hier ontstond de brand niet in een appartement maar in een cafetaria die onder het appartementencomplex was gevestigd.



Figuur 1.1 CFAST model: gang met appartementen

Verspreiding van rook

Het beschouwde scenario is als volgt. In het voorste appartement, kamer 1, ontstaat brand. Hierdoor ontstaat er overdruk ten opzichte van de omgeving (naastgelegen appartementen, gang en buitenlucht). Ten gevolge daarvan verspreidt de rook zich vanuit kamer 1 naar de omgeving. De appartementen zijn brandcompartimenten in de zin van het Bouwbesluit, maar dat wil niet zeggen dat deze appartementen rookdicht zijn. De buitengevel is voorzien van een raam en eventueel ook een deur naar balkon of terras. Ook is er een voorziening voor continue ventilatie aanwezig. Naar de gang is een deur, die niet volledig luchtdicht sluit. Ook de wanden naar de naastgelegen appartementen zijn niet helemaal luchtdicht, bijvoorbeeld ten gevolge van doorvoeren en tegenover elkaar liggende stopcontacten. Bij recente daadwerkelijke branden is gebleken dat ook gezamenlijke ventilatiekanalen voor keukens en/of badkamer een route vormden voor rookverspreiding.

In deze studie is de ventilatie naar de buitenlucht en de 'lekkage' naar de gang in rekening gebracht. Niet betrokken in de simulaties is de lekkage van appartement naar appartement via tussenwanden of ventilatiekanalen. De reden hiervoor is dat het meenemen van deze lekkage zou leiden tot een te grote complexiteit van de berekeningen. Bovendien is de verwachting dat de wijze waarop en de mate waarin rook zich tussen appartementen kan verspreiden per appartementencomplex sterk kan variëren. Om die reden is in de berekeningen uitgegaan van een appartementencomplex waarin geen rookverspreiding tussen appartementen onderling wordt meegenomen.

Ventilatie naar de buitenlucht

De ventilatie in de buitenwand en naar de buitenlucht is in deze studie gemodelleerd door een verticale spleet van de grond tot aan het plafond. In de praktijk is de ventilatie, door de daarvoor bedoelde voorziening en door lekkage, immers ook op allerlei hoogten aanwezig. Door deze modelering is het eveneens mogelijk in de simulatie om rook naar buiten te 'drukken' in de bovenlaag van de kamer (warm en overdruk) en tegelijkertijd lucht naar binnen te zuigen in de onderlaag (relatief koel en onderdruk).

Voor de ventilatiespleet is een breedte van 6,25 centimeter aangehouden. Een spleet van 6,25 centimeter en 3 meter hoog levert een ventilatieoppervlak op van 0,1875 m². Dit is 1 % van de wand (van 6,32 meter lang en 3 meter hoog)³. Hiermee wordt de luchtdoorlatendheid in rekening gebracht ten gevolge van de aansluitingen (van de wanden, vloer en plafond),

³ Voor een onderbouwing van deze waarden, zie Kuindersma, 2012. De gekozen 1 % sluit aan bij (NEN6055, 2011, p. 21). In de literatuur worden ook andere waarden gevonden, maar die zijn allemaal afhankelijk van specifieke condities.

bedoelde ventilatieopeningen (ventilatioeroosters, bovenraampjes) en lekkages bij ramen en deur.

Ventilatie naar de gang

Ieder appartement heeft een deur naar de gang. Om via de gang te vluchten moet deze deur worden geopend. In het ideale geval wordt de deur ook weer gesloten nadat de ruimte is verlaten door de laatste persoon.

Uitgangspunt voor de deurbeweging is:

- > Brandappartement, kamer 1: 3 minuten na aanvang van de brand wordt de deur geopend en 30 seconden daarna wordt deze weer gesloten. Bij variaties in de invoerparameters kan dit worden aangepast (bijvoorbeeld openen op 3 minuten en niet meer sluiten). De genoemde 3 minuten zijn de reactietijd (pre-evacuation time) plus de evacuatie tijd om het appartement te verlaten. Deze tijd kan per situatie sterk verschillen. Gekozen is voor een gemiddelde zoals wordt vermeld in Gwyne, S.M.V., Rosenbaum, 2016, p. 2141.
- > Bij ontvluchting uit een ander appartement is de deurbeweging van dat andere appartement ook van invloed op de condities op de gang. Maar dit zal zeer gering zijn, aangezien er geen brand is in het betreffende appartement.

De deuren zijn niet volledig luchtafsluitend. Aangenomen is een luchtdoorlatendheid via 1 % van het deuropervlak ten gevolge van kieren en eventuele doorlaten zoals een brievenbus.

1.1.2 Bepaling van vluchtcapaciteit en overleefbaarheid

Mensen worden bij een brand blootgesteld aan allerlei effecten die hen kunnen belemmeren bij het veilig vluchten en bij het overleven van een brand. De belemmering kan komen doordat de concentratie van een bepaalde stof te hoog is geworden, maar kan ook komen doordat de dosis van een stof die iemand heeft binnengekregen een bepaalde waarde overschreden heeft. Dit wordt omschreven als de *fractional effective concentration* (FEC) en de *fractional effective dose* (FED).

De FEC wordt als volgt gedefinieerd:

$$FEC = \frac{\text{momentane concentratie van betreffende stof}}{\text{concentratie leidend tot vluchtonbekwaamheid of overlijden}}$$

De definitie van de FED luidt:

$$FED = \frac{\text{dosis ontvangen op tijdstip } t \text{ (} Ct \text{)}}{\text{effectieve dosis om vluchtonbekwaamheid of overlijden te veroorzaken}}$$

In rekenkundige vorm is dit als volgt te formuleren:

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} dt$$

- FED fractionale effective dose
- C_i de gemiddelde concentratie van stof i gedurende tijdstap dt .
- $(C \cdot t)_i$ de dosis van stof i , leidend tot vluchtonbekwaamheid of overlijden, uitgedrukt in concentratie C (ppm of fractie) x tijd t (minuten)
- dt tijdsincrement (minuten)

Wanneer de FEC of de FED de waarde 1 bereikt heeft, betekent dit dat bij ongeveer 70 % van de bevolking het genoemde effect opgetreden is. Bij het gezondste deel van de bevolking treden de effecten pas later op. Maar bij mensen met een verminderde fysieke conditie (zoals veel ouderen) kunnen deze effecten juist eerder optreden. Dit wordt uitgedrukt in een andere FED-waarde. In deze studie nemen we aan dat een kwetsbare populatie in een dergelijk appartementencomplex al negatieve effecten ondervindt bij een FED van 0,3. Bij een FED van 0,3 ondervindt ongeveer 10 % van de bevolking al de genoemde effecten en bij een FED van 1,3 is dat circa 90 % (Purser, David A. and McAllister, 2016, p. 2372).

Rook kan op verschillende manieren de overlevingskans en de ontvluchtingsmogelijkheden beïnvloeden (zie ook hoofdstuk 2). Rook kan het zicht belemmeren, ogen en ademhaling irriteren, leiden tot verstikken of zorgen voor warmte-effecten (Purser, 2016, p. 2215).

FEC rook (FEC_{smoke})

Rook veroorzaakt zichtbelemmering. Bij een FEC rook = 1 wordt de vluchtefficiëntie (het kiezen van de snelste route naar een veilige locatie) significant verminderd.

FEC irriterende stoffen (FEC_{irr})

In deze categorie vallen de stoffen die luchtwegen en ogen pijnlijk prikkelen, zoals zoutzuur, blauwzuur, acroleïne en formaldehyde. Deze stoffen zijn bij FEC = 1 niet letaal maar ze verminderen dan wel significant de vluchtefficiëntie door tranende ogen of overmatig hoesten. Bij FEC = 5 kan de blootstelling aan deze stoffen leiden tot een volledige onbekwaamheid tot vluchten.

FLD irriterende stoffen (FLD_{irr})

Irriterende stoffen kunnen ook tot schade leiden ten gevolge van een aantasting van de luchtwegen. Een opgelopen dosis met FLD (fractional lethal dose) = 1 kan uren na de blootstelling leiden tot ernstig letsel of overlijden.

FED verstikkende stoffen (FED_{IN})

CO en HCN zijn de voornaamste 'vertegenwoordigers' van deze categorie. Een FED = 1 leidt tot vluchtonbekwaamheid en bewusteloosheid. Bij FED = 2 kan de dosis letaal zijn.

FED warmte (FED_{heat})

Blootstelling aan warmte kan door straling worden veroorzaakt, direct vanuit de brand of door hete rook en eventueel een heet oppervlak. Ook kan deze blootstelling worden veroorzaakt doordat personen zich in de hete rook bevinden (convectieve warmteoverdracht). Iedere vorm van warmteoverdracht kan leiden tot verbranding van de huid. Schade aan luchtwegen wordt vooral veroorzaakt door convectie. Zowel door straling als convectie kan ook, na langere blootstellingduur, verhoging van de lichaamstemperatuur optreden.

Een FED warmte = 1 leidt tot ernstige pijn aan de onbeschermdede huid (hoofd en handen). FED = 8 leidt tot tweedegraads brandwonden en FED = 12 tot derdegraads brandwonden en daardoor mogelijk tot overlijden.

1.1.3 Menselijk gedrag

Bij brand in een van de appartementen aan een gang in een appartementengebouw, zullen de aanwezigen in het appartement waar de brand is vluchten via de gang. De bewoners van de andere appartementen moeten eveneens vluchten via de gang. Wanneer dit niet mogelijk is, kunnen zij in hun eigen appartement blijven totdat evacuatie met behulp van de brandweer volgt of, als de omstandigheden het toelaten, hun appartement helemaal niet verlaten.⁴

Personen die vluchten via de gang worden gedurende de verblijftijd op de gang blootgesteld aan de effecten van de rook en de in de rook aanwezige stoffen. De verblijftijd wordt bepaald door de loopsnelheid en de afstand die door de gang wordt afgelegd. De loopsnelheid is ongeveer 1 m/s bij onbelemmerd zicht en verminderd tot ongeveer 0,3 m/s (Yamada, T en Akizuki, 2016, fig. 61.22) bij veel rook met zichtbelemmering en andere effecten zoals genoemd in paragraaf 2.2. De looptijd die in deze studie bij de verschillende brandsimulaties wordt toegepast, is afhankelijk van de rookdichtheid en heeft een waarde tussen 1 m/s en 0,3 m/s. Verder wordt de aanname gemaakt dat de persoon die vlucht de hele gang door dient te lopen (lengte 31,6 m), terwijl de werkelijk af te leggen afstand in veel gevallen korter zal zijn. Dit is dus een enigszins conservatieve aanname.

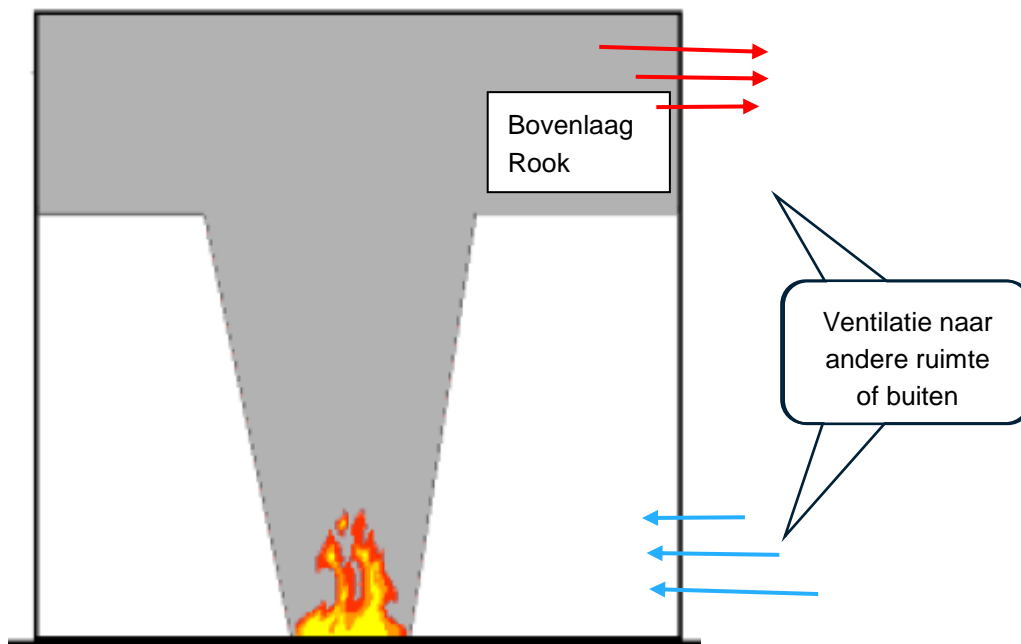
1.2 Rekenmethode

Om een beeld te vormen van de vluchtmogelijkheid en overleefbaarheid zijn in dit onderzoek brandsimulatieberekeningen uitgevoerd met het *Consolidated Model of Fire and Smoke Transport* (CFAST), een rekenmodel voor branduitbreiding en rookverspreiding dat gratis ter beschikking wordt gesteld door het Amerikaanse National Institute of Standards and Technology (NIST) en via de website www.nist.gov te downloaden is (voor een verdere verdieping en achtergronden zie Peacock, Forney, Portier, Reneke, & Jones, 1993). In deze studie is CFAST versie 7.3.0 gebruikt.

Gekeken is naar de factoren die bepalend zijn voor de rookvorming en -verspreiding, zoals genoemd bij de onderzoeksvragen 1, 2 en 3. Daarnaast is in de literatuur onderzocht welke stoffen de (on)bekwaamheid tot vluchten bepalen en bij welke concentratie of dosis de effecten optreden (onderzoeksvragen 4 en 5).

CFAST is een twee-zone model zoals in figuur 1.2 schematisch is weergegeven. Dit betekent dat de ruimten in een bovenlaag en onderlaag worden verdeeld. Rook en andere verbrandingsproducten bevinden zich vooral in de warme bovenlaag. De 'dikte' van de laag varieert gedurende de brand. Daarbij komt de grens tussen de twee lagen (de interface) bij verdere ontwikkeling van de brand steeds lager in de ruimte te 'hangen'. Ook wordt de ruimte, vanaf het plafond naar beneden, steeds meer met rook gevuld.

⁴ Dit wordt 'stay-in-place' of 'stay-put' genoemd. Het principe van stay-in-place wordt alleen geadviseerd wanneer er sprake is van voldoende rookwerendheid, automatische blussing en voldoende garanties dat bewoners ook daadwerkelijk binnen blijven en de deur dicht houden.



Figuur 1.2 Twee-zonemodel

De simulaties met CFAST zijn uitgevoerd met de invoervariabelen zoals weergegeven in bijlage 2. Om de invloed van brandstof, ventilatie naar de buitenlucht en de opening van de deur naar de gang te simuleren, zijn verschillende variaties toegepast:

- De brandstof is cellulose, synthetisch of een mix van beide.
- De spleetbreedte voor de ventilatie naar de buitenlucht is 6,25 cm.
- De deur van het appartement waar het brandt ('brandappartement') naar de gang blijft gesloten.
- De deur naar de gang gaat open op 3 minuten na ontstaan van de brand en wordt 30 seconden daarna weer gesloten.
- De deur naar de gang gaat open op 3 minuten na ontstaan van de brand en blijft dan openstaan.

De hoeveelheid roet, toxische en irriterende stoffen wordt voor een deel bepaald door de zogenoemde yield-parameters. In de literatuur zijn daar waarden voor te vinden, zoals aangegeven in tabel 2-1. Voor de yield-parameter wordt de waarde voor pre-flash-over of post-flash-over gebruikt. Voor het maken van de keuze voor een van die twee is gekeken naar de zuurstofvoorziening van de brand. Is de brand goed geventileerd of ondergeventileerd, met respectievelijk een overmaat of een tekort aan zuurstof voor een volledige verbranding? Als de brand precies de benodigde hoeveelheid zuurstof krijgt voor een volledige verbranding, heet het dat de condities stoichiometrisch zijn.

De mate van ventilatie is bepaald met behulp van de global equivalence ratio (GER) (Gottuk, D.T. and Lattimer, 2016, Chapter 16) en de verhouding van de pyrolyse massa tot de massa die daadwerkelijk verbrandt in het vuur (Massa pyr/verbranding). De GER is de verhouding van de pyrolysemassa en aanvoer van O₂ bij actuele brandcondities in verhouding tot diezelfde verhouding bij stoichiometrische condities:

$$\phi = \frac{\frac{M_{\text{pyrolyse brandstof}}}{M_{O_2}}}{\left(\frac{M_{\text{pyrolyse brandstof}}}{M_{O_2}}\right)_{\text{stoech}}}$$

Waarbij

M massa brandstof of massa O_2

stoech stoichiometrische condities: er is precies voldoende zuurstofaanvoer voor volledige verbranding

GER = 1 er wordt precies de hoeveelheid zuurstof toegevoerd voor volledige verbranding, ofwel de verbranding is stoichiometrisch.

GER < 1 er is een overmaat aan zuurstof (overgeventileerde brand).

GER > 1 er is een tekort aan zuurstof (ondergeventileerde brand).

2 Effecten van rook

In dit onderzoek staan branden in appartementsgebouwen met inpandige gangen centraal. Bij een woningbrand ontstaat rook. Deze rook kan zich verspreiden door de inpandige gangen en andere appartementen. Het is daarom belangrijk om te weten wat de effecten van deze rook kunnen zijn op de overleefbaarheid en de capaciteit om te vluchten. Zoals in de inleiding beschreven, luidt de eerste onderzoeksvraag van deze studie dan ook: *Op welke wijze kan rook de ontvluchting en de overleefbaarheid bij brand belemmeren?*

Logischerwijs ligt er een relatie tussen de brandstof en de verbrandingsproducten (in de vorm van rook). Bekend is dat de inventaris van veel huizen de afgelopen decennia ingrijpend veranderd is. Waar vroeger meubels vooral uit natuurlijke (organische) producten⁵ bestonden, bestaat de inventaris van veel huizen nu voornamelijk uit kunststofproducten⁶. Daarom wordt in deze studie ook gekeken naar de aard van de brandstof in relatie tot de rookvorming. De tweede onderzoeksvraag luidt dan ook: *Welke invloed heeft de aard van de brandstof op de rookvorming?*

2.1 De samenstelling van rook

De samenstelling van de rook (c.q. de verbrandingsproducten) wordt niet alleen bepaald door de aard van de brandstof, maar ook door de mate waarin er sprake is van een volledige verbranding of een onvolledige verbranding. Bij een onvolledige verbranden onder zuurstofarme condities ontstaan bijvoorbeeld meer koolmonoxide en roet (Friedman, 2016, p. 157). Roet (vaste koolstofdeeltjes) vormt de zichtbare component van rook. In tabel 2-1 worden de eigenschappen van de brandstoffen gegeven, voor zover relevant voor brandontwikkeling en vorming van koolmonoxide en roet.

⁵ Bij organische producten kan onder meer gedacht worden aan hout, katoen, wol en leer. Bij de berekeningen wordt uitgegaan van de hoeveelheid cellulose, een stof die veel voorkomt in houtachtige producten.

⁶ Bij de berekeningen wordt voor kunststofproducten uitgegaan van een schuimvulling (zoals bijvoorbeeld in moderne bankstellen wordt toegepast).

Tabel 2-1. Eigenschappen brandstoffen

	Cellulose	Schuimvulling	Mix
Samenstelling	$C_4H_6O_3$	$C_9H_{16}O_3N_{1.4}$	
Genormaliseerde samenstelling	$CH_{1.5}O_{0.75}$	$CH_{1.76}O_{0.367}N_{1.57}$	$CH_{1.63}O_{0.558}N_{0.0785}$
Verbrandingswarmte MJ/kg	14 ^[1]	24.4 ^[3]	19.2
Tijdsconstante t_c s	300 ^[4]	150 ^[4]	212
CO yield pre flashover g/g	0.018 ^[2]	0.014 ^[3]	0.016
CO yield post flashover g/g	0.17 ^[2]	0.051 ^[3]	0.11
Soot yield pre flashover g/g	0.018* ^[2]	0.10 ^[3]	0.575
Soot yield post flashover g/g	0.034 ^[2]	0.21 ^[3]	0.122
HCN Fraction of notional yield. Pre flashover		0.00181 ^[3]	0.00181 ^[3]
HCN Fraction of notional yield. Post flashover		0.078 ^[3]	0.078 ^[3]

^[1] NEN, 2011

^[2] Khan, MM, Tewarson, A and Chaos, 2016, p. 1211⁷

^[3] Gann, 2009⁵

^[4] Herpen, 2007

Toelichting bij de tabel:

Genormaliseerde samenstelling – de chemische molecuulformule is genormaliseerd op één C atoom per molecuuleenheid.

Verbrandingswarmte – energie die vrijkomt bij verbranding in MJ per kg brandstof.

t_c tijdsconstante voor kwadratische branduitbreidingsnelheid, gemiddeld $t_c = 300$ s, snel $t_c = 150$ s.

Yield – de opbrengst van CO of soot (roet) in gram per gram brandstof.

Fraction of notional yield – correctiefactor waarmee uit maximale yield de werkelijke yield volgt (volgens de model).

Bij de simulaties met CFAST is de hoeveelheid CO en roet direct afhankelijk van de yield parameter. Die wordt Immers uitgedrukt in de hoeveelheid CO of roet die wordt geproduceerd per hoeveelheid brandstof die pyrolyseert. Wat HCN betreft, is de aanname dat alle in de brandstof(moleculen) aanwezige stikstof (N) wordt omgezet in HCN (Peacock, Forney, & Reneke, 2015, p. 14). Dit resulteert in de maximale productie van HCN (de zogenoemde notional yield). In de resultaten in deze studie is dit gecorrigeerd met de 'fraction of notional yield' parameter.

De brand wordt in de CFAST simulaties gemodelleerd als een brand midden in het brandappartement. Na ontstaan volgt er kwadratische branduitbreiding⁸ conform vergelijking 2-1. In de praktijk heeft een brand vaak een startfase waarin tragere uitbreiding plaatsvindt. De brand kan uitbreiden tot 5 m², waarbij de vermogensdichtheid in een woonfunctie 250 kW/m² bedraagt (NEN, 2011, sec. bijlage E)⁹. De brand kan zich dus uitbreiden tot een vermogen van 1250 kW is bereikt. Vanaf dat moment wordt het vermogen constant gehouden. In de praktijk kan er flash-over naar andere brandbare zaken in de kamer plaatsvinden; het brandvermogen blijft dan ook in stand, wellicht met een andere waarde voor het vermogen. Ook kan de oorspronkelijke brand uitdoven doordat de brandstof opraakt of doordat er een gebrek aan zuurstof komt.

⁷ In de literatuur worden ook andere waarden gevonden, vooral voor HCN. Deze waarden hangen af van de specifieke brandcondities (over- of ondergeventileerd) en de samenstelling van de brandstof.

⁸ Kwadratische branduitbreiding: de brand breidt zich uit over het oppervlak van het brandende voorwerp. De diameter van de brand neemt per tijdseenheid met een constante afstand toe (D), het oppervlak van de brand neemt dan toe met D².

⁹ De keuze voor 5 m² voor het oppervlak dat door een brand wordt bereikt in een appartement betreft een inschatting van de onderzoekers, maar is arbitrair.

Vergelijking 2-1. Brandvermogen bij kwadratische branduitbreiding

$$Q = 1000 \cdot \left(\frac{t}{t_c}\right)^2$$

Met

Q	brandvermogen	kW
t	tijd vanaf ontstaan brand	s
t_c	tijdsconstante	s

t_c is de tijd waarop de brand een vermogen bereikt van 1 MW (1000 kW).

2.2 Soorten effecten

2.2.1 Toxisch effect

Bij iedere woningbrand ontstaat koolmonoxide (CO)¹⁰ en dit is dan ook een belangrijke factor in de toxiciteit van de rook (Purser, 2016, p. 2215). CO bindt aan hemoglobine in het bloed¹¹ en verhindert daardoor de zuurstofopname in het lichaam en vooral de hersenen. Afhankelijk van de samenstelling van de brandstof kunnen er ook nog andere toxische stoffen ontstaan. Met name bij brand van kunststoffen waarin stikstof of chloor aanwezig is, speelt dit een rol. Bij aanwezigheid van stikstof kan er waterstofcyanide (HCN) ontstaan en bij chloor kan er zoutzuur (HCl) gevormd worden. Net als koolmonoxide beïnvloedt HCN de zuurstofopname (National Research Council, 2002, p. 211). Het toxische effect van HCN wordt sneller bereikt dan dat van CO (Purser, David A. and McAllister, 2016, p. 2357).

HCl heeft bij blootstelling een irriterende werking: het veroorzaakt irritatie en pijn aan ogen en luchtwegen. Bij een hoge concentratie wordt de ademhaling ernstig gehinderd¹² (Purser, 2016, p. 2249).

2.2.2 Warmte-effect

Het warmte-effect bij brand is voor de hand liggend. Aanwezige personen kunnen worden blootgesteld aan directe warmtestraling van de brand en straling van hete rook. Ook kan er direct contact zijn met hete rook. Alle drie deze vormen kunnen leiden tot verbranding van huid en luchtwegen. Bij lagere temperaturen (vochtige lucht 80 °C en droge lucht 120 °C) en lange blootstelling (15 minuten of meer) kan ook al verhoging van de lichaamstemperatuur optreden (Purser, David A. and McAllister, 2016, p. 2374). Deze verhoogde lichaamstemperatuur kan leiden tot bewusteloosheid.

¹⁰ Bij iedere brand die niet bedoeld is, zoals de brand van huisinventaris, is de verbranding in het algemeen niet volledig. Er is onvoldoende zuurstoftoevoer naar iedere plek van de brand en daardoor ontstaat CO. Alleen bij verbranding in daarvoor ontworpen apparatuur, zoals de gasvlam van een CV-installatie, is de zuurstofvoorziening en daarmee de verbranding dermate volledig dat er niet of nauwelijks CO ontstaat.

¹¹ CO bindt zich aan hemoglobine in het bloed en verhindert de zuurstofopname. Hoewel dit het belangrijkste effect is, kunnen, afhankelijk van de CO-concentratie, ook andere effecten een rol spelen.

¹² Naast HCl kunnen er ook andere stoffen in de rook aanwezig zijn die gelijksoortige effecten hebben, zoals HBr, HF, SO₂, acroleïne en formaldehyde (Purser, 2016, p. 2261). In het algemeen komen deze stoffen in geringere concentratie voor dan HCl, maar gezamenlijk kunnen ze wel een bijdrage leveren aan het irriterende effect van rook.

2.2.3 Zichtbelemmering

Ook zichtbelemmering door de rook die ontstaat bij brand is een voor de hand liggend effect. Door zichtbelemmering is het voor aanwezige personen die proberen te ontluchten moeilijk om zich te oriënteren, waardoor het vinden van de weg naar een veilige locatie wordt bemoeilijkt. Ook neemt de loopsnelheid af (Yamada, T en Akizuki, 2016, fig. 61.22), waardoor de blootstelling aan de toxische stoffen en warmte langer duurt. De onder 2.2.1 genoemde irriterende effecten op de ogen kunnen het zicht eveneens verminderen.

2.3 Effecten op kwetsbare groepen

Bij sommige groepen treden de effecten van hitte en rook sneller op dan gemiddeld en kunnen deze effecten bovendien ernstiger zijn. Ouderen hebben bijvoorbeeld een dunnere huid dan jongeren, waardoor brandwonden bij ouderen ernstiger kunnen zijn. Daarbij komt dat ouderen vaak een verminderd coördinatievermogen hebben en een verminderde reactietijd (Brandweeracademie & Nederlandse Brandwonden Stichting, 2015).

Iets soortgelijks geldt voor de effecten van koolmonoxide. Ouderen zijn, net als bijvoorbeeld kleine kinderen, mensen met hart- en longaandoeningen en mensen die bepaalde medicijnen of drugs gebruiken, gevoeliger voor koolmonoxide dan de gemiddelde populatie (WHO, 1999). Deze constatering onderstreft de keuze om voor deze kwetsbare groepen een lagere FED en FEC-waarde te hanteren.

3 De resultaten van de simulaties

Door het uitvoeren van de simulaties met behulp van CFAST, kunnen de volgende onderzoeksvragen worden beantwoord:

3. *Welke invloed op de rookverspreiding hebben enerzijds het openen van de deur van het appartement naar de gang en anderzijds de tijd dat de deur geopend blijft?*
4. *Welke effecten van rook treden op bij een gemiddelde bevolking?*
5. *Welke effecten van rook treden op bij een kwetsbare groep?*

De simulaties worden in twee stappen uitgevoerd. Na de eerste 'run' wordt beoordeeld hoe de global equivalence ratio (GER, zie paragraaf 1.2) verloopt in combinatie met de verhouding massa pyrolyse / massa verbranding. Op basis daarvan wordt bepaald of in de loop van de brandduur de yield van CO en roet overgaat van pre-flash-overfase in post flash-overfase.

De gesimuleerde brandduur is gelimiteerd tot 30 minuten. Binnen deze tijd kan worden beoordeeld of veilig vluchten via de gang mogelijk is of dat kamer 2 een veilige locatie blijft.

Bij wijze van voorbeeld zijn in bijlage 3 de details van één van de simulaties weergegeven. De details van de overige simulaties zijn indien gewenst op te vragen bij het IFV.

In dit onderzoek zijn een aantal variaties in CFAST ingevoerd (zie tabel 3-1). In bijlage 3 zijn de tijdstippen weergegeven waarop de FED en FEC overschreden worden.

Tabel 3-1 CFAST simulaties

Simulatie	Brandstof	Deur
S517	Cellulose	blijft dicht
S515	Cellulose	3 min / 30 s
S510	Cellulose	3 min + open
S519	Mix	blijft dicht
S504	Mix	3 min / 30 s
S516	Mix	3 min + open
S518	Schuimvulling	blijft dicht
S514	Schuimvulling	3 min / 30 s
S513	Schuimvulling	3 min + open

Toelichting:

- > 'blijft dicht' betekent dat de deur blijft gedurende de hele brand gesloten blijft.
- > '3 min / 30 s' betekent dat de deur open gaat na 3 minuten en 30 seconden later weer dicht gaat.
- > '3 min + open' betekent dat de deur open gaat na 3 minuten en vervolgens open blijft staan.

Bij alle simulaties is voor de ventilatie van het brandappartement naar de buitenlucht uitgegaan van een ventilatiespleet van 6,25 cm.

In geval van brand is er een onderscheid te maken tussen de bewoners van het appartement waar de brand ontstaat (kamer 1 in de simulaties) en de bewoners van de overige appartementen (de niet-brand-appartementen, kamer 2 in de simulaties).

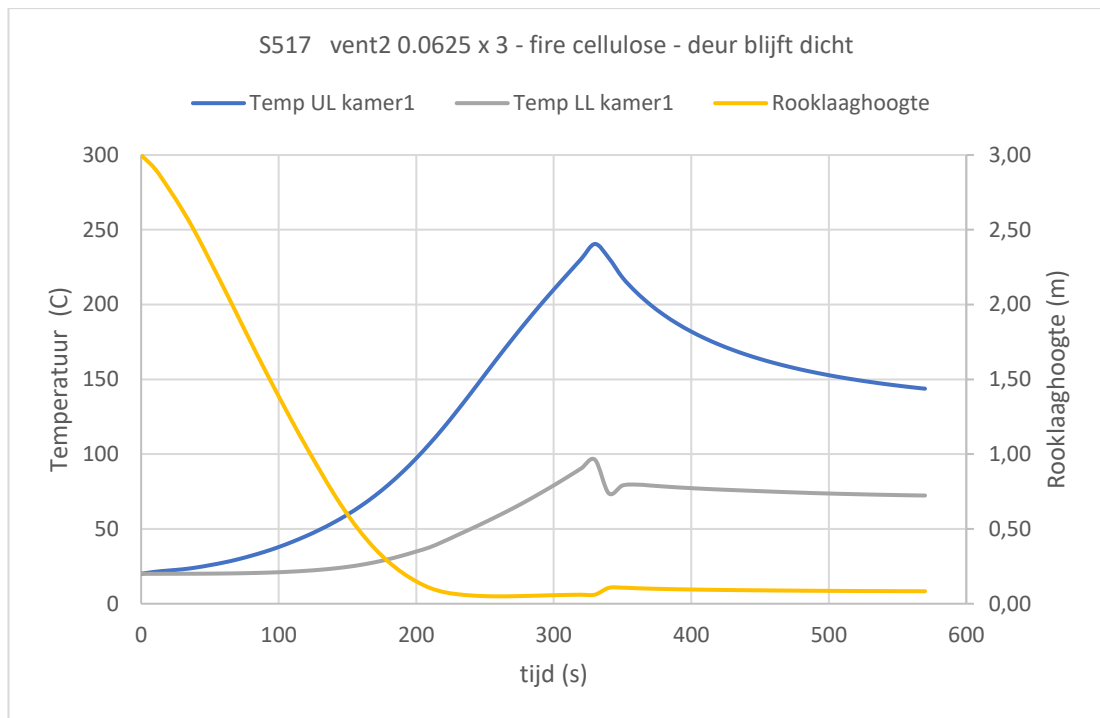
De resultaten van de simulaties zijn uit te drukken als FED en FEC-waarden voor de verschillende agentia: CO, HCN, rook (en bijbehorende zichtlengte) en irriterende stoffen. De temperatuur blijkt niet maatgevend te zijn voor de ontvluchtingsmogelijkheden en is om die reden niet meegenomen.

Van de getoonde resultaten in bijlage 3 zijn uiteindelijk de FED, FEC en FED IN (irritants) die worden bereikt van belang. Voor personen aanwezig in kamer 2 (een ander appartement dan het appartement waarin de brand ontstaat) gaat het om de FED-FEC waarden gedurende de hele tijd die zij aanwezig zijn, dus vanaf het begin van de brand (zie tabel 3-2). Voor personen die uit kamer 2 vluchten over de gang gaat het om de looptijd over de gang waarin zij worden blootgesteld aan de rook en waarbij zij een bepaalde FED of FEC waarde bereiken (zie tabel 3-3).

3.1.1 Brandappartement

Personen die aanwezig zijn in het appartement waar de brand woedt (het 'brandappartement'; kamer 1) zullen dit appartement snel moeten verlaten. Binnen enkele minuten is de kamer gevuld met rook, vanaf het plafond tot minder dan 1 meter boven de grond. De temperatuur van de rook loopt dan op tot 100 °C na circa 3 minuten en 200 °C na 5 minuten (zie

figuur 3.1). Als voor de brandstof een synthetisch materiaal wordt genomen (meubel schuimvulling, zie bijlage 3.2) worden die waarden eerder bereikt: na circa 90 s. is de rook gezakt tot 1 m en na 160 s. is de temperatuur meer dan 200 °C. Als deze condities zijn bereikt is de overleefbaarheid in het appartement gering en wordt vluchten sterk gehinderd.



Figuur 3.1 Conditie in brandappartement, cellulose brandstof

Toelichting:

De blauwe lijn hoort bij de linker as en geeft de temperatuur van de bovenste (rook)laag weer (de 'upper layer' of UL). De grijze lijn hoort ook bij de linker as en geeft de temperatuur van de onderste 'koude' laag aan (de 'lower layer' of LL). De gele lijn hoort bij de rechter as en geeft de rooklaaghoogte aan. Te zien is dat de rook al na ongeveer 200 seconden vrijwel de gehele ruimte vult. Vanaf die tijd is de temperatuur van de 'koude' laag (de grijze lijn) niet meer relevant.

3.1.2 Niet-brandappartement

Bewoners van het appartement waar geen brand is (het 'niet-brandappartement'; kamer 2) kunnen worden gealarmeerd door rookmelders of doordat ze rook waarnemen. Welk gedrag die bewoners vervolgens zullen vertonen is moeilijk te voorspellen. Sommigen zullen direct proberen te vluchten, terwijl anderen in hun appartement zullen blijven, bijvoorbeeld omdat ze geen mogelijkheid (meer) hebben om te vluchten of doordat ze een andere inschatting maken. Als ze in hun appartement blijven worden ze blootgesteld aan de rook die daar binnendringt via kieren van de deur en wellicht andere ventilatieopeningen. Zoals in het eerste hoofdstuk is aangegeven, is in deze studie alleen rekening gehouden met kieren van de deur. De totale lekkage is gesteld op 1 % van het deuropervlak.

De condities in kamer 2 zijn uiteraard afhankelijk van de brandomstandigheden in kamer 1. Van invloed hierop zijn de aard van de brandstof en mate van ventilatie (ofwel wanneer en hoelang de deur van kamer 1 naar de gang geopend is). In figuur 3.2 is aangegeven op welk tijdstip na aanvang van de brand de FED en FEC worden overschreden. Hieronder volgt een korte beschrijving van de verschillende brandscenario's (horende bij de betreffende simulaties).

S515 brandstof cellulose, deur blijft dicht

S517 brandstof cellulose, deur kamer 1 open op 3 min. en 30 s. daarna weer dicht

In beide gevallen worden de FED en FEC in kamer 2 niet overschreden.

S510 brandstof cellulose, deur kamer 1 open op 3 min. en blijft open

FED-IN¹³ en FEC-smoke¹⁴ worden overschreden. Voor de meest kwetsbare groep op 12:20 min (FED IN = 0,1) en na bijna 30 min. wordt ook de FED IN = 1 limiet bereikt. Dit geldt ook voor rookhinder (FEC smoke = 0,1 op bijna 6 min. en FEC smoke = 1 op bijna 16 min.). Na verloop van 30 minuten leidt dit in kamer 2 tot kans op vluchtonbekwaamheid en bewusteloosheid, zeker van de meest kwetsbare personen.

S519 brandstof mix, deur blijft dicht

FED en FEC limieten in kamer 2 worden niet overschreden.

S504 brandstof mix, deur open op 3 min. en 30 s. daarna weer dicht

Er is geringe rookhinder in kamer 2, FEC smoke = 0,1 wordt na 12 min. overschreden. Geen andere limiet wordt overschreden.

S516 brandstof mix, deur open op 3 min. en blijft open

De FED IN limieten 0,1 en 0,3 worden overschreden en ook alle FEC smoke limieten. FED IN = 0,1 op 12:40 min. en FED IN = 0,3 op bijna 18:30 min.. Hiermee gepaard gaat ook rookhinder (FEC smoke = 0,1 op 4 min. en FEC smoke = 1,3 op 8:30 min.). Voor kwetsbare personen kan dit na bijna 13 min. in kamer 2 leiden tot vluchtonbekwaamheid en bewusteloosheid. Rookhinder begint al op 4 min. en is zeer ernstig na ruim 8 min..

S518 brandstof schuimvulling, deur blijft dicht

Er treedt geringe tot matige rookhinder op (FEC smoke = 0,1 op 15:20 min. en FEC smoke = 0,3 op 24:20 min.).

S514 brandstof schuimvulling, deur open op 3 min. en 30 s. daarna weer dicht

De meeste rooklimieten worden overschreden (FEC smoke = 0,1 op 3:50 min. en FEC smoke = 1 op 27:20 min.) met als gevolg dat er na 27 min. een sterke rookhinder is in kamer 2.

S513 brandstof schuimvulling, deur open op 3 min. en blijft open

FED IN 0,1 en 0,3 en alle FEC smoke limieten worden overschreden. FED IN = 0,1 op 15 min. en FED IN = 0,3 op 21:30 min.. Hiermee gepaard gaat ook rookhinder (FEC smoke = 0,1 op 3:50 min. en FEC smoke = 1,3 op 8:10 min.). Na ruim 21 min. kan dit in kamer 2 leiden tot vluchtonbekwaamheid en bewusteloosheid. En voor kwetsbare personen is dit al het geval na 15 min..

¹³ FED-IN betreft de irriterende/verstikkende stoffen.

¹⁴ FEC-smoke betreft de hinder door rook.

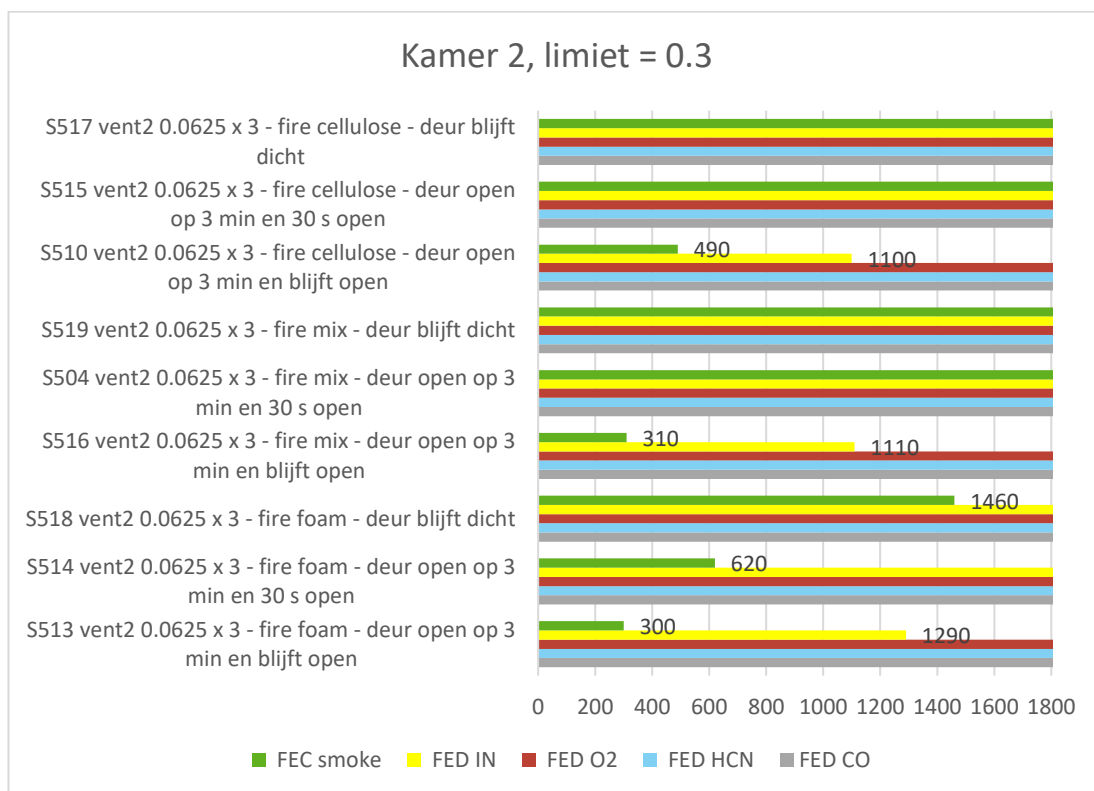
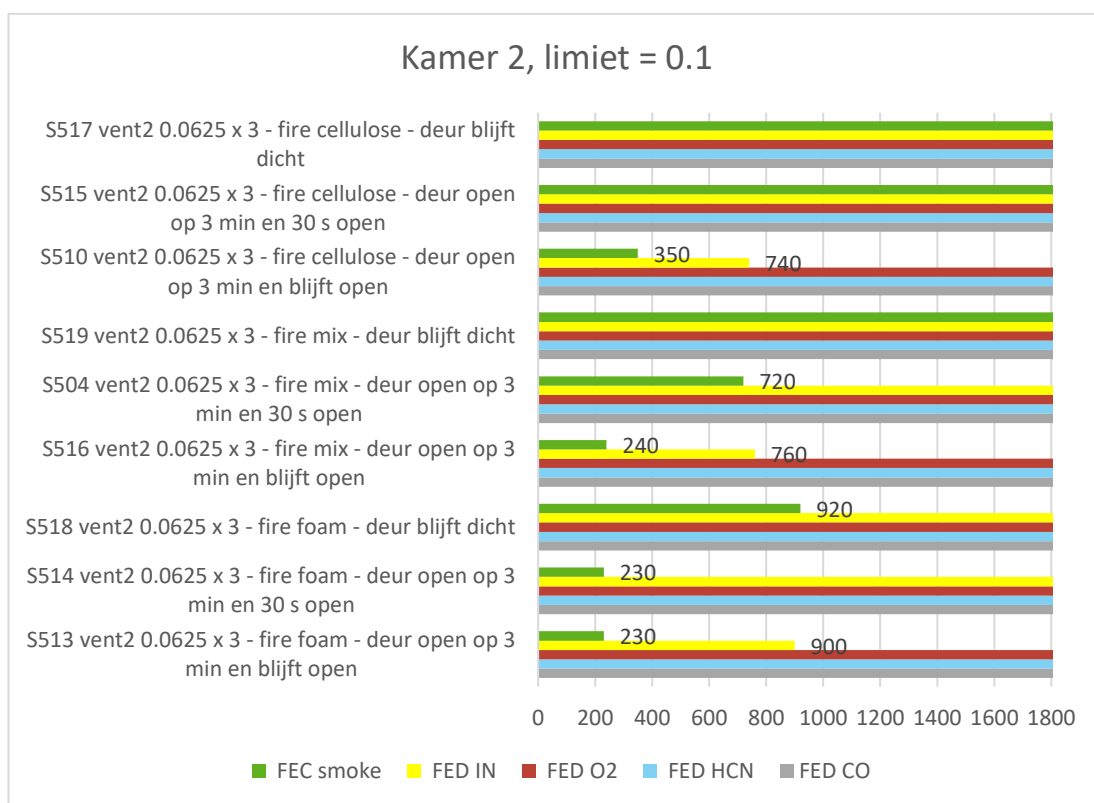
Toelichting bij onderstaande figuur 3.2.

In deze figuur is aangegeven op welk tijdstip na aanvang van de brand de betreffende FED en FEC limieten worden overschreden. Hoe korter de staaf, hoe sneller de limiet wordt overschreden. Als de staaf doorloopt tot (meer dan) 1800 s. wordt de limiet niet overschreden gedurende die tijd.

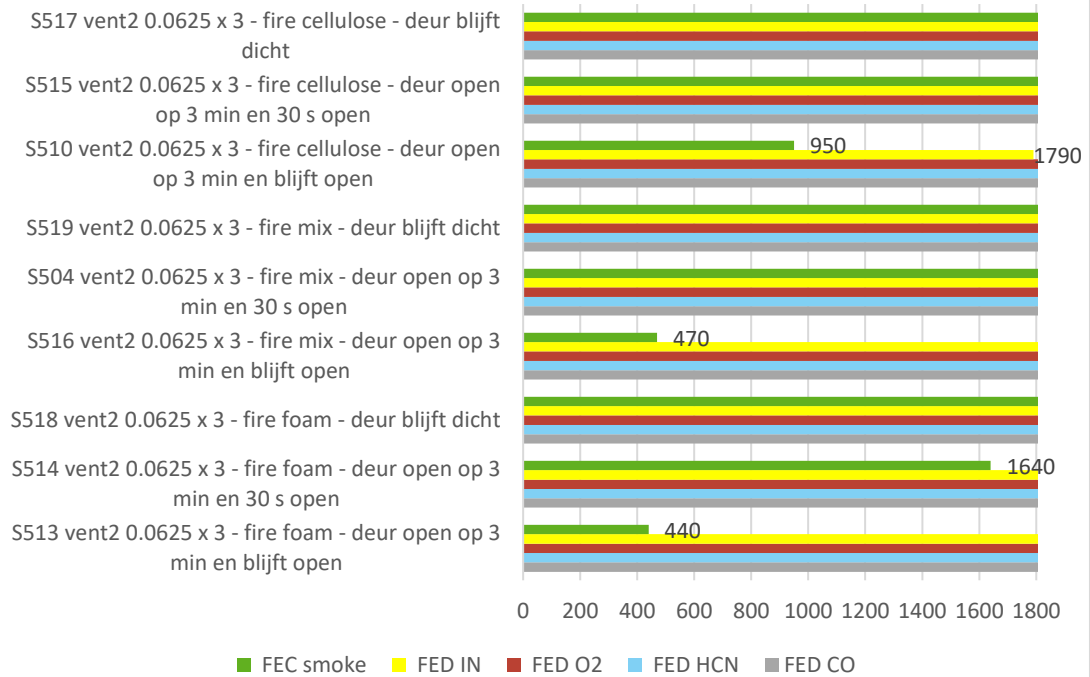
Zo is bijvoorbeeld te zien dat bij een brand met houtachtige producten ('cellulosebrand') met gesloten deur (S517) voor geen enkele FED of FEC de limieten worden overschreden. Ook is te zien dat bij een schuimbrand met een deur die open gaat na 3 minuten en open blijft staan (s513), voor smoke de FEC limiet = 1 wordt overschreden bij 440 s. (7:20 min.).

De FED O₂, de FED HCN en de FED CO worden in geen enkel geval overschreden. Zie verder bijlage 1.

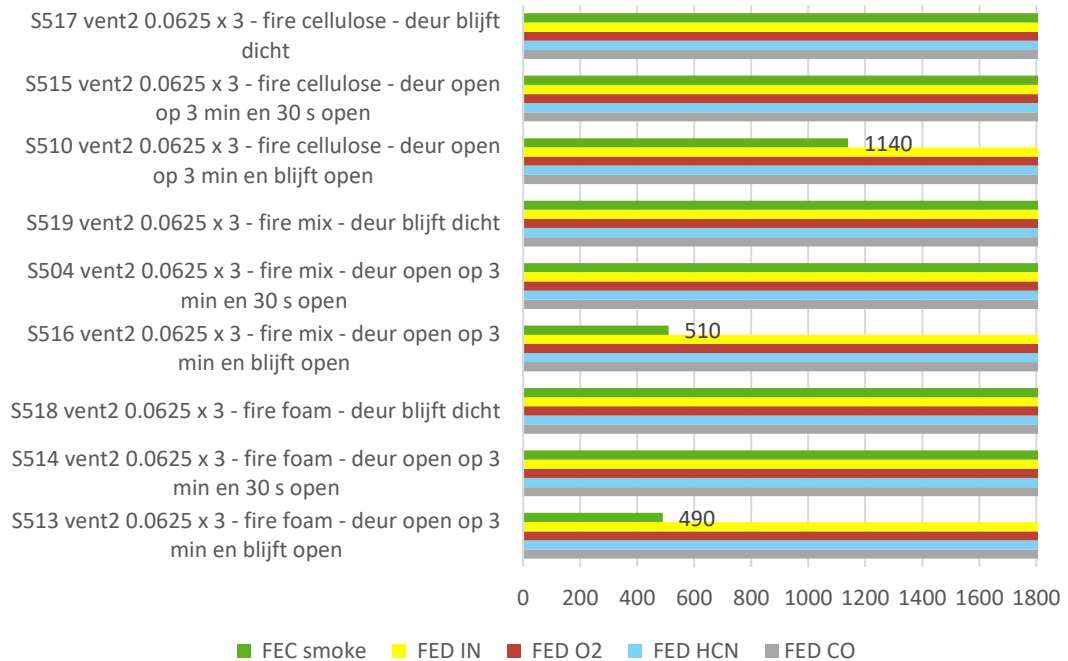
Figuur 3.2 Overschrijding FED en FEC in kamer 2



Kamer 2, limiet = 1



Kamer 2, limiet = 1.3



3.1.3 Vluchten via de gang

Voor het vluchten via de gang is het uitgangspunt dat de aanwezige persoon in kamer 2 drie minuten na aanvang van de brand kamer 2 verlaat en een bepaalde looptijd heeft over de gang (zie paragraaf 1.1.3). De looptijd hangt af van de loopsnelheid en de lengte van de gang. De loopsnelheid hangt onder meer af van de optische dichtheid (OD of 'optical density') op het moment dat de gang wordt betreden (Yamada, T en Akizuki, 2016, fig. 61.22). Hoe groter de OD, hoe minder zicht er is. De OD neemt na het betreden van de gang alleen nog maar toe en daarmee neemt de loopsnelheid af. Vandaar dat voor de loopsnelheid op het moment dat de gang wordt betreden een conservatieve inschatting is gemaakt. In tabel 3-2 zijn de OD, de loopsnelheid en de resulterende verblijftijd in de gang voor de verschillende simulaties weergegeven. Bij de cellulosebranden komen geen irriterende stoffen vrij, zoals kan worden opgemaakt uit de linker curve van Yamada. Voor de branden met schuimvulling als brandstof geldt de rechter curve.

Tabel 3-2 Verblijftijd in de gang bij evacuatie

Simulatie	Brandstof	Deur	OD (1/m)	Loopsnelheid (m)	Verblijftijd (s)
S517	Cellulose	blijft dicht	0,068	1	30
S515	Cellulose	3 min / 30 s	0,21	1	30
S510	Cellulose	3 min + open	0,84	0,5	60
S519	Mix	blijft dicht	0,33	1	30
S504	Mix	3 min / 30 s	1,3	0,3	110
S516	Mix	3 min + open	4,5	0,3	110
S518	Schuimvulling	blijft dicht	0,62	0,3	110
S514	Schuimvulling	3 min / 30 s	5,6	0,3	110
S513	Schuimvulling	3 min + open	7,6	0,3	110

Toelichting:

- > met 'Deur' wordt de deur van het brandappartement naar de gang bedoeld.
- > 'blijft dicht' betekent dat de deur gedurende de hele brand gesloten blijft.
- > '3 min / 30 s' betekent dat de deur open gaat na 3 minuten en 30 seconden later weer dicht gaat.
- > '3 min + open' betekent dat de deur open gaat na 3 minuten en vervolgens open blijft staan.

Als gevolg van die verblijftijd resulteert de blootstelling aan de rook op de gang in de FED en FEC-waarden die weergegeven zijn in tabel 3-3. Bij vluchten over de gang is er hinder in de situaties waarbij de waarden de FEC en FED-limieten (0,1 – 0,3 – 1 – 1,3) overschrijden. In alle in tabel 3-3 genoemde scenario's is dat in meer of mindere mate het geval. Per simulatie zijn de resultaten als volgt:

S517: brandstof cellulose, deur kamer 1 wordt niet geopend

Er is weinig kans op vluchtonbekwaamheid. Wel kunnen zowel personen uit de meest kwetsbare groep als die uit een gemiddelde bevolking enige hinder ondervinden van de rook. FEC smoke loopt op van 0,4 tot 0,54 gedurende de looptijd op de gang.

S515: brandstof cellulose, deur kamer 1 open op 3 min. en 30 s. daarna weer dicht

Weinig kans op vluchtonbekwaamheid, maar wel veel hinder door rook. FEC smoke loopt op van 1,1 tot 1,2.

S510: brandstof cellulose', deur kamer 1 open op 3 min. en blijft open

FED IN (verstikkende stoffen) is 0,36. De meest kwetsbare groep heeft gereede kans op vluchtonbekwaamheid. Dit geldt ook voor een klein deel van de algemene bevolking. De hinder door de rook is ernstig: FEC smoke loopt op van 4,7 tot 7,8.

S519 brandstofmix, deur kamer 1 blijft dicht

In de gang is zeer sterke rookhinder, FEC smoke loopt van 1,7 tot 1,8. De kans op vluchtonbekwaamheid gering. FED IN is ongeveer 0,01.

S504 brandstofmix, deur kamer 1 open op 3 min. en 30 s. daarna weer dicht

Er is zeer ernstige rookhinder, FEC smoke loopt op van 6,8 tot 7,7. Vluchten zal op de tast moeten gaan. De hinder door verstikkende stoffen is ernstig; kwetsbare personen en een klein deel van de algemene bevolking hebben kans op vluchtonbekwaamheid. FED IN is ongeveer 0,3.

S516 brandstofmix, deur kamer 1 open op 3 min. en blijft open

Er is zeer ernstige hinder door rook, FEC smoke loopt op van 25 naar 45. Bij vluchten via de gang is er nagenoeg geen zicht. De hinder door verstikkende stoffen is zeer ernstig. FED IN is 1; er is een gereede kans op vluchtonbekwaamheid, zeker voor kwetsbare personen.

S518 brandstof schuimvulling, deur kamer 1 blijft dicht

Er is ernstige rookhinder, FEC smoke loopt op van 3,4 tot 5,8. De kans op vluchtonbekwaamheid gering. FED IN is 0,06.

S514 brandstof schuimvulling, deur kamer 1 open op 3 min. en 30 s. daarna weer dicht

Er is zeer ernstige hinder door rook, FED smoke loopt op van 28 naar 31. Bij vluchten via de gang is er nagenoeg geen zicht. De hinder door verstikkende stoffen is ernstig, FED IN is 0,8. Er is een gereede kans op vluchtonbekwaamheid, zeker voor kwetsbare personen.

S513 brandstof schuimvulling, deur kamer 1 open op 3 min. en blijft open

Er is zeer ernstige hinder door rook, FEC smoke loopt op van 40 naar 63. Bij vluchten via de gang is er nagenoeg geen zicht. De hinder door verstikkende stoffen is ernstig; FED IN is 0,7. Er is een gereede kans op vluchtonbekwaamheid, zeker voor kwetsbare personen.

Tabel 3-3 FED en FEC bij looptijd over de gang

Simulatie - scenario		looptijd door gang (s)	FED CO gang	FED HCN gang	FED IN gang	FEC smoke gang (min)	FEC smoke gang (max)
S517	fire cellulose deur blijft dicht	30	0.0012		0.0249	0.3981	0.5371
S515	fire cellulose deur open op 3 min en 30 s open	30	0.0014		0.0308	1.09	1.21
S510	fire cellulose deur open op 3 min en blijft open	60	0.0112		0.3642	4.73	7.79
S519	fire mix deur blijft dicht	30	0.0007		0.0155	1.69	1.84
S504	fire mix deur open op 3 min en 30 s open	110	0.0072	0.0079	0.3376	6.77	7.75
S516	fire mix deur open op 3 min en blijft open	110	0.0278	0.0001	1.08	24.8	44.9
S518	fire foam deur blijft dicht	110	0.0023	0.0004	0.057	3.44	5.78
S514	fire foam deur open op 3 min en 30 s open	110	0.0165	0.0197	0.8071	28.5	31.1
S513	fire foam deur open op 3 min en blijft open	110	0.0209	0.0001	0.6883	40.5	62.7

Bij alle simulaties wordt de gang betreden vanuit kamer 2, op 3 minuten na aanvang van de brand in kamer 1. De ventilatiespleet van kamer 1 naar de buitenlucht is steeds 6,25 cm breed en kamerhoog (3 m).

Uit deze tabel valt op te maken dat een persoon die na drie minuten probeert te vluchten, hier waarschijnlijk niet meer toe in staat zal zijn. Alleen al de FEC smoke ligt dan dusdanig hoog dat zowel extra kwetsbare als gemiddeld kwetsbare personen vluchtonbekwaam zijn geworden.

4 Discussie en conclusies

4.1 Discussie

In deze studie is gekeken naar de wijze waarop rook zich verspreidt bij een brand in een appartementencomplex met inpandige gangen. Bovendien is gekeken naar de effecten van deze rookverspreiding op de ontvluchtingsmogelijkheid van bewoners. Daarbij is gekeken naar zowel een gemiddelde populatie als naar een extra kwetsbare populatie.

De scenario's zijn opgebouwd aan de hand van:

1. Het open of dicht blijven van de deur van het brandappartement
2. De aard van de brandstof (cellulose of schuim).

De kwetsbaarheid van bewoners is uitgedrukt in de FEC en de FED. Een FEC of FED heeft voor de gemiddelde bevolking de waarde 1, maar voor een kwetsbare groep is een lagere waarde aangehouden: 0,3 of zelfs 0,1. Of deze waarde reëel is, hangt uiteraard af van hoe kwetsbaar de bewoners feitelijk zijn. In deze studie is uitgegaan van een kwetsbare groep (senioren) waarvoor een waarde van 0,3 geldt.

De resultaten van de simulaties zijn uiteraard erg afhankelijk van de keuzes die gemaakt zijn voor de invoerparameters. Dat geldt dus ook voor de stoffen die ontstaan en de hoeveelheid daarvan. Hiervoor is uiteraard zo dicht mogelijk aangesloten bij de praktijk, maar deze inschatting blijft een arbitrair karakter houden. De moeilijkheid die daarbij optreedt, is dat in de literatuur de spreiding van de yield parameters (bijvoorbeeld productie van het aantal gram CO per gram verbrande brandstof) groot is. Dit geldt ook voor de afhankelijkheid van de yield parameters van de aard van de verbranding (zuurstofrijk of -arm, pre flash-over fase of post flash-over fase).

Bij de start van deze studie was nog niet bekend dat in de tweede helft van 2019 praktijkexperimenten gehouden zullen worden in een appartementencomplex met inpandige gangen in Oudewater. Het doel van deze experimenten is om rookverspreiding in de praktijk te onderzoeken en de modelmatige berekeningen te valideren. Deze praktijkexperimenten kunnen het inzicht in rookverspreiding verder verdiepen en nuanceren.

4.2 Conclusie

Met de resultaten zoals weergegeven in hoofdstuk 3 kunnen de onderzoeksvragen als volgt worden beantwoord.

4.2.1 Op welke wijze kan rook de ontvluchting en de overleefbaarheid bij brand belemmeren?

De rook van een brand kan op verschillende manieren de ontvluchting en de overleefbaarheid negatief beïnvloeden. In het brandappartement is er al heel snel een dichte rooklaag aanwezig. Afhankelijk van de deurbewegingen van dit brandappartement naar de

gang, breidt de rook zich meer of minder snel uit naar de gang. Ook in het niet-brandappartement veroorzaakt de rook enige tot ernstige hinder, afhankelijk van de aard van de brandstof en de genoemde deurbewegingen. Zoals in paragraaf 2.2 is aangegeven, kunnen de volgende effecten worden onderscheiden:

Toxisch effect

De belangrijkste stoffen in de rook die een toxisch effect hebben zijn CO (koolmonoxide) en HCN (blauwzuur). Bij beide stoffen wordt het effect bepaald door de dosis die iemand binnen krijgt, en die wordt op haar beurt bepaald door een combinatie van tijd en concentratie. CO komt bij iedere brand voor. Bij beperkte zuurstofaanvoer (ventilatiebeperkte brand) ontstaat er meer CO dan bij een goed geventileerde brand. HCN ontstaat als er stikstof aanwezig is in de moleculaire samenstelling van de brandstof, zoals bijvoorbeeld in de polyurethaanschuimen die gebruikt worden in veel meubels. CO en HCN verhinderen de opname van zuurstof in het bloed. Minder zuurstof in het bloed betekent minder zuurstof in de hersenen, waardoor hersenfuncties verminderen en bewusteloosheid kan optreden, zodat getroffen personen niet meer in staat zijn om te vluchten. Wanneer het zuurstoftekort aanhoudt, kan men hieraan komen te overlijden.

Irriterend effect

Verschillende stoffen, waaronder vooral zure stoffen zoals HCN (blauwzuur) en HCl (zoutzuur) maar ook stoffen als acroleïne en formaldehyde hebben een irriterende werking. Ze prikkelen ogen en luchtwegen waardoor zichtbeperking en moeilijkheden met de ademhaling kunnen optreden. Hierdoor wordt de ontvluchting bemoeilijkt, waardoor de blootstelling aan andere negatieve effecten van de brand langer kan duren. HCl kan alleen worden gevormd als er Cl (chlor) aanwezig is in de brandstof, wat met name het geval is bij PVC (polyvinylchloride) in meubels of kabels. Acroleïne en formaldehyde zullen in het algemeen worden gevormd bij een brand, maar de hoeveelheden en de bijbehorende effecten van die twee stoffen zullen in het algemeen waarschijnlijk gering zijn ten opzicht van bijvoorbeeld HCN.

Warmte-effect

Warmte-effecten zullen vooral optreden bij aanwezigen in het appartement waar de brand is. Warmte-effecten treden op door warmtestraling van de brand, maar vooral ook door straling vanuit de warme rook en opgewarmde oppervlakken (zoals warm geworden muren). Naast warmteoverdracht door straling speelt ook de convectieve warmteoverdracht een rol. Personen kunnen in direct contact komen met de rook en kunnen deze ook inademen. De warmteblootstelling kan leiden tot verbranding van de blootgestelde huid en de luchtwegen, waardoor de vluchtmogelijkheden en de overleefbaarheid ernstig negatief beïnvloed kunnen worden. Voor bewoners van andere appartementen dan die van het brandappartement zijn deze effecten marginaal.

Zichtbeperking

Zichtbeperking wordt veroorzaakt door roet in de rook en vermindert de efficiëntie van een vlucht. Het lopen wordt vertraagd en het vinden van de juiste richting bemoeilijkt. Het gevolg is een langer verblijf in de vluchtweg, bijvoorbeeld de gang, en daarmee een langduriger blootstelling aan de rook met alle bovengenoemde effecten.

4.2.2 Welke invloed heeft de aard van de brandstof op de rookvorming?

In de simulaties is gekozen voor drie verschillende brandstoffen: cellulose (hout), schuimvulling en de mix tussen beide. Cellulose representeert een appartement dat gemeubileerd is met 'klassieke' meubels, bestaand uit voornamelijk natuurlijke materialen. Met 'schuimvulling' wordt meubilair bedoeld dat is gevuld met schuim zoals de veel gebruikte polyurethaanschuimen (PUR-schuim), en dat is bekleed met een (kunststof) doek.

Bij beide brandstoffen wordt er tijdens een brand rook gevormd met daarin roet en toxische gassen. Roet is het zichtbare deel van de rook. Van mogelijke toxische gassen zijn CO (koolmonoxide) en HCN (blauwzuur) de belangrijkste componenten. CO wordt bij beide brandstoffen gevormd. In de PUR-schuimen is stikstof in de moleculaire samenstelling aanwezig en wat eveneens leidt tot de vorming van HCN.

De aard van de brandstof heeft op de volgende wijze invloed op de rookvorming:

Roet

Ongeacht of de brandstof (voornamelijk) uit cellulose of schuim bestaat, ontstaat er al snel veel rook met veel roetdeeltjes. Na drie minuten leidt dit tot ernstige zichtbeperking. De zichtlengtes bij de twee brandstoffen zijn weergegeven in de bijlagen 3.1 (simulatie S515, cellulose) en 3.2 (simulatie S514, schuim). Een schuimbrand geeft een sterkere rookvorming dan cellulose. Na 3 minuten is in kamer 1 bij een 'schuimbrand' het zicht nihil. Bij een cellulosebrand is het zicht dan nog iets meer dan 1 meter.

Toxische gassen

Bij beide brandstoffen wordt er tijdens brand rook gevormd met daarin roet en toxische gassen. CO (koolmonoxide) wordt bij beide brandstoffen gevormd. In de PUR-schuimen is stikstof in de moleculaire samenstelling aanwezig hetgeen leidt tot de vorming van HCN (blauwzuur).

De CO-ontwikkeling is bij de cellulosebrand groter dan bij schuim. Bij een doorontwikkelde brand loopt na circa 10 minuten bij cellulose de CO-concentratie op naar meer dan 2 %, bij schuim is deze dan ongeveer 0,5 %. Opgemerkt kan worden dat de CO-vorming in CFAST direct bepaald wordt door de parameters die aan de betreffende brandstof worden toegekend: de snelheid van branduitbreiding (de tijdsconstante t_c in de kwadratische branduitbreiding) en de hoeveelheid CO die wordt gevormd per kilogram brandstof die verbrandt (de yield). Hoewel beide parameters ontleend zijn aan de literatuur en dus op onderzoek zijn gebaseerd, kunnen ze bij een werkelijke brand zeker andere waarden hebben.

Als mengvorm tussen de brandstoffen zijn ook simulaties uitgevoerd met een gemengde brandstof. Voor deze brandstof zijn als parameters grotendeels gemiddelden tussen cellulose en schuim gebruikt. Wat de rookvorming betreft liggen de resultaten van de gemengde brandstof iets dichter bij de schuim-brandstof dan bij de cellulose (zie de tabel b3-1 in bijlage 3).

4.2.3 Welke invloed op de rookverspreiding hebben het openen van de deur van het appartement naar de gang en de tijd dat de deur geopend blijft?

Met het openen van de deur van het brandappartement wordt een rookverspreiding naar de gang zonder veel belemmering mogelijk. Er is echter al eerder sprake van rookverspreiding naar de gang, aangezien er in praktijk vrijwel altijd kieren zijn waardoor de rook zich kan verspreiden. In de simulaties is daarom gerekend met de aanname dat ook met gesloten deur rook via kieren 'lekt' naar de gang. Dit (aangenomen) lek heeft een oppervlak van 1 % van het deuroppervlak. De rook die daarlangs tot de gang doordringt, zorgt ervoor dat voordat de deur (na drie minuten) open gaat, er bij de cellulosebrand al enige rook aanwezig is op de gang (zie bijlage 3.1, S515, cellulosebrand). De zichtlengte is dan nog nauwelijks beperkt; deze is dan meer dan 200 meter. Nadat de deur open is gegaan daalt de zichtlengte snel en is, voordat de deur weer gesloten wordt, verminderd tot circa 6 meter. Nadat de deur 30 seconde na openen weer wordt gesloten, herstelt de zichtlengte niet meer, maar neemt gestaag af naar circa 2 meter.

Bij de schuimbrand is de zichtlengte aanmerkelijk minder. Door het 'lekker' van rook door of langs een gesloten deur, is de zichtlengte op de gang voordat de deur open gaat (op 3 minuten na aanvang van de brand) al verminderd tot ongeveer 6 meter (zie bijlage 3.2, S514, schuimbrand). Als de deur opengaat neemt de zichtlengte snel af tot nagenoeg nihil: minder dan 20 centimeter. Nadat de deur 30 seconde na openen weer wordt gesloten, herstelt de zichtlengte zich niet meer, maar daalt gestaag door naar minder dan 10 centimeter. In geval van een schuimbrand waarbij de deur niet wordt geopend, is de zichtlengte op de gang, 5 minuten na aanvang van de brand, afgenomen tot ongeveer 1,5 meter. Daarna neemt zij gestaag af naar vrijwel nihil (11 cm na 30 minuten).

4.2.4 Welke effecten treden op bij de gemiddelde bevolking?

Afhankelijk van waar zij zich bevinden in een appartementengebouw zoals gebruikt bij de simulaties in dit onderzoek, ondervinden aanwezigen verschillende gevolgen. Het gaat daarbij om de *fractional effective concentration* (FEC) en de *fractional effective dose* (FED). De mate waarin iemand 'gevoelig' is voor deze effecten is echter niet voor iedereen gelijk. Voor een gemiddelde bevolking geldt dat de genoemde effecten optreden wanneer de FEC of de FED de waarde 1 heeft.

De aanwezigen in het appartement waar de brand uitbreekt, zullen snel dat appartement moeten verlaten om nog veilig te kunnen vluchten en de brand te overleven. Als ze er na circa 3 minuten nog zijn, wordt de kans om veilig te vluchten klein. De zichtbeperking door de rook is na 3 minuten met cellulose als brandstof al groot: het zicht is dan circa 1 meter. Als het een schuimbrand betreft, is het zicht nog slechts enkele centimeters. Zelfs als het gaat om de eigen woning, is het in dat geval moeilijk om zich te oriënteren en de uitgang te bereiken.

In een niet-brandappartement is de situatie minder bedreigend en is de kans op het overleven van de brand groter. Maar deze overleefbaarheid hangt wel af van de deurbewegingen in het brandappartement en de aard van de brandstof. Bij een cellulose brandstof en een gesloten deur of een deur die na 30 seconden weer wordt gesloten, is er geen hinder in een niet-brandappartement. Als de deur na 3 minuten wordt geopend en open blijft staan, dan wordt de kans op overleefbaarheid na 30 min klein. De rook trekt dan ook in het niet-brandappartement.

Bij schuim als brandstof is er al sprake van enige rookhinder in het niet-brandappartement als de deur in het brandappartement gesloten is. Als de deur open gaat na 3 minuten en 30 seconden daarna weer wordt gesloten, treedt er enige tot matige hinder op. Indien de deur open blijft, is er uiteindelijk sprake van zeer ernstige rookhinder. Bovendien kan dit dan, ook voor een gemiddelde bevolking, tot letale slachtoffers leiden.

Voor vluchten over de gang worden de condities sterk bepaald door de deurbeweging in het brandappartement. De verschillende effecten versterken elkaar. Als de zichthinder door de rook toeneemt, neemt de loopsnelheid af en de verblijftijd in de gang juist toe. Tijdens die verblijftijd worden personen die vluchten blootgesteld aan toxische en irriterende stoffen. Voor de toxische stoffen is de dosis belangrijk en die wordt op haar beurt bepaald door de verblijftijd en de actuele concentratie.

Bij een cellulosebrand en gesloten deur of een deur die op 3 minuten wordt geopend en 30 seconden daarna weer wordt gesloten, is er op de gang wel hinder door de rook maar zal vluchten mogelijk blijven. Als de deur na 3 min wordt geopend en open blijft, is er ernstige hinder voor een gemiddelde bevolking en ook enige kans op letale slachtoffers. Bij een schuimbrand en gesloten deur van het brandappartement is er sterke rookhinder, maar is vluchten wel mogelijk. Als de deur wordt geopend en na 30 s. weer gesloten of open blijft, is de rookhinder nog groter; het zicht is dan nihil. Ook is er dan een gerede kans op letale slachtoffers.

4.2.5 Welke effecten treden op bij kwetsbare groepen?

Zoals hierboven aangegeven, gelden de berekeningen ten aanzien van overleefbaarheid en vluchtmogelijkheden voor de *gemiddelde* bevolking. De FED en FEC zijn dan beide op 1,0 gesteld. De meest kwetsbare personen zoals ouderen en minder zelfredzamen, kunnen echter al bij een FED of FEC van 0,1 problemen krijgen met ontvluchten en het overleven van de brand.

In het brandappartement geldt voor de meest kwetsbare groepen nog meer dan voor de gemiddelde bevolking dat ze snel het appartement moeten ontvluchten. Immers: de 'effectieve concentratie' en de 'effectieve dosis' worden bij hen sneller bereikt dan bij de gemiddelde bevolking. Maar juist vanwege het sneller bereiken van deze concentratie en dosis, wordt vluchten bemoeilijkt. De kans dat het niet lukt om snel te vluchten, is daarom voor deze kwetsbare groep vrij groot, zodat er lethale slachtoffers te verwachten zijn. Deze kans wordt in grote mate beïnvloed door twee zaken:

1. De aard van de brandstof (cellulose of schuim)
2. Het open of gesloten zijn van de deur van het brandappartement.

In geval de deur van het brandappartement dicht blijft, kunnen de meest kwetsbare personen in een niet-brandappartement overleven. Dit geldt zowel bij een cellulosebrand als bij een schuimbrand. Wel ontstaat er bij een schuimbrand rookhinder in het niet-brandappartement. Na ongeveer 25 minuten is er bij een schuimbrand zelfs sprake van sterke rookhinder in het niet-brandappartement, ook als de deur van het brandappartement dicht blijft.

Als de deur van het brandappartement wordt geopend en na 30 seconde weer wordt gesloten, zijn de condities in het niet-brandappartement bij een cellulose brand ook

overleefbaar voor de meest kwetsbare groep. Bij een schuimbrand ontstaat dan rookhinder, toenemend tot een sterke hinder na ongeveer 27 minuten.

Als de deur van het brandappartement wordt geopend en open blijft, kunnen condities in het niet-brandappartement zowel bij een cellulosebrand als bij een schuimbrand tot vluchtonbekwaamheid van de meest kwetsbare personen leiden. (Dit geldt overigens niet alleen voor het meest kwetsbare deel van de bevolking, maar ook voor een deel van de gemiddelde bevolking.)

Vluchten via de gang is bij een cellulosebrand mogelijk, mits de deur van het brandappartement gesloten blijft. Door de meest kwetsbare groep wordt dan wel rookhinder ervaren. Indien de deur van het brandappartement gesloten blijft, is er enige hinder, maar als de deur na 3 min. gedurende 30 s. open blijft, is er sprake van veel hinder. Blijft de deur open, dan is er gerede kans op vluchtonbekwaamheid en daardoor ook op letale slachtoffers. Bij een schuimbrand echter is er bij een gesloten deur al sterke rookhinder. Als de deur open gaat en daarna al dan niet weer dicht, is de kans op letale slachtoffers onder kwetsbare personen zeer groot. Maar ook voor de gemiddelde bevolking bestaat er een kans op letale slachtoffers.

4.2.6 Eerste overschrijding van FED of FEC

Op basis van de tabel uit bijlage 3 kan voor de gang of voor het niet-brandappartement (kamer 2) nagegaan worden binnen hoeveel tijd de eerste FED of FEC-waarde van 0,3 overschreden wordt. Dit betekent dat voor een kwetsbare populatie vanaf dat moment het ontvluchten belemmerd wordt. In onderstaande tabel is weergegeven wanneer dit het geval is.

Tabel 4-1 Eerste overschrijding van een FEC of FED van 0,3 bij verschillende scenario's

		gang	ander appartement
deur dicht	cellulose	290	
	schuim	140	1460
	mix	190	
deur kort open	cellulose	190	
	schuim	140	620
	mix	180	
deur open	cellulose	190	
	schuim	160	300
	mix	180	310

Tabel 4-2 Eerste overschrijding van een FEC of FED van 1,0 bij verschillende scenario's

		gang	ander appartement
deur dicht	cellulose	450	
	schuim	190	
	mix	250	
deur kort open	cellulose	280	
	schuim	170	1640
	mix	180	470
deur open	cellulose	210	950
	schuim	180	440
	mix	180	

4.2.7 Slotconclusie

Ondanks het feit dat zij gebaseerd zijn op een aantal aannames, laten de berekeningen goed zien dat risicogroepen die extra kwetsbaar zijn voor rook, in een appartementencomplex met inpandige gangen (veel) sneller in de problemen kunnen raken dan de gemiddelde bevolking. De snelheid waarmee deze problemen optreden, is in grote mate afhankelijk van het open of gesloten zijn van de deur van het brandappartement en in mindere mate ook van de aard van de brandstof, waarbij een schuimbrand sneller tot problemen leidt dan een cellulosebrand.

In het brandappartement bestaat er feitelijk alleen een kans op overleven als de aanwezigen het zeer snel kunnen verlaten. Dit geldt zowel voor de gemiddelde bevolking als voor het kwetsbare deel van de bevolking. In het niet-brandappartement is die overleefbaarheid afhankelijk van de soort brandstof en de deurbeweging van het brandappartement. In het meest gunstige geval betreft het een cellulosebrand bij een gesloten deur. De rookverspreiding naar de gang en de andere appartementen is dan beperkt. In het minst gunstige geval betreft het een schuimbrand waarbij deur van het brandappartement open blijft staan. In dat geval wordt vluchten door de gang ernstig belemmerd en zal er ook rook in de andere appartementen komen.

Vluchten over de gang is alleen goed mogelijk bij een cellulosebrand en een gesloten of tijdelijk geopende deur. Bij de andere scenario's is er zeer sterke rookhinder en een gerede tot grote kans op overlijden. Deze kans is aanmerkelijk groter bij kwetsbare personen dan bij niet-kwetsbare personen.

Literatuur

- Brandweeracademie. (2014). *Brand in Het Lichtpunt*. Arnhem.
- Brandweeracademie. (2015). *Brand in De Notenhout*. Arnhem.
- Brandweeracademie. (2016). *Branden in seniorencomplexen : regelgeving en praktijk*. Arnhem.
- Brandweeracademie, & Nederlandse Brandwonden Stichting. (2015). *De invloed van vergrijzing op brandveiligheid. Deelrapport 2: de omvang van de problematiek*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Friedman, R. (2016). Chemical equilibrium. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_6, # Society of Fire Protection Engineers 2016.
- Gann, R. G. (2009). Fire effluent component yields from room-scale fire test. *Fire and Materials*. <https://doi.org/10.1002/fam>
- Gottuk, D.T. and Lattimer, B. Y. (2016). Effect of combustion conditions on species production. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_16, # Society of Fire Protection Engineers 2016.
- Gwyne, S.M.V., Rosenbaum, E. R. (2016). Employing the hydraulic model in assessing emergency movement. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_59, # Society of Fire Protection Engineers 2016.
- Herpen, R. and V. N. (2007). Fysisch brandmodel.
- Khan, MM, Tewarson, A and Chaos, M. (2016). Combustion characteristics of material and generation of fire products. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_36, # Society of Fire Protection Engineers 2016.
- Kuindersma, P. (2012). *Dicht, dicht, potdicht*. Nieman-Kettlitz Gevel- en Dakadvies.
- National Research Council. (2002). *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 2* (Vol. 2). Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25032297>
- NEN. (2011). *NEN-EN 1991-1-2:2002+C1:2009+NB:2011*.
- NEN6055. Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept (2011).
- Peacock, R. D., Forney, G. P., Portier, R., Reneke, P., & Jones, W. W. (1993). *CFAST, the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*. NIST Technical Note 1299. Gaithersburg, MD: NIST.
- Peacock, R. D., Forney, G. P., & Reneke, P. A. (2015). NIST Technical Note 1889v3 CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 3 : Verification and Validation Guide, 3(Version 7). <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1889v2>
- Purser, David A. and McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_63, # Society of Fire Protection Engineers 2016 (pp. 2308–2428).
- Purser, D. A. (2016). Combustion toxicity. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_62, # Society of Fire Protection Engineers 2016.
- WHO. (1999). *Environmental Health Criteria 213. Carbon monoxide*. Geneva. [https://doi.org/10.1016/s0278-6915\(82\)80023-9](https://doi.org/10.1016/s0278-6915(82)80023-9)
- Yamada, T and Akizuki, Y. (2016). Visibility and human behavior in fire smoke. In M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, DOI 10.1007/978-1-4939-2565-0_61, # Society of Fire Protection Engineers 2016.

1 Bijlage: FED en FEC

In deze bijlage worden de vergelijkingen gegeven die gebruikt zijn voor het bepalen van FED en FEC (respectievelijke de fractional effective dose en de fractional effective concentration) (Purser, David A. and McAllister, 2016, Chapter 63).

De algemene vergelijking voor de FED is:

Vergelijking B1-1 FED algemene vergelijking

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(Ct)_i} \Delta t$$

Waarin

t tijd (min)
C_i concentratie van stof i (ppm)

Eenheden voor tijd en concentratie zijn arbitrair. Uiteraard dienen voor de actuele dosis en de effectieve dosis dezelfde eenheden te worden gekozen.

Voor specifieke stoffen zijn vergelijkingen met specifieke constanten vastgesteld.

CO koolmonoxide

Voor CO geldt de volgende vergelijking voor F_{lco}, de fractionele FED over een tijdincrement waarbinnen de concentratie CO een constante waarde heeft:

Vergelijking B1-2 Fractionele FED CO

$$F_{lco} = \frac{[CO] * tijd}{35,0000}$$

Waarin

[CO] concentratie (ppm)
tijd (min)

35.000 ppm.min is de dosis waarbij onbekwaamheid tot vluchten optreed (bijvoorbeeld 1000 ppm gedurende 35 min.).

Als gedurende een bepaalde tijd (bijvoorbeeld 30 min.) de CO concentratie varieert, wordt de FED berekend uit de sommatie van de opvolgende tijdincrementen. Per tijdincrement wordt een constante concentratie aangehouden.

Vergelijking B1-3 FED: sommatie over tijdincrementen

$$FED = \sum_0^t F_{Ico} * dt$$

HCN blauwzuur

Voor HCN geldt de volgende vergelijking voor F_{Icn} , de fractionele FED over een tijdincrement waarbinnen de concentratie HCN een constante waarde heeft.

Vergelijking B1-4 Fractionele FED HCN

$$F_{Icn} = \frac{[HCN]^{2.36} * Ve * tijd}{2.43 * 10^7}$$

Waarin

[HCN] concentratie (ppm)

Ve ingeademde hoeveelheid lucht (lit/min)

tijd (min)

Voor Ve wordt 20.25 lit/min aangehouden, volgend uit de vergelijkingen 63.24 en 63.25 (Purser, David A. and McAllister, 2016, p. 2361).

Analoog aan CO volgt voor HCN de FED uit de F_{Icn} (zie vergelijking b1-3).

O2 zuurstof

Zuurstof is geen toxische stof, maar een langdurend gebrek aan voldoende zuurstof kan tot bewusteloosheid leiden (Purser, David A. and McAllister, 2016, p. 2365).

De tijdsduur waarin, bij een constante O_2 concentratie, vluchtonbekwaamheid door verlies aan bewustzijn optreedt, wordt gegeven door:

Vergelijking B1-5 O_2 , Tijdsduur tot vluchtonbekwaamheid,

$$t_{10} = \exp[8.13 - 0.54(20.5 - \%O_2)]$$

Waarin

t tijd (min)

% O_2 O_2 concentratie (%)

20.5 O_2 concentratie (%) in de buitenlucht, waarmee CFAST rekent.

Voor O_2 geldt de volgende vergelijking voor F_{Io} , de fractionele FED over een tijdincrement waarbinnen de concentratie O_2 een constante waarde heeft.

Vergelijking B1-6 Fractionele FED O₂

$$F_{Io} = \frac{1}{t_{Io}}$$

FED O₂ volgt dan analoog aan vergelijking b1-3.

Rook

Naast hinder door de in rook aanwezige stoffen, speelt ook zichtbelemmering een rol: door minder zicht nemen zowel de loopsnelheid als de vluchtefficiëntie af. Dit wordt niet bepaald door een accumulatie in de loop van de blootstellingstijd maar door de momentane blootstelling, de concentratie. De bijbehorende FEC wordt dan bepaald door de optische dichtheid, ofwel de verzwakking van het licht per lengte eenheid.

Vergelijking B1-7 FEC Rook

$$FEC_{smoke} = \frac{OD}{factor}$$

Waarin

OD optical density (1/m)
factor 0.2 voor kleine of nauwe ruimten¹⁵ (< 4 m) en 0.08 voor grote ruimten.

Verstikkende gassen

F_{IN}, de partiele FED IN, wordt bepaald door de sommatie van 'onderliggende' F-waarden.

$$F_{IN} = (F_{Ico} + F_{Icn} + F_{Inox} + FLD_{irr}) * V_E * V_{CO_2} + F_{Io}$$

Waarin

F_{Ico} fractionele FED CO
F_{Icn} fractionele FED HCN
F_{Inox} fractionele FED NOx
FLD_{irr} fractional lethal dose irritants
V_E ingeademde hoeveelheid lucht (lit/min)
V_{CO2} vermenigvuldigingsfactor gerelateerd aan CO₂ concentratie
F_{Io} Fractionele FED O₂

In de hier uitgevoerde berekeningen worden de termen F_{Inox}, FLD_{irr} niet meegenomen. NOx komt in de CFAST resultaten niet voor. Dit geldt eveneens voor de irriterende gassen HCl, formaldehyde en acroleïne. HCN, dat ook irriterend kan werken, is als verstikkend gas meegenomen in de berekeningen.

¹⁵ Een gang kan lang zijn, maar zolang de breedte beperkt is, is de 'orientatie afstand' tot de zijwand klein en kan een gang in deze context als 'kleine' ruimte worden beschouwd.

V_{CO2}

De V_{CO2} is een vermenigvuldigingsfactor die in rekening brengt dat bij een verhoogde CO₂ concentratie zowel de ademhalingsfrequentie toeneemt als de daarmee gepaard gaande hoeveelheid ingeademde lucht per tijdseenheid.

Vergelijking B1-8 Verhoogde ademhaling, vermenigvuldigingsfactor

$$V_{CO_2} = \exp\left(\frac{[CO_2]}{5}\right)$$

Waarin

[CO₂] concentratie CO₂ (%)

2 Bijlage: CFAST invoer parameters

In deze bijlage is de invoer voor een bepaalde CFAST simulatie, S514
vent2 0.0625 x 3 - fire foam - deur open op 3 min. en 30 s. open
vent2 – vent van brandappartement naar gang, breedte = 6.25 cm, hoogte = 3 m

&HEAD VERSION = 7300, TITLE = 'CFAST Simulation' /

!! Scenario Configuration

&TIME SIMULATION = 1800 PRINT = 50 SMOKEVIEW = 10 SPREADSHEET = 10 /
&INIT PRESSURE = 101325 RELATIVE_HUMIDITY = 50 INTERIOR_TEMPERATURE = 20
EXTERIOR_TEMPERATURE = 20 /
&MISC MAX_TIME_STEP = 2 LOWER_OXYGEN_LIMIT = 0.1 /

!! Material Properties

&MATL ID = 'CONCRETE' MATERIAL = "Concrete, Normal Weight (6 in)",
CONDUCTIVITY = 1.75 DENSITY = 2200 SPECIFIC_HEAT = 1, THICKNESS = 0.15 EMISSIVITY = 0.94 /

!! Compartments

&COMP ID = 'kamer1'
DEPTH = 6.32 HEIGHT = 3 WIDTH = 6.32 CEILING_MATL_ID = 'CONCRETE' WALL_MATL_ID =
'CONCRETE' FLOOR_MATL_ID = 'CONCRETE'
ORIGIN = 6.32, 0, 0 GRID = 50, 50, 50 /

&COMP ID = 'kamer2'
DEPTH = 6.32 HEIGHT = 3 WIDTH = 6.32 CEILING_MATL_ID = 'CONCRETE' WALL_MATL_ID =
'CONCRETE' FLOOR_MATL_ID = 'CONCRETE' SHAFT = .TRUE.
ORIGIN = 18.96, 8.32, 0 GRID = 50, 50, 50 /

&COMP ID = 'gang'
DEPTH = 2 HEIGHT = 3 WIDTH = 31.6 CEILING_MATL_ID = 'CONCRETE' WALL_MATL_ID =
'CONCRETE' FLOOR_MATL_ID = 'CONCRETE' SHAFT = .TRUE.
ORIGIN = 0, 6.32, 0 GRID = 50, 50, 50 /

!! Wall Vents

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_1' COMP_IDS = 'kamer1', 'gang' TOP = 2.4, BOTTOM = 0, WIDTH
= 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 179, 180, 210, 211, 1800 F = 0.01, 0.01, 1, 1, 0.01, 0.01 FACE = 'REAR'
OFFSET = 2.66 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_2' COMP_IDS = 'kamer1' 'OUTSIDE' TOP = 3, BOTTOM = 0,
WIDTH = 0.0625

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 1, 1, 0 FACE = 'FRONT' OFFSET = 2.9 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_3' COMP_IDS = 'kamer2', 'gang' TOP = 2.4, BOTTOM = 0, WIDTH
= 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'FRONT' OFFSET = 2.66 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_4' COMP_IDS = 'kamer2' 'OUTSIDE' TOP = 3, BOTTOM = 0,
WIDTH = 0.0625

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 1, 1, 0 FACE = 'REAR' OFFSET = 2.9 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_10' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'FRONT' OFFSET = 2.66 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_11' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'FRONT' OFFSET = 15.3 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_12' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'FRONT' OFFSET = 21.62 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_13' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'FRONT' OFFSET = 27.94 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_14' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'REAR' OFFSET = 2.66 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_15' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'REAR' OFFSET = 8.98 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_16' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'REAR' OFFSET = 15.3 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_17' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'REAR' OFFSET = 27.94 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_18' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'LEFT' OFFSET = 0.5 /

&VENT TYPE = 'WALL' ID = 'WallVent_19' COMP_IDS = 'gang' 'OUTSIDE' TOP = 2.4, BOTTOM = 0,
WIDTH = 1

CRITERION = 'TIME' T = 0, 1, 1799, 1800 F = 0, 0.01, 0.01, 0 FACE = 'RIGHT' OFFSET = 0.5 /

!! Fires

&FIRE ID = 'kamer-synthetisch' COMP_ID = 'kamer1', FIRE_ID = 'synthetisch' LOCATION = 3.16, 3.16
/

&CHEM ID = 'synthetisch' CARBON = 1 CHLORINE = 0 HYDROGEN = 1.63 NITROGEN = 0.0785 OXYGEN
= 0.558 HEAT_OF_COMBUSTION = 24400 RADIATIVE_FRACTION = 0.35 /

&TABL ID = 'synthetisch' LABELS = 'TIME', 'HRR', 'HEIGHT', 'AREA', 'CO_YIELD', 'SOOT_YIELD',
'HCN_YIELD', 'HCL_YIELD', 'TRACE_YIELD' /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 0, 0, 0, 0, 0.0144, 0.1, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 30, 40, 0, 0.16, 0.0144, 0.1, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 60, 160, 0, 0.64, 0.0144, 0.1, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 90, 360, 0, 1.44, 0.0144, 0.1, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 120, 640, 0, 2.56, 0.0144, 0.1, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 130, 751, 0, 3, 0.0144, 0.1, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 140, 871, 0, 3.48, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 150, 1000, 0, 4, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /

&TABL ID = 'synthetisch', DATA = 168, 1254, 0, 5.02, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /
 &TABL ID = 'synthetisch', DATA = 180, 1254, 0, 5.02, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /
 &TABL ID = 'synthetisch', DATA = 210, 1254, 0, 5.02, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /
 &TABL ID = 'synthetisch', DATA = 237, 1254, 0, 5.02, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /
 &TABL ID = 'synthetisch', DATA = 250, 1254, 0, 5.02, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /
 &TABL ID = 'synthetisch', DATA = 1800, 1254, 0, 5.02, 0.0509, 0.21, 0, 0, 0 /

De variabelen die in de verschillende berekeningen zijn gebruikt zijn de volgende:

WallVent_1 De deur van het brandcompartiment (kamer 1) naar de gang. Deze deur gaat open op 3 min., blijft 30 s. open staan en wordt dan weer gesloten, of wordt na opening helemaal niet meer gesloten. Alle deuren hebben een continue lekkage van 1 % van hun oppervlak, overeenkomend met een kier van ongeveer 3.5 mm.

WallVent_2 De ventilatiespleet van het brandcompartiment (kamer 1) naar de buitenlucht (outside). Deze staat model voor de ventilatie via roosters of 'lekkage' via kieren. De breedte van de spleet is 0.25, 0.125 of 0.0625 m en 3 m hoog.

Fires De gebruikte brandstoffen zijn cellulose, synthetisch en een mix van beide.

Cellulose &FIRE ID = 'kamer-cellulose' COMP_ID = 'kamer1', FIRE_ID = 'cellulose' LOCATION = 3.16, 3.16 /
 &CHEM ID = 'cellulose' CARBON = 4 CHLORINE = 0 HYDROGEN = 6 NITROGEN = 0 OXYGEN = 3 HEAT_OF_COMBUSTION = 14000 RADIATIVE_FRACTION = 0.35 /

Synthetisch &FIRE ID = 'kamer-synthetisch' COMP_ID = 'kamer1', FIRE_ID 'synthetisch' LOCATION = 3.16, 3.16 /
 &CHEM ID = 'synthetisch' CARBON = 1 CHLORINE = 0 HYDROGEN = 1.63 NITROGEN = 0.0785 OXYGEN = 0.558 HEAT_OF_COMBUSTION = 24400 RADIATIVE_FRACTION = 0.35 /

Mix &FIRE ID = 'kamer-mix' COMP_ID = 'kamer1', FIRE_ID = 'mix' LOCATION = 3.16, 3.16 /
 &CHEM ID = 'mix' CARBON = 1 CHLORINE = 0 HYDROGEN = 1.63 NITROGEN = 0.0785 OXYGEN = 0.5585 HEAT_OF_COMBUSTION = 19200 RADIATIVE_FRACTION = 0.35 /

3 Bijlage: Het resultaat van de berekening van de simulatie

In de tabel b3-1 staan de tijdstippen waarop de aangegeven FED en FEC limieten worden overschreden (2^e kolom van links). In het onderste deel van de waarden voor de gang (tussen de twee gele rijen) staan 1) de tijd waarop bij ontvluchten vanuit een niet-brandappartement de gang wordt betreden, 2) de duur van de looptijd op de gang en 3) welke FED en FEC waarden de blootgestelde personen oplopen. De FEC smoke-waarde geeft aan wat de FEC is bij het betreden van de gang (FEC min) en wat de waarde daarvan is aan het einde van de looptijd (FEC max).

Tabel B3-1 Overzicht resultaten CFAST simulaties

		vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht	vert2.0.0625x3- fire cellulose - deur open op 3 min en blijft dicht
		S517	S515	S510	S519	S504	S516	S518	S514	S513
FED CO gang	0.1			540		940	550	1380	790	630
FED HCN gang	0.1					970		1520	680	
FED O2 gang	0.1			590			620			870
FED IN gang	0.1	370	330	270	400	250	250	430	200	250
FEC smoke gang	0.1	230	180	180	150	150	150	110	110	130
FED CO gang	0.3			790			850		1570	1060
FED HCN gang	0.3								1200	
FED O2 gang	0.3			670			730			1170
FED IN gang	0.3	480	450	320	540	320	300	610	230	300
FEC smoke gang	0.3	290	190	190	190	180	180	140	140	160
FED CO gang	1			1710						
FED HCN gang	1									
FED O2 gang	1			860			910			1690
FED IN gang	1			390		520	380	890	330	410
FEC smoke gang	1	450	280	210	250	180	180	190	170	180
FED CO gang	1.3									
FED HCN gang	1.3									
FED O2 gang	1.3			960			990			
FED IN gang	1.3			410		570	400	970	370	440
FEC smoke gang	1.3	500	350	220	280	180	180	220	170	180
tijd betreden gang		300	300	300	300	300	300	300	300	300
looptijd door gang		30	30	60	30	110	110	110	110	110
FED CO gang		0.0012	0.0014	0.0112	0.0007	0.0072	0.0278	0.0023	0.0165	0.0209
FED HCN gang						0.0079	0.0001	0.0004	0.0197	0.0001
FED IN gang		0.0249	0.0308	0.3642	0.0155	0.3376	1.08	0.057	0.8071	0.6883
FEC smoke gang (min)		0.3981	1.09	4.73	1.69	6.77	24.8	3.44	28.5	40.5
FEC smoke gang (max)		0.5371	1.21	7.79	1.84	7.75	44.9	5.78	31.1	62.7
FED CO kamer2	0.1									
FED HCN kamer2	0.1									
FED O2 kamer2	0.1									
FED IN kamer2	0.1			740			760			900
FEC smoke kamer2	0.1			350		720	240	920	230	230
FED CO kamer2	0.3									
FED HCN kamer2	0.3									
FED O2 kamer2	0.3									
FED IN kamer2	0.3			1100			1110			1290
FEC smoke kamer2	0.3			490			310	1460	620	300
FED CO kamer2	1									
FED HCN kamer2	1									
FED O2 kamer2	1									
FED IN kamer2	1			1790						
FEC smoke kamer2	1			950			470		1640	440
FED CO kamer2	1.3									
FED HCN kamer2	1.3									
FED O2 kamer2	1.3									
FED IN kamer2	1.3									
FEC smoke kamer2	1.3			1140			510			490

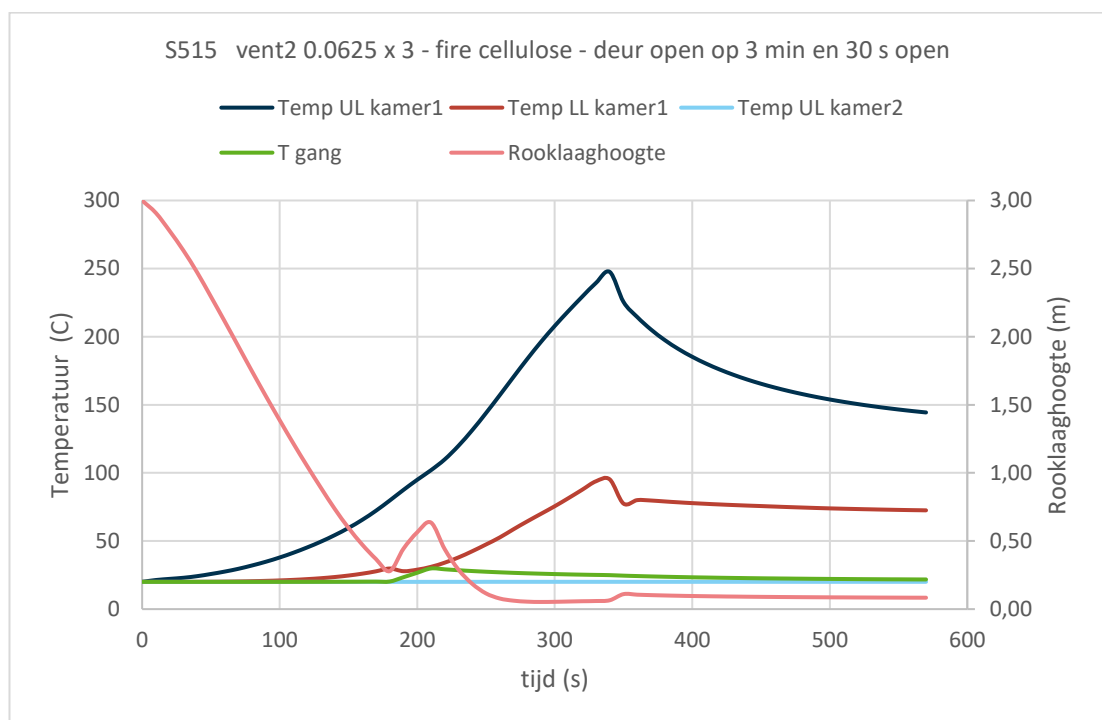
3.1 S515: Cellulose

vent2 = 0.0625 m, fire cellulose, deur op 3 min. open en 30 s. open.

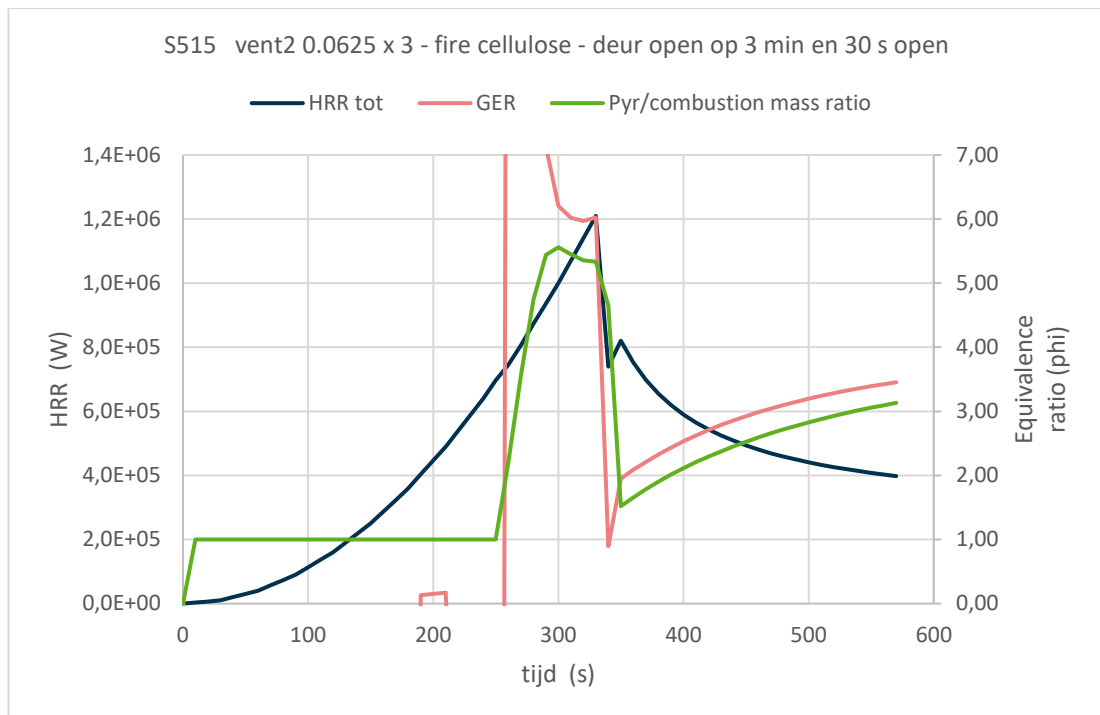
In deze bijlage wordt het resultaat getoond van een van de simulatieberekeningen.

In dit geval is de brandstof cellulose, de ventilatiespleet naar de buitenlucht 6,25 cm breed en gaat de deur van de brandruimte naar de gang op 3 min. na aanvang van de brand open en wordt naar 30 s. weer gesloten.

De CFAST berekening breekt (vanuit het programma) af op 570 s. doordat de iteratie tijdstappen te klein worden. De temperatuuropbouw in de brandruimte en de rookverspreiding naar de gang en eventueel naar andere appartementen heeft dan al grotendeels plaatsgevonden.



UL upper layer
LL lower layer
kamer1 de brandruimte
kamer2 het tegenoverliggende appartement



HRR heat release rate: brandvermogen

GER global equivalence ratio: de mate waarin de brand over- of ondergeventileerd is.

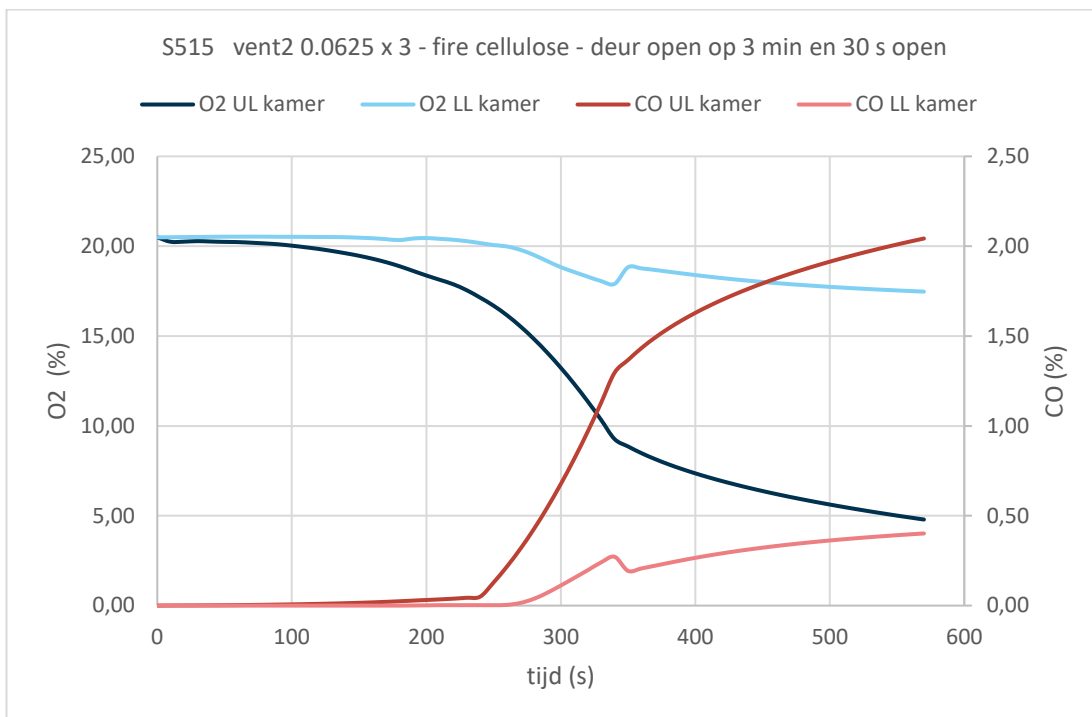
GER =1 er wordt precies die hoeveelheid zuurstof toegevoerd, nodig voor volledige verbranding. Met andere woorden: de verbranding is stoechiometrisch.

GER < 1 er is een overmaat aan zuurstof (overgeventileerde brand).

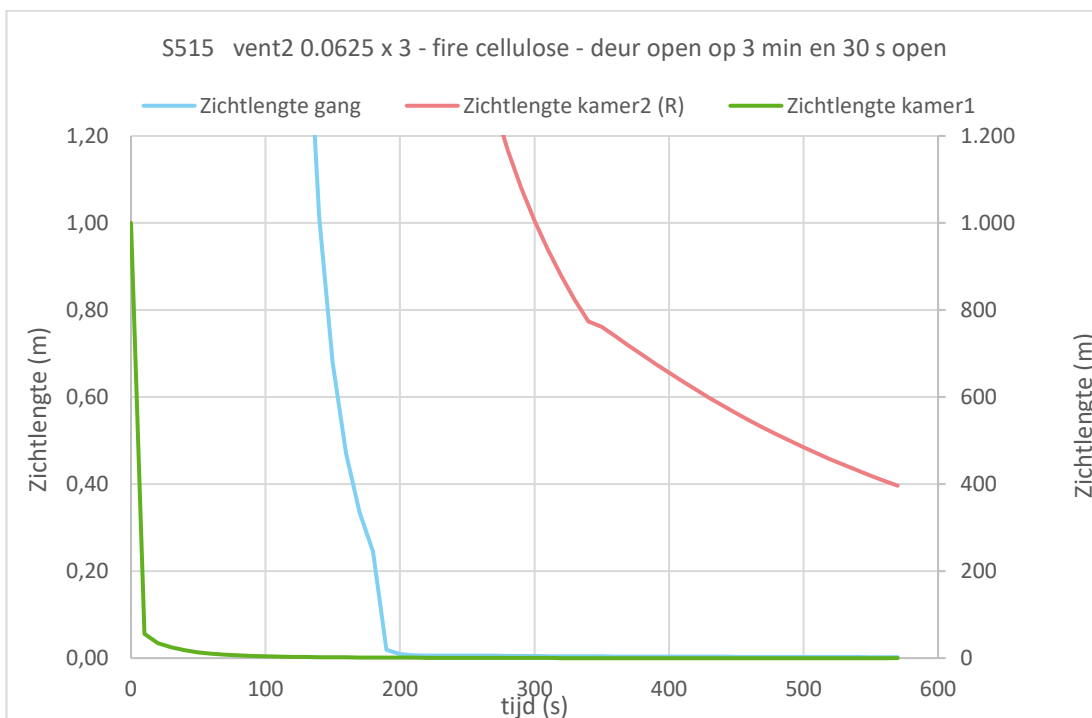
GER > 1 er is een tekort aan zuurstof (ondergeventileerde brand).

Pyr/combustion mass ratio

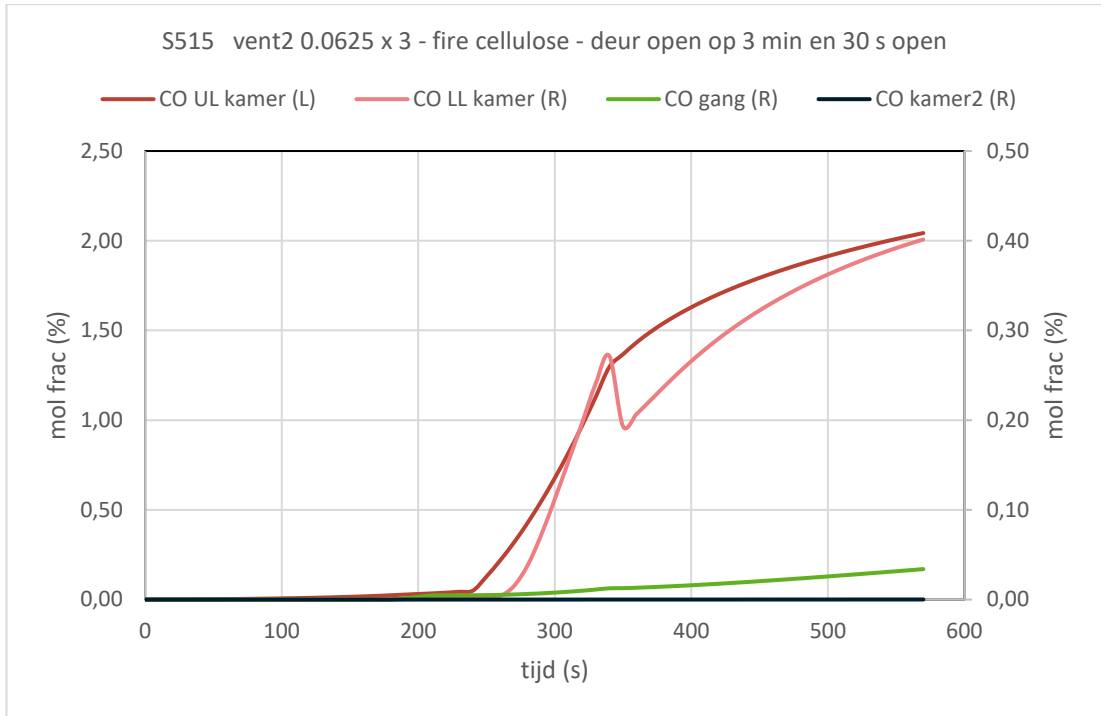
Massaverhouding pyrolyse gassen (die ontwijken uit de brandstof) ten opzichte van de massa die verbrandt in de brand (de massa die verbrandt in de rooklaag (upper layer) is hierin niet meegenomen). Als Pyr/combustion > 1 dan ontwijkt er meer dan er verbrandt, en is de verbranding dus onvolledig.



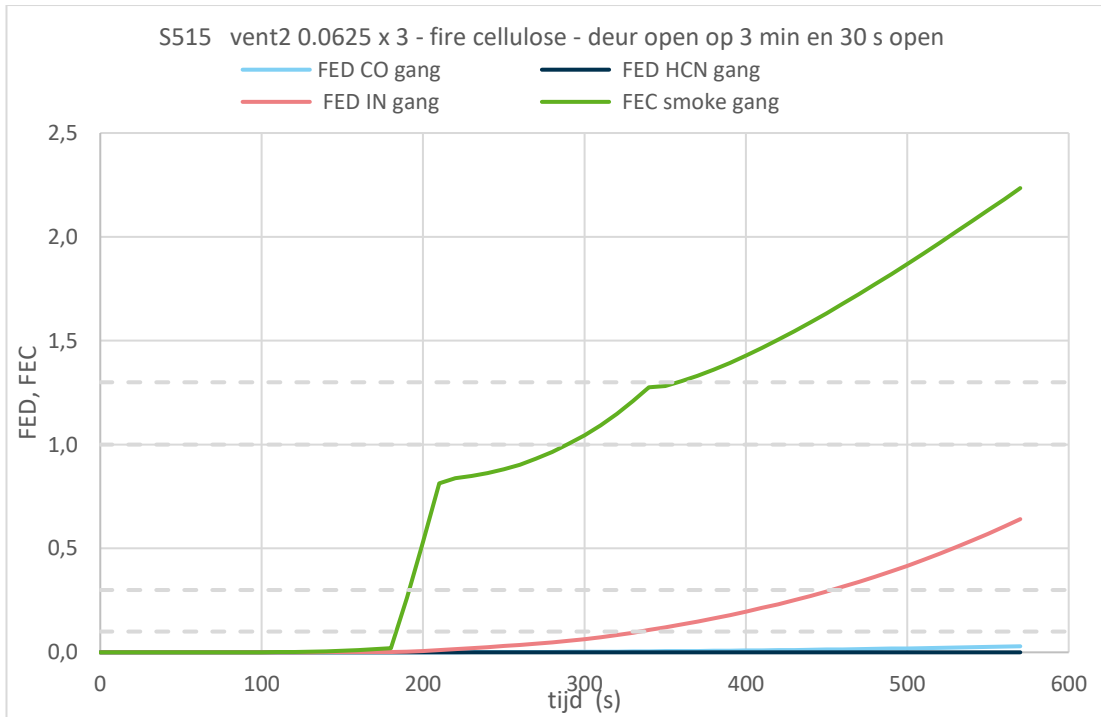
UL upper layer
 LL lower layer
 kamer1 de brandruimte
 (L), (R) de waarden van de curve staan op de linker dan wel de rechter as



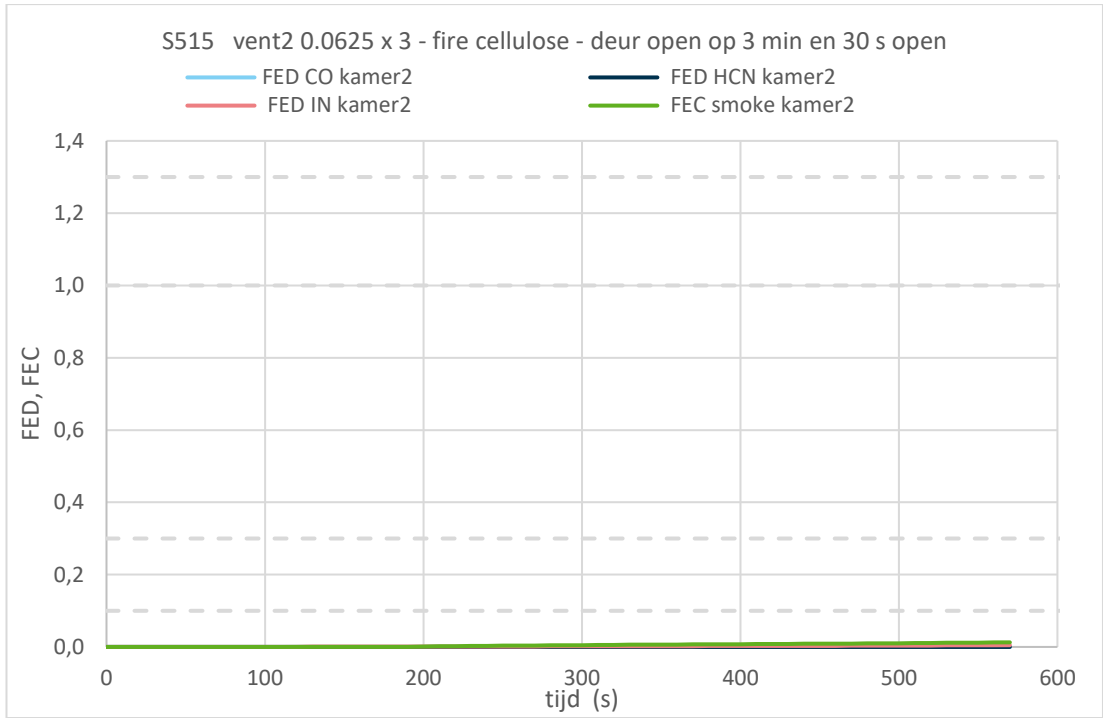
(R) de waarden van de curve staan op de rechter as



UL upper layer
 LL lower layer
 kamer1 de brandruimte
 kamer2 het tegenoverliggende appartement
 (L), (R) de waarden van de curve staan op de linker dan wel de rechter as



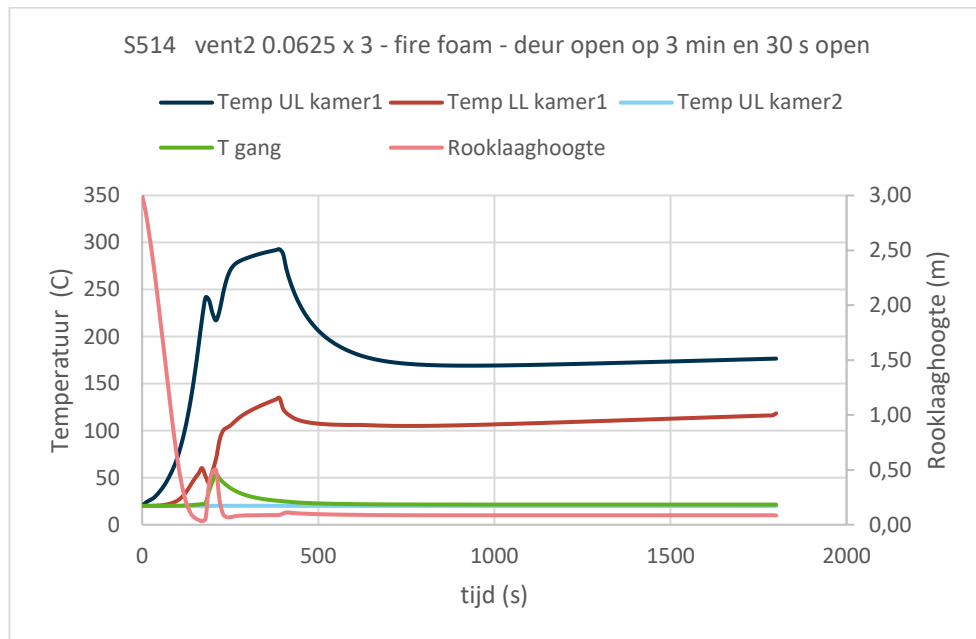
FED IN FED asphyxiant gases (verstikkende gassen)



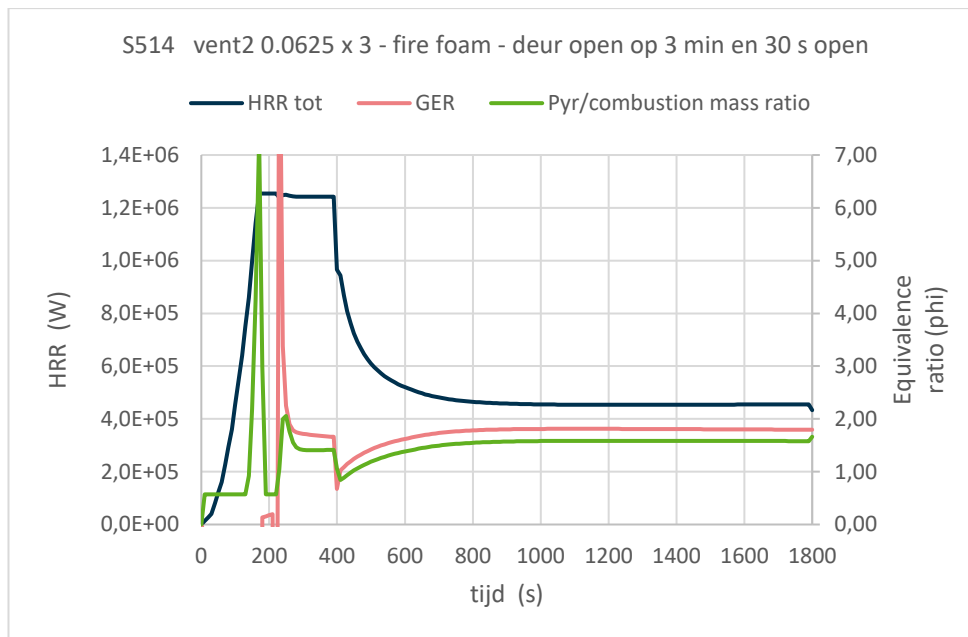
3.2 S514: Schuim

vent2 = 0.0625 m, fire foam, deur op 3 min. open en 30 s. open.

In het geval van onderstaande simulatie is de brandstof meubelstofferingschuim, is de ventilatiespleet naar de buitenlucht 6,25 cm breed en gaat de deur van de brandruimte naar de gang op 3 min. na aanvang van de brand open en wordt 30 s. later weer gesloten.



UL upper layer
LL lower layer
kamer1 de brandruimte
kamer2 het tegenoverliggende appartement

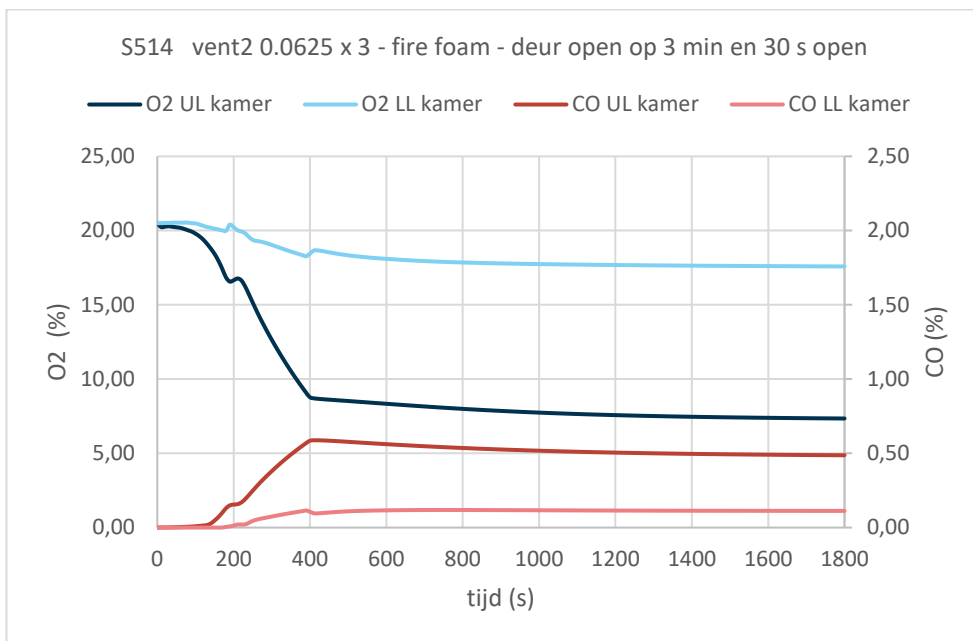


HRR heat release rate: brandvermogen

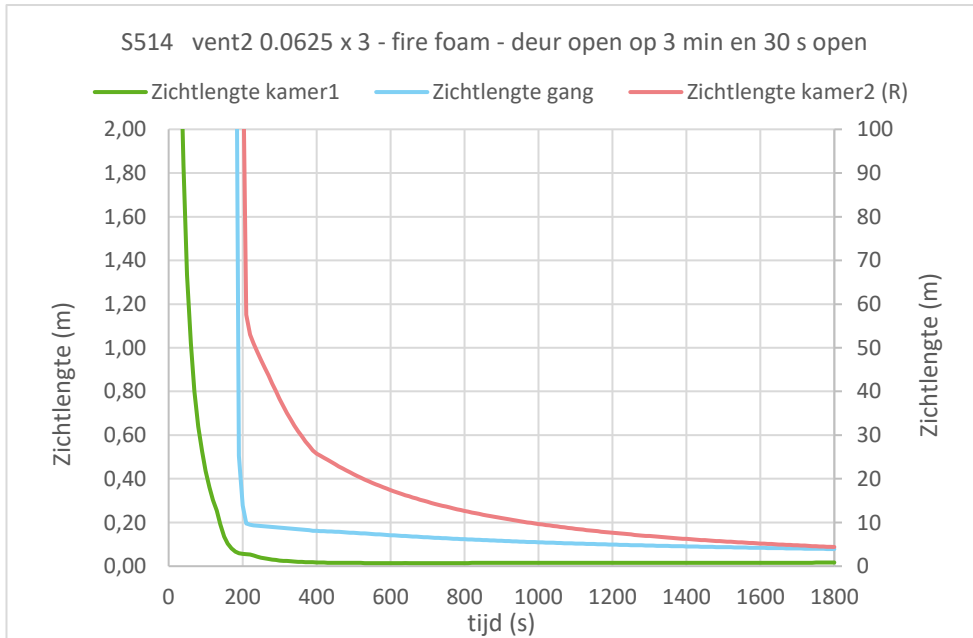
GER global equivalence ratio: de mate waarin de brand over- of ondergeventileerd is.
 GER = 1 er wordt precies die hoeveelheid zuurstof toegevoerd nodig voor volledige verbranding. Met andere woorden: de verbranding is stoechiometrisch.
 GER < 1 er is een overmaat aan zuurstof (overgeventileerde brand).
 GER > 1 er is een tekort aan zuurstof (ondergeventileerde brand).

Pyr/combustion mass ratio

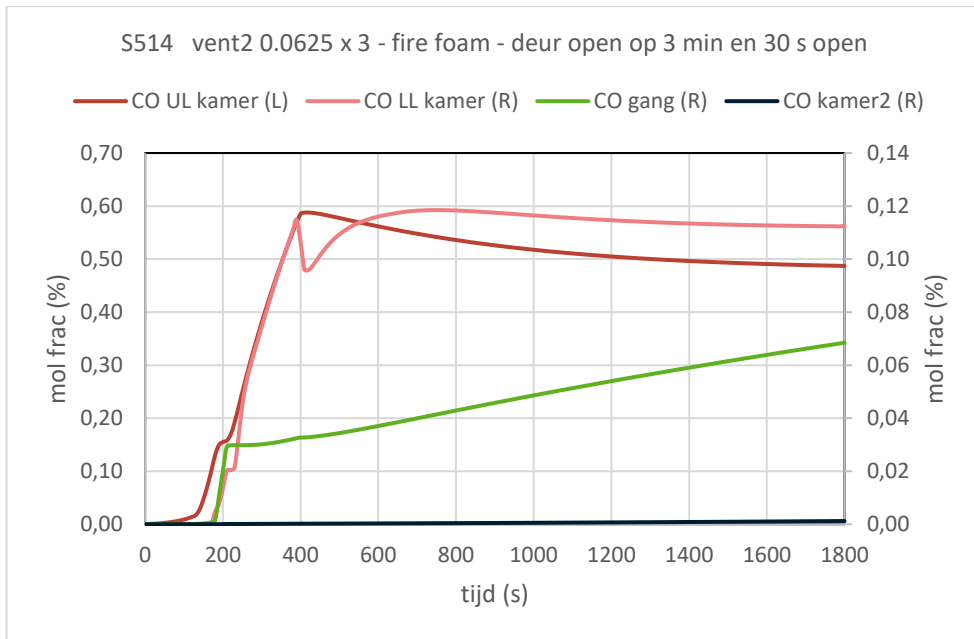
Massaverhouding pyrolyse gassen (die ontwijken uit de brandstof) ten opzichte van de massa die verbrandt in de brand (de massa die verbrandt in de rooklaag (upper layer) is hierin niet meegenomen). Als Pyr/combustion > 1 dan ontwijkt er meer dan er verbrandt, en is de verbranding dus onvolledig.



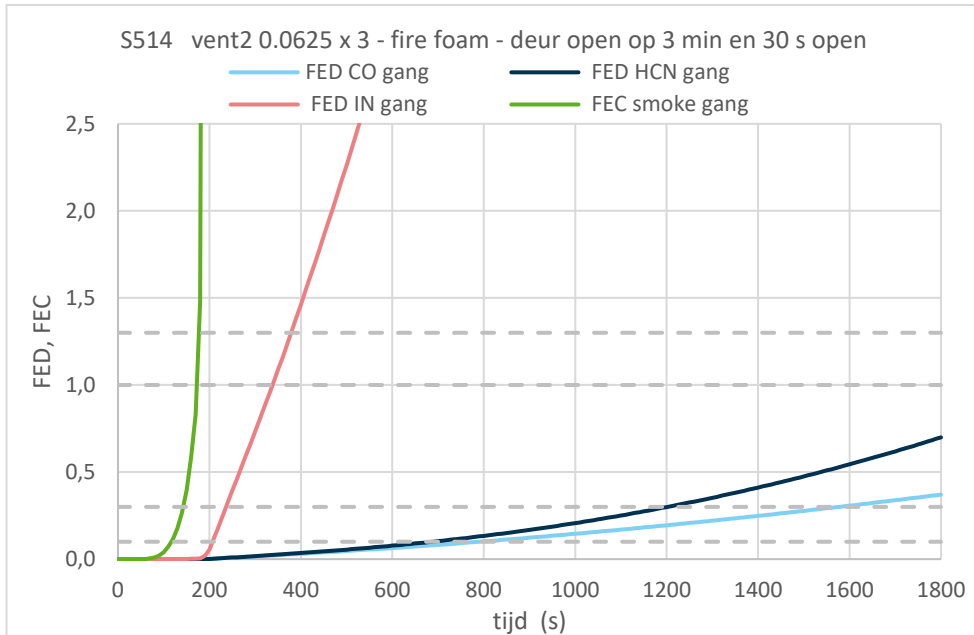
UL upper layer
 LL lower layer
 kamer1 de brandruimte
 (L), (R) de waarden van de curve staan op de linker dan wel de rechter as



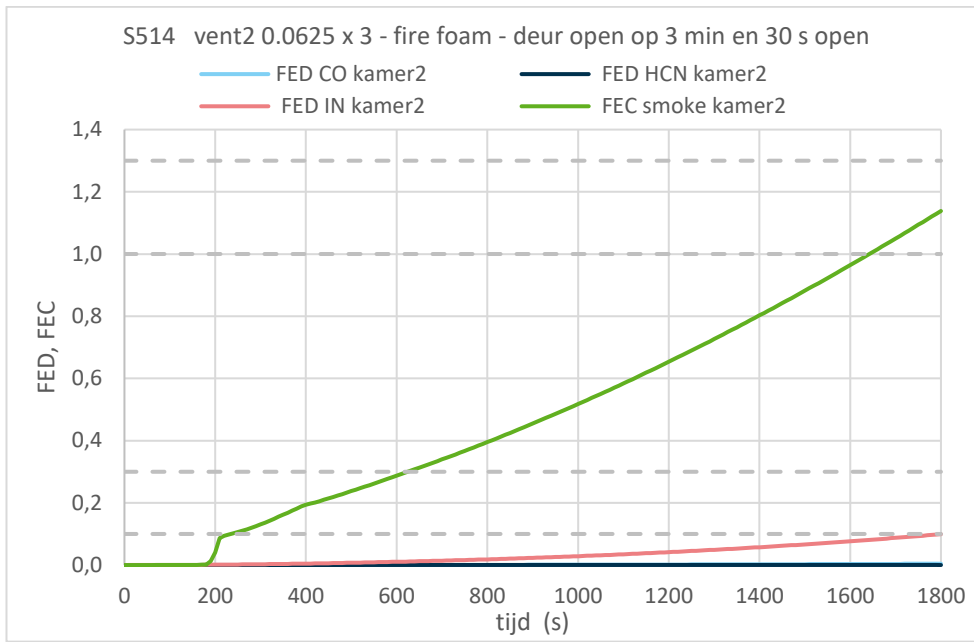
(R) de waarden van de curve staat op de rechter as



UL upper layer
 LL lower layer
 kamer1 de brandruimte
 kamer2 het tegenover liggende appartement
 (L), (R) de waarden van de curve staan op de linker dan wel de rechter as



FED IN FED asphyxiant gases (verstikkende gassen)



FED IN

FED asphyxiant gases (verstikkende gassen)