

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

TNO-rapport

TNO 2017 R10527

Methodieken voor bepalen handelingsperspectieven en schade bij ongevallen met gevaarlijke stoffen

Methodiekontwikkeling ten behoeve van het Scenarioboek
Externe Veiligheid

Datum	10 mei 2017
Auteur(s)	Inge Trijssenaar, Johan Reinders
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	87 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	LEV (Laboratorium Externe Veiligheid) Samenwerking tussen veiligheidsregio's in de Provincies Noord- Holland, Flevoland en Utrecht Postbus 92171 1090 AD Amsterdam Postadres: Brandweer Amsterdam-Amstelland T.a.v. Norbert Gret Postbus 92171 1090 AD Amsterdam
Projectnaam	Impulsomgevingsveiligheid 2016
Projectnummer	060.23499

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Deelproject methodiek zelfredzaamheid en handelingsperspectieven	4
1.2	Deelproject Ontwikkelen slachtoffer- en schadesystematiek.....	5
1.3	Leeswijzer	5
2	Methodiek voor schadebepaling BLEVE en wolkbrand.....	7
2.1	Doel en aanpak van de methodiek.....	7
2.2	Schademethodiek bij BLEVE en wolkbrand	8
2.3	Methodiek voor ruitschade bij BLEVE	12
2.4	Methodiek voor ruitschade bij kortdurende warmtestraling	18
2.5	Conclusies en aanbeveling	18
3	Methodiek voor bepalen van handelingsperspectieven voor wolkbrand	20
3.1	Geselecteerde handelingen voor zelfredzaamheid.....	21
3.2	Ontstekingstijd.....	22
3.3	Gevolgen wolkbrand.....	24
3.4	Resultaten wolkbrand	24
3.5	Methodiek wolkbrand.....	33
3.6	Conclusies	34
4	Methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor warme BLEVE	36
4.1	Geselecteerde handelingen voor zelfredzaamheid.....	36
4.2	Gevolgen BLEVE	37
4.3	Resultaten BLEVE.....	41
4.4	Methodiek BLEVE	42
4.5	Conclusies en aanbevelingen	43
5	Slachtoffermethodiek voor plasbrand	45
5.1	Doel van de methodiek.....	45
5.2	Scenariobeschrijving	45
5.3	Slachtoffermethodiek voor blootstelling aan hittestraling	46
5.4	Slachtoffermethodiek voor binnen schuilen	48
6	Methodiek voor bepalen van het handelingsperspectief voor plasbrand.....	63
6.1	Doel en aanpak van de methodiek.....	63
6.2	Handelingen bij plasbrand	63
6.3	Handelingsperspectieven voor personen binnen	63
6.4	Handelingsperspectieven voor personen buiten	65
7	Referenties.....	69
8	Definities en afkortingen	73
8.1	Definities zelfredzaamheid.....	73
8.2	Definities hittestraling	74
8.3	Afkortingen	74
9	Ondertekening	76

Bijlage 1: literatuursamenvatting schade bij wolkbranden	77
Bijlage 2: Statistische modelberekeningen voor bepalen van de kans op letsel bij een BLEVE	80
Bijlage 3: Andere grenswaarde hittestraling.....	81
Bijlage 4: Berekeningen voor vluchten buiten.....	82

1 Inleiding

In het kader van Impuls Omgevingsveiligheid 2015-2018 wordt door TNO een bijdrage geleverd aan onderstaande twee deelprojecten:

- 1) Ontwikkelen methodiek zelfredzaamheid en handelingsperspectieven
- 2) Ontwikkelen slachtoffer- en schade systematiek

Dit rapport beschrijft de resultaten van de werkzaamheden in het kader van Impuls Omgevingsveiligheid 2015 en 2016. De methodiek sluit aan bij (de werkwijze van) het scenarioboek externe veiligheid (www.scenarioboek.nl). Het scenarioboek is een verzameling kaarten met informatie over de mogelijke effecten, gevolgen, bestrijdbaarheid en maatregelen voor scenario's die kunnen ontstaan als gevolg van een ongeval met gevaarlijke stoffen.

De hoofdstukken 2, 3 en 4 bevatten de resultaten van de werkzaamheden uitgevoerd in 2015 met betrekking tot BLEVE- en wolkbrandscenario's. Deze zijn reeds eerder gerapporteerd. In de hoofdstukken 5 en 6 zijn de resultaten van de werkzaamheden toegevoegd die zijn uitgevoerd in 2016. Dit betreft het plasbrandscenario. Door nieuwe inzichten, alsmede uit discussies met de opdrachtgever naar voren gekomen wensen, zijn soms andere uitgangspunten en modellen gehanteerd en andere berekeningen uitgevoerd dan in de studie uit 2015. In 2017 zal de implementatie van de modellen centraal staan. Hierbij zullen de resultaten uit 2015 en 2016 tot een praktisch hanteerbare, eenduidige en consistente methodiek voor zelfredzaamheid worden samengevoegd.

1.1 Deelproject methodiek zelfredzaamheid en handelingsperspectieven

1.1.1 Aanleiding

Omgevingsveiligheid, ook wel externe veiligheid genoemd, betreft de veiligheid van burgers in de omgeving van opslag, gebruik of transport van gevaarlijke stoffen. Omgevingsveiligheid wordt onder andere bepaald door de kans op een ongeval met gevaarlijke stoffen, de gevolgeffecten én de resulterende schade daarvan op de leefomgeving. Belangrijke aspecten die de mate van omgevingsveiligheid beïnvloeden zijn: de mogelijkheden voor zelfredzaamheid en beschikbare handelingsperspectieven voor burgers.

In het kader van dit rapport worden daarbij de volgende definities gebruikt:

- *Zelfredzaamheid is de mate waarin een persoon zichzelf in veiligheid kan brengen bij een ongeval met gevaarlijke stoffen.*
- *Handelingsperspectief beschrijft een (zo effectief mogelijke) handeling die een burger kan uitvoeren om zichzelf in veiligheid te brengen. Hierbij dient dus de beste keuze gemaakt te worden op basis van uitkomst in schade/slachtoffers.*

Goede mogelijkheden voor zelfredzaamheid en het bieden van voldoende handelingsperspectieven kunnen de mogelijke gevolgen van een ongeval beperken.

Tot nu toe worden, in externe veiligheidsadviezen, de maatregelen die zelfredzaamheid bevorderen en de mogelijke handelingsperspectieven, ingevuld vanuit de kennis en beoordeling van de adviseur. In dit project wordt een methodiek

ontwikkeld die onderbouwd een inzicht geeft in de doeltreffendheid van maatregelen voor zelfredzaamheid en geboden handelingsperspectieven.

1.1.2 *Doel*

Het doel van dit project is om omgevingsveiligheidsadviezen (beter) te kunnen onderbouwen door de onderdelen zelfredzaamheid en handelingsperspectieven beter te kwantificeren en daarmee te waarderen.

Om dit doel te kunnen bereiken zijn onderstaande onderzoeksvragen geformuleerd:

- Wat is de doeltreffendheid van de maatregelen die de zelfredzaamheid bevorderen? D.w.z. wat is de mate waarin de zelfredzaamheid bevorderende maatregelen hun beoogde doel bereiken.
- Welk handelingsperspectief (blijven, vluchten, schuilen) is het meest doeltreffend bij de ongevalsscenario's met gevaarlijke stoffen uit het scenarioboek www.scenarioboek.nl?

1.1.3 *Werkwijze*

Aan de hand van drie geselecteerde scenario's uit het scenarioboek www.scenarioboek.nl, te weten een wolkbrand, een BLEVE en een plasbrand is een methodiek uitgewerkt voor het kwantitatief bepalen van de doeltreffendheid van verschillende maatregelen die de zelfredzaamheid bevorderen en het daarmee vaststellen van een meest effectief handelingsperspectief.

1.2 **Deelproject Ontwikkelen slachtoffer- en shadesystematiek**

1.2.1 *Aanleiding*

De mate van omgevingsveiligheid en de impact van een ongeval met gevaarlijke stoffen wordt mede bepaald door het aantal slachtoffers (doden EN gewonden). Hierbij is het soort trauma van belang voor de aard en intensiteit van de hulpvraag. De ontstane schade aan gebouwen en objecten speelt een belangrijke rol bij zowel het optreden van letsel als het kunnen bereiken van de slachtoffers in het gebied.

1.2.2 *Doel*

Het doel van dit –meerjarige- deelproject is het ontwikkelen van een methodiek om een snelle en juiste inschatting van het aantal slachtoffers, soort trauma en de ontstane schade te kunnen maken.

1.2.3 *Werkwijze*

Aan de hand van de drie eerdergenoemde scenario's uit het scenarioboek www.scenarioboek.nl (wolkbrand, BLEVE en plasbrand) is een aanzet voor een methodiek gemaakt voor het bepalen van de schade / slachtoffers.

1.3 **Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 wordt een methodiek voor de bepaling van de schade als gevolg van een BLEVE of wolkbrand beschreven. In hoofdstuk 3 wordt een methodiek beschreven voor het bepalen van het handelingsperspectief bij een wolkbrand. In hoofdstuk 4 wordt een methodiek beschreven voor het bepalen van het handelingsperspectief bij een warme BLEVE. Deze werkzaamheden zijn uitgevoerd en reeds gerapporteerd in 2015.

De hoofdstukken 5 en 6 beschrijven de werkzaamheden uit 2016 en hebben betrekking op een plasbrand. Hierin worden respectievelijk een methodiek ter bepaling van het aantal slachtoffers en een methodiek ter bepaling van het handelingsperspectief beschreven.
Hoofdstuk 7 bevat referenties en hoofdstuk 8 definities en afkortingen.

2 Methodiek voor schadebepaling BLEVE en wolkbrand

Dit hoofdstuk start met het benoemen van doel en aanpak van de schademethodiek. Vervolgens gaat het in op de schade die op kan treden bij een BLEVE en een wolkbrand scenario. Ten slotte richt het hoofdstuk zich op brandoverslag als gevolg van warmtestraling en op schade aan ruiten bij een BLEVE. De overige effecten en bijbehorende schade worden in het vervolgonderzoek (Impuls Omgevingsveiligheid 2016 -2018) verder uitgewerkt.

2.1 Doel en aanpak van de methodiek

Doel van de te ontwikkelen schademethodiek is een snelle en juiste inschatting te kunnen maken van de ontstane schade bij een ongeval met gevaarlijke stoffen. De methodiek dient toepasbaar te zijn voor zowel bestaande bouw als nieuwbouw. Verder dient de methodiek aan te sluiten bij het scenarioboek Externe veiligheid. Aan de hand van twee geselecteerde scenario's uit het scenarioboek, te weten een wolkbrand en een BLEVE is een aanzet voor een methodiek gemaakt voor het bepalen van de schade afhankelijk van de gebruikte materialen in bouwwerken.

In het plan van aanpak zijn drie mogelijke benaderingen genoemd voor de te ontwikkelen methodiek voor het bepalen van schade aan gebouwen:

1. Benadering op basis van gebouweisen: de eisen aan een gebouw dat zich in de 1e/2e/3e ring bevindt wordt bepaald met de te ontwikkelen methodiek.
2. Benadering op basis van schadecriteria. Bijvoorbeeld: welke warmtestraling leidt bij een blootstelling van 20 seconden tot het breken van ruiten of het ontstaan van secundaire branden. Deze grenswaarden zullen veranderen op basis van de eigenschappen van het gebouw.
3. Benadering op basis van effectiviteit: de effectiviteit van bouwkundige maatregelen wordt bepaald met de te ontwikkelen methodiek.

De eerste benadering voor de te ontwikkelen methodiek sluit goed aan bij de adviesrol van de veiligheidsregio's aan de gemeente bij nieuwbouw op locaties waar omgevingsveiligheid een rol speelt. De benadering betekent echter dat de methodiek een besluitvormings-richtlijn bevat over gebouweisen, die niet altijd op basis van de effecten van een enkel scenario te nemen zijn. Eisen dat een gebouw binnen een ring alle effecten van het betreffende scenario zou moeten kunnen weerstaan kan bovendien zeer hoge kosten opleveren. Er wordt namelijk uitgegaan van ernstige (catastrofale) scenario's met grote effecten maar zeer lage faalkansen. In de besluitvorming over gebouweisen bevindt zich onder meer een risicoafweging over de kans van een dergelijk ongeval op een specifieke locatie. Een dergelijke benadering voor de te ontwikkelen methodiek sluit daardoor ook niet direct aan bij de scenarioboekmethodiek.

De tweede benadering, de benadering op basis van schadecriteria, bevat de stap om de schade aan materialen/constructies te bepalen. Veel scenario's uit het scenarioboek geven echter een combinatie van effecten, bijvoorbeeld een combinatie van overdruk en warmtestraling bij de BLEVE en een combinatie van direct vlamcontact en overdruk bij een gaswolkexplosie. Het is hierbij dus nog

noodzakelijk om een combinatie methodiek te ontwikkelen die de schade geeft voor het totale scenario i.p.v. de schade voor alle verschillende effecten van het scenario. Omdat overdruk- en brandschade onderling interfereren (nadat ruiten breken door overdruk vatten gordijnen sneller vlam) is een dergelijke methodiek vrij gecompliceerd.

De derde benadering, op basis van de effectiviteit van bouwkundige maatregelen, combineert schadecriteria met alle optredende effecten van het scenario. Hierbij wordt per ring bepaald wat de schade is aan het betreffende materiaal/type constructie. Deze benadering sluit daarmee het beste aan bij het scenarioboek.

Met de resultaten van de schademethodiek kan bepaald worden welke maatregelen het meest effectief zijn. Vervolgens gaat het om de afweging tussen de kosten en de baten van maatregelen. De baten hangen ook af van de kans van het ongeval. Als de kans op een dergelijk scenario toeneemt dan zou je kunnen kiezen voor een zwaarder maatregelpakket. Het kan overigens zijn dat in de eerste ring niet of nauwelijks bescherming kan worden geboden.

In dit rapport beschrijven we de eerste stap in de ontwikkeling van de schademethodiek voor de scenario's BLEVE en wolkbrand.

2.2 Schademethodiek bij BLEVE en wolkbrand

De schademethodiek is opgesteld aan de hand van twee concrete voorbeeldscenario's uit het scenarioboek:

- 1) het gekozen voorbeeldscenario voor wolkbrand is: LPG spoorketelwagen, gatgrootte 80 mm (zogenaamde full bore rupture), vertraagde ontsteking.
- 2) het gekozen voorbeeldscenario voor de BLEVE is: warme BLEVE van een LPG tankwagen.

Deze voorbeeldscenario's zijn dus dezelfde scenario's als ook gehanteerd worden voor de methodiek voor zelfredzaamheid en handelingsperspectieven.

2.2.1 *Schade bij BLEVE*

De schade van een BLEVE wordt veroorzaakt door een combinatie van overdruk en relatief kortdurende warmtestraling alsmede potentieel direct vlamcontact binnen de straal van de vuurbal. In het geval van het voorbeeldscenario van de warme BLEVE van een LPG tankwagen is de duur van de vuurbal 11 seconden.

2.2.2 *Schade bij wolkbrand*

Over de materiële schade door een wolkbrand wordt in het Groene Boek het volgende geschreven:

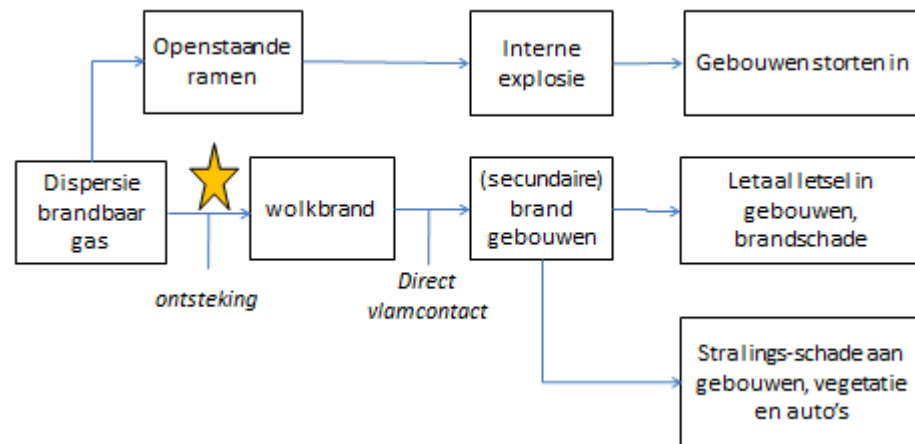
Een wolkbrand laat zich omschrijven als een zeer snelle verbranding in een gevormde gaswolk, waarbij geen overdrukeffecten optreden. Gebouwen en andere obstakels binnen de wolk zullen gedurende korte tijd zijn omgeven door het brandende deel van de gaswolk. Brandbare delen ervan zullen hierdoor vlam vatten. Brandbare materialen binnen gebouwen zullen (gedeeltelijk) door aanstraling via ramen en dergelijke vlam vatten. Een en ander zal leiden tot secundaire branden binnen de wolk. Als aangenomen wordt dat de materiële schade binnen de wolk volledig is, dan is de schadeomvang buiten de wolk

(*secundaire brand door warmtestraling*) vrijwel zeker verwaarloosbaar in de situatie van een "wolkbrand".

Enkele kenmerken van een wolkbrand zijn:

- de snelheid van het vlamfront ligt tussen 1 en 10 m/s [Groene Boek, 2003, deel 1A], de dikte van het vlamfront is variabel;
- de blootstellingsduur is de gemeten duur van de aanwezigheid van een vlam op 1 locatie. De blootstellingsduur van een wolkbrand is doorgaans kleiner dan 3 seconden, Het grootste deel van de gemeten blootstellingsduren ligt tussen de 2 en de 2,25 seconden [Margolin 2013];
- de gemiddelde warmtestraling is 84 kW/m² [Margolin 2013].

Om beter inzicht te verkrijgen in de mogelijke schade als gevolg van een wolkbrand, is het goederentrein ongeval bestudeerd, dat in 2009 is opgetreden in Viareggio (Italië). Bijlage 1 geeft een literatuursamenvatting van schadebeelden van het betreffende ongeval en de interpretatie daarvan. Het schademechanisme van de wolkbrand in Viareggio is samengevat in onderstaande figuur.

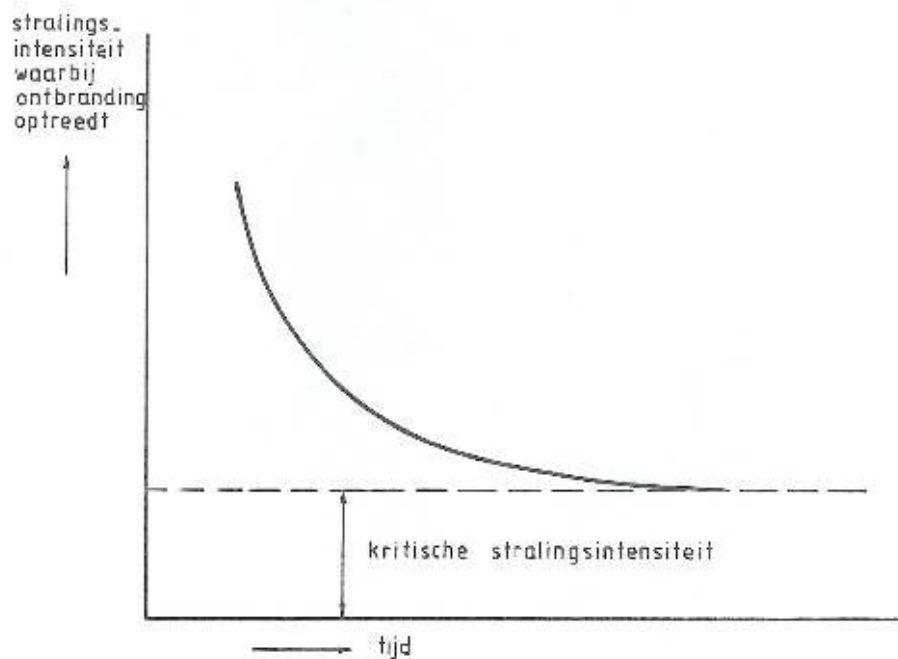


Figuur 2.1 Schademechanisme wolkbrand in Viareggio, 2009

2.2.3 Mechanismen voor brandoverslag

Brandoverslag kan optreden als gevolg van blootstelling aan warmtestraling en/of direct vlamcontact. De mate van bescherming die het gebouw biedt tegen het betreffende scenario is afhankelijk van de gebruikte materialen.

Voor de materialen hout, kunststoffen, glas en onbekleed staal zijn globale waarden voor de stralingsintensiteit bekend, waarbij voor verschillende materialen toegepast aan de buitenzijde van gebouwen en installaties, op schade moet worden gerekend [Groene Boek 2003]. Hiertoe is het begrip "kritische stralingsintensiteit" geïntroduceerd, waaronder wordt verstaan: die stralingsintensiteit die bij *langdurige* expositie nog juist schade oplevert, zie onderstaande figuur.



Figuur 2.2 Het begrip 'kritische stralingsintensiteit' [Groene Boek 2003]

In onderstaande tabel staan de kritische stralingsintensiteiten voor verschillende brandbare materialen afkomstig uit [Groene Boek 2003].

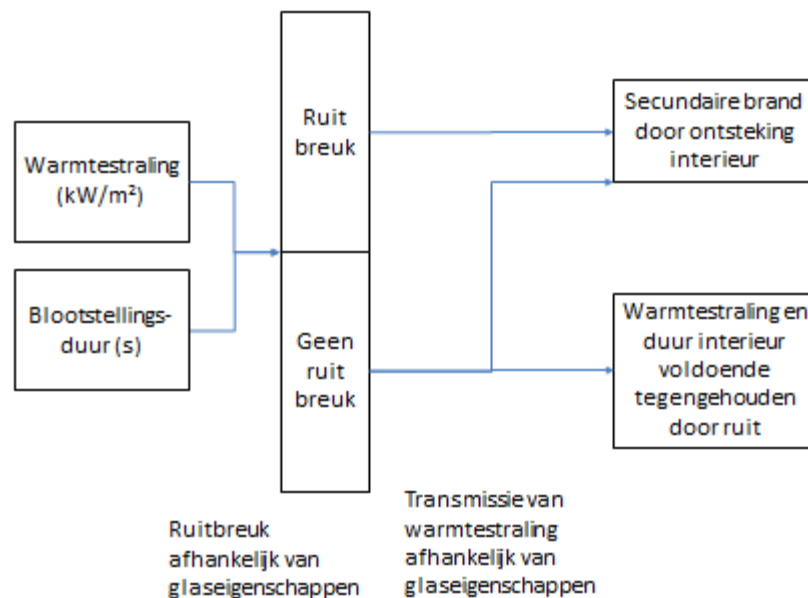
Tabel 2-1 Kritische stralingsintensiteiten voor verschillende brandbare materialen [Groene Boek 2003]

Materiaal	Kritische stralingsintensiteit [kW/m ²]		
	Met aansteekvlam; wel contact met het oppervlak	Met aansteekvlam; zonder contact met het oppervlak	Zonder aansteekvlam
Hout	5	15	35
Hennep, jute, vlas			40
Dakmateriaal gedrenkt in asfaltbitumen	3		
Dakmateriaal afgedenkt door aluminiumplaat	75		
Textiel			35
Zachtboard		6	25
Hardboard	5	10	30
Kurk		3	23

De invloed van de aanwezigheid van een aansteekvlam is aanzienlijk. In dit verband wordt opgemerkt dat in een praktische brandsituatie de aanwezigheid van een kleine ontstekingsbron (ook wel "piloted ignition") ter plaatse van het aangestraalde oppervlak niet mag worden uitgesloten [Groene Boek 2003]. Hierbij kan gedacht worden aan vonken of vliegvlam. In het algemeen is het echter niet zo

dat voor de beoordeling van brandoverslag gerekend hoeft te worden op een direct vlamcontact [Groene Boek 2003]. Daarom worden voor de kritische stralingsintensiteit in brandveiligheidsbeschouwingen veelal de waarden genomen zoals weergegeven in de middelste kolom van Tabel 2-1 [Groene Boek 2003]. Aldus wordt voor de kritische stralingsintensiteit van hout in het algemeen aangehouden: **15 kW/m²** [Groene Boek 2003]. In het Groene Boek wordt gesteld dat deze waarde hoort bij 'niet al te korte expositieduren', bijvoorbeeld **meer dan 30 minuten**. Daarmee is deze grenswaarde dus minder relevant voor wolkbrand of BLEVE scenario's, maar wel voor langduriger plasbrand of fakkelbrand scenario's.

Naast ontbranding van de gebruikte bouwmaterialen zou potentieel ook brandoverslag kunnen optreden doordat materialen achter de ruit ontbranden. Hierbij is de mate waarin de ruit warmtestraling doorlaat van belang. Daarnaast kan brandoverslag plaatsvinden indien een ruit breekt en het interieur daardoor wordt blootgesteld aan het scenario dat zich buiten afspeelt. Het schademechanisme is samengevat in onderstaande figuur.



Figuur 2.3 Schademecanisme warmtestraling

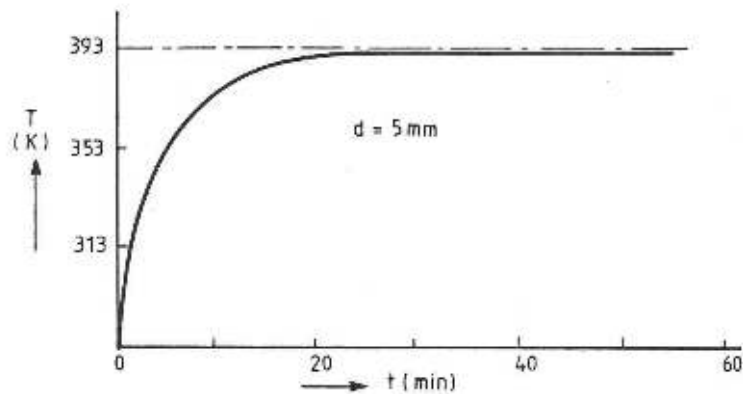
Brandoverslag door ontbranden interieur

Bij berekeningen van brandoverslag naar objecten binnenshuis wordt rekening gehouden met de doorlatendheid van glas voor warmtestraling. Hier kiezen we voor een relatief hoge doorlatendheid (conservatief): 82% voor enkel glas en 62% voor dubbel glas [Ashe 2003]. Bij brandoverslag naar het interieur kunnen we uitgaan van straling zonder aansteekvlam. De kritische stralingsintensiteit van het materiaal dat als eerste ontbrandt is 23 kW/m² (zie Tabel 2-1 'kritische stralingsintensiteiten voor verschillende brandbare materialen'). De grenswaarde voor ontbranding van het interieur bij langdurige blootstellingsduur is daarmee 28 kW/m² voor enkel glas en 37 kW/m² bij dubbel glas. In de volgende paragraaf zal worden geïllustreerd dat de gehanteerde doorlatendheid bijzonder conservatief is, terwijl bij deze stralingsintensiteit het glas zelf ook reeds zou falen bij langdurige blootstelling.

2.3 Methodiek voor ruitschade bij BLEVE

2.3.1 Model voor ruitbreuk

In het Groene Boek is een model opgenomen waarmee de blootstellingsduur geschat kan worden waarop ruitbreuk optreedt, afhankelijk van de warmtestralingsintensiteit waaraan de ruit wordt blootgesteld. Een implementatie van het model is aanwezig in EFFECTS. Met het model kan ruitbreuk op basis van fysische eigenschappen van de ruit worden bepaald. Een ruit barst als gevolg van thermische spanning als gevolg van temperatuurverschillen. De ruit barst op het moment dat de kritieke eindtemperatuur van de ruit wordt overschreden. Ruitbreuk treedt doorgaans pas op, op het moment dat door meerdere barsten een stuk glas wordt geïsoleerd en eruit kan vallen [Pagni 2002]. Aangezien het lastig te voorspellen is wanneer dit precies optreedt, is het gebruikelijk om conservatief aan te nemen dat de ruit breekt op het moment dat er een eerste barst ontstaat [Pagni 2002].



Figuur 2.4 Temperatuurverloop in een glazen ruit bij een invallende warmtestraling van 4 kW/m^2 [Groene Boek 2003]

2.3.2 Toetsing model en benodigde invoerparameters

In de literatuur zijn verschillende data gegeven voor de kritische stralingsintensiteit (zie Tabel 2-2) en voor de doorlatendheid (transmissie) van glas voor warmtestraling (zie Tabel 2-3). Zoals in de tabellen te zien is, variëren de waarden in de literatuur aanzienlijk. Deze variatie toont aan dat meer inzicht in ruiteigenschappen wenselijk is, zodat met een goede onderbouwing de doeltreffendheid van verschillende ruittypen tegen warmtestraling kan worden bepaald. Dat geldt in het bijzonder voor speciale ruittypen, zoals ruiten van brandwerend glas.

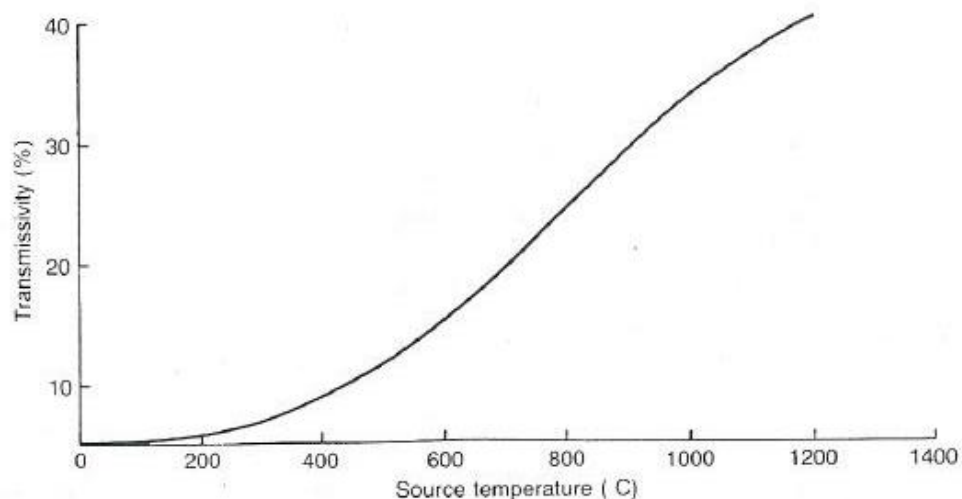
Kritische stralingsintensiteit

Tabel 2-2 Kritische stralingsintensiteit voor ruitbreuk

Kritische stralingsintensiteit (kW/m ²)	Glastype	Dikte glas (mm)	Bron
4 kW/m ²	Enkel glas	5 mm	[Groene Boek 2003], berekend
< 5,5 kW/m ²	Enkel glas	3 mm	[Harada 2000, Pagni 2002], test
7 tot 10 kW/m ²	Enkel glas	Onbekend	[Ashe 2003]
9 kW/m ²	Enkel Glas	6 mm	[Eggink 2015]
<10 kW/m ²	Dubbel glas	Onbekend, verschillende types	[Ashe 2003]
25 kW/m ²	Dubbel glas	6 mm & 6 mm	[Eggink 2015]
43 kW/m ²	Thermisch gehard glas	6 mm & 6 mm	[Eggink 2015]

Doorlatendheid van glas voor warmtestraling

De doorlatendheid (transmissie) van glas is afhankelijk van de brontemperatuur van de brand (zie onderstaande figuur). Een typische koolwaterstofbrand heeft een vlamtemperatuur van circa 1100°C.



Figuur 2.5 Doorlatendheid voor warmtestraling van normaal glas voor ruiten [Groene Boek 2003]

Tabel 2-3 Doorlatendheid voor warmtestraling van normaal glas voor ruiten

Transmissie (%)	Glastype	Glasdikte (mm)	Bron
70%	Enkel glas	2 tot 3 mm	[Hymes 1996], [Wenzel 1955]
82%	Enkel glas	Onbekend	[Ashe 2003]
62%	Dubbel glas	Onbekend	[Ashe 2003]
66%	Onbekend	Onbekend	[Eggink 2015]
31% (bij 1100°C brontemperatuur) ¹⁾	Onbekend	Onbekend	[Pagni 2002]
38% (bij 1100°C)	Onbekend	Onbekend	[Groene Boek, Hymes 1983]

1) Absorptie 59%, reflectie 10%

De waarden voor de kritische stralingsintensiteit gelden per definitie voor lange blootstellingstijden. De kritische stralingsintensiteit uit het Groene Boek kan gereproduceerd worden met behulp van het EFFECTS model in combinatie met de input uit Tabel 2-4. Bij een warmtestraling kleiner dan $4,2 \text{ kW/m}^2$ wordt de kritieke eindtemperatuur niet bereikt. De gebruikte termen zijn gedefinieerd in de lijst met definities en afkortingen.

Tabel 2-4 Verificatie kritische stralingsintensiteit van 4 kW/m^2

Inputs	
Heat load on glass (kW/m^2)	4,2
Density of glass (kg/m^3)	2600
Thickness of glass (mm)	5
Surface temperature of glass (K)	293
Ambient temperature (K)	293
Heat capacity of glass ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	840
Heat exchange coefficient of glass ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	7
Critical temperature of glass (K)	393
Emission coefficient	1
Absorbition coefficient	1

Gevoeligheidsanalyse glaseigenschappen

De kritische stralingsintensiteit is afhankelijk van de kritieke eindtemperatuur van het glas, de warmte-overdrachtscoëfficiënt en de emissie- en absorptiecoëfficiënten.

De tijdsduur voor het bereiken van de kritieke eindtemperatuur is afhankelijk van alle glaseigenschappen, met uitzondering van de warmte-overdrachtscoëfficiënt.

Toets aan experimenten

Het model is getoetst aan de hand van experimentele data uit Pagni [2002] en Harada [2000]. De input hiervoor is gegeven in onderstaande tabel, waarbij de warmtestraling verschilt tussen de verschillende experimenten. De resulterende berekeningen verschillen gemiddeld 12% en maximaal 30% met de experimenten. Pagni [2002] heeft de experimenten van Harada [2000] doorgerekend met een model waarin zowel het tijdstip wordt bepaald waarop het glas barst als het temperatuurverschil in het glas op dat tijdstip. Opvallend is dat dit berekende temperatuurverschil een stuk lager is ($66,7 \text{ }^\circ\text{C}$) dan het verschil tussen de kritieke eindtemperatuur en omgevingstemperatuur in Tabel 2-4 ($100 \text{ }^\circ\text{C}$). De berekende kritieke eindtemperatuur van Pagni [2002] is daarom gebruikt in de EFFECTS berekeningen voor de validatie aan Harada [2000]. De EFFECTS resultaten voor het tijdstip van barsten verschillen gemiddeld 12% en maximaal 15% met de berekeningen van Pagni [2002].

Tabel 2-5 Invoer voor toets aan experimenten van Harada [2000]

Parameters	
Inputs	
Heat load on glass (kW/m ²)	5,48
Density of glass (kg/m ³)	2500
Thickness of glass (mm)	3
Surface temperature of glass (°C)	26,85
Heat capacity of glass (J/kg*K)	820
Heat exchange coefficient of glass (W/m/K)	5
Critical temperature of glass (°C)	93,55
Emission coefficient	1
Absorbtion coefficient	0,65
Results	
Time to reach critical temperature (s)	166,5

Tabel 2-6 Resultaten voor 3 mm enkel glas

Warmtestraling (kW/m ²)	Tijd totdat de ruit barst (s)		
	[Harada 2000]	[Pagni 2002]	[EFFECTS]
5,48	207	196	167
6,69	144	144	126
9,11	90	95	85
5,45	231	198	168
7,4	128	124	111
9,09	81	95	85

2.3.3 Werkwijze en aannames

Met behulp van het model zijn warmtestralingsgrenswaarden voor ruitbreuk bij het (kortdurende) BLEVE scenario berekend. Voor enkel glas is een dikte van 5mm aangenomen, voor dubbel glas zijn twee ruiten met ieder een dikte van 5 mm aangenomen (5mm & 5mm).

Op basis van de toetsing van het model in paragraaf 2.3.2 is de volgende invoer gekozen voor het bepalen van de warmtestralingsgrenswaarden voor ruitbreuk bij blootstelling aan een BLEVE:

- 1) Kritieke eindtemperatuur is voor alle typen glas hetzelfde, voor de waarde van de kritieke eindtemperatuur wordt 360 K aangenomen (87 °C) [Pagni 2002].
- 2) Redelijk conservatieve aanname voor de absorptiecoëfficiënt = 0,65 op basis van experimentele gegevens. N.B. in een praktijksituatie kan roet op het glas zorgen voor volledige absorptie. Hiervoor is het echter noodzakelijk dat er reeds materialen zoals hout of plastic zijn ontbrand. Door de relatief lage kritische warmtestraling zal het glas naar verwachting eerder breken dan dat andere materialen ontbranden, het is doorgaans de zwakste schakel.

Tabel 2-7 Invoer voor ruitschadeberekeningen bij BLEVE warmtestraling

Parameters	
Inputs	
Heat load on glass (kW/m ²)	104
Density of glass (kg/m ³)	2600
Thickness of glass (mm)	5
Surface temperature of glass (K)	293
Heat capacity of glass (J/kg*K)	840
Heat exchange coefficient of glass (W/m/K)	7
Critical temperature of glass (K)	360
Emission coefficient	1
Absorbition coefficient	0,65
Results	
Time to reach critical temperature (s)	11

Dubbel glas

Bij dubbel glas zal de buitenste ruit doorgaans eerder bezwijken dan de binnenste ruit. De kritische stralingsintensiteit verandert in principe niet ten opzichte van enkel glas. Ook in het geval van dubbel glas kan de (buitenste) ruit immers uitvallen na verloop van tijd, waarna de binnenste ruit onbeschermd wordt blootgesteld. Wat wel verandert is tijdsduur waarna het dubbelglas barst bij een warmtestraling, die hoger is dan de kritische stralingsintensiteit.

Voor het faalmechanisme van dubbel glas gaan we uit van het volgende: een deel (35%) van de warmtestraling komt door de buitenste ruit en warmt de binnenste ruit op totdat dit barst, dit correspondeert met de hierboven aangenomen absorptie van 65% door de buitenste ruit, zoals deze ook voor een enkel glas. Het dubbel glas faalt op het moment dat de binnenste ruit ook barst. In ons voorbeeld hebben de buitenste en de binnenste ruit dezelfde dikte (5 mm) en andere eigenschappen (zie Tabel 2-7).

Voor de berekening van de warmtestralingsgrenswaarde waarbij dubbelglas bij blootstelling aan de warmtestraling van een BLEVE breekt berekenen we eerst de warmtestraling waarbij de binnenste ruit breekt ($Q_{\text{barst_binnenste_ruit}}$), de rekenwijze is hierbij gelijk als die bij enkel glas (zie Tabel 2-7). Deze delen we vervolgens door de transmissie (35%) van de buitenste ruit. In het geval dat de buitenste ruit andere eigenschappen heeft dan de binnenste ruit (de buitenste ruit is bijvoorbeeld dikker dan de binnenste ruit) toetsen we of de buitenste ruit bij deze warmtestraling ook gefaald is $Q_{\text{barst_buitenste_ruit}}$. Het dubbel glas faalt pas op het moment dat beide ruiten gebarsten zijn.

$$Q_{\text{breuk_dubbelglas}} = \text{maximum} \{Q_{\text{barst_buitenste_ruit}} \text{ en } (Q_{\text{barst_binnenste_ruit}} / 0,35)\} \quad (2.1)$$

In ons voorbeeld breekt zowel de buitenste ruit als de binnenste ruit bij een (directe) blootstelling aan 104 kW/m². Het dubbelglas breekt dan bij $Q_{\text{barst_binnenste_ruit}} / 0,35 = 300 \text{ kW/m}^2$

2.3.4 Resultaten voor BLEVE scenario

De totale duur van de BLEVE vuurbal fenomeen in het voorbeeld scenario bedraagt 11 seconden. Voor de verschillende glastypen is de warmtestraling berekend, die deze glastypen verdragen zonder te breken (zie onderstaande tabel).

Om de ruitschade ten gevolge van warmtestraling te tonen in het scenarioboek zijn de volgende rekenstappen nodig:

- 1) Bepaal oppervlak van 1^e ring en 2^e ring m.b.v. de afstanden in het scenarioboek
- 2) Bepaal de warmtestralingsgrenswaarde voor het scenario in geval van enkel glas, dubbel glas etc. (zie Tabel 2-8 voor het voorbeeldscenario)
- 3) Bepaal effectafstand en oppervlak behorend bij deze max. warmtestraling
- 4) Bepaal oppervlak waarin de warmtestralingsgrenswaarde wordt overschreden
- 5) Bepaal oppervlakte% van betreffende ring waarin ruitbreuk optreedt (afronden).

De oorspronkelijk bepaalde ringen van het scenarioboek blijven in stand. In Tabel 2-9 wordt per ring het % gesneuvelde ruiten weergegeven.

N.B. de slachtoffers die binnen vallen hangen af van de bescherming die het gebouw hen geeft en zijn daarmee deels afhankelijk van de materiele schade.

Hierbij nemen we vooralsnog aan dat de overige bouwmaterialen tenminste dezelfde warmtestraling kunnen verdragen. In het vervolgonderzoek (Impuls Omgevingsveiligheid 2016 -2018) zal moeten worden getoetst of de ruiten daadwerkelijk het bepalende bouw materiaal zijn voor de warmtestralingsgrenswaarde.

Tabel 2-8 Resultaten voor berekeningen voor BLEVE van een LPG tankwagen

	Max. warmtestraling bij 11s blootstellingsduur (kW/m ²)	Schade-afstand (m)
Enkel glas	100	110
Dubbel glas	300	40

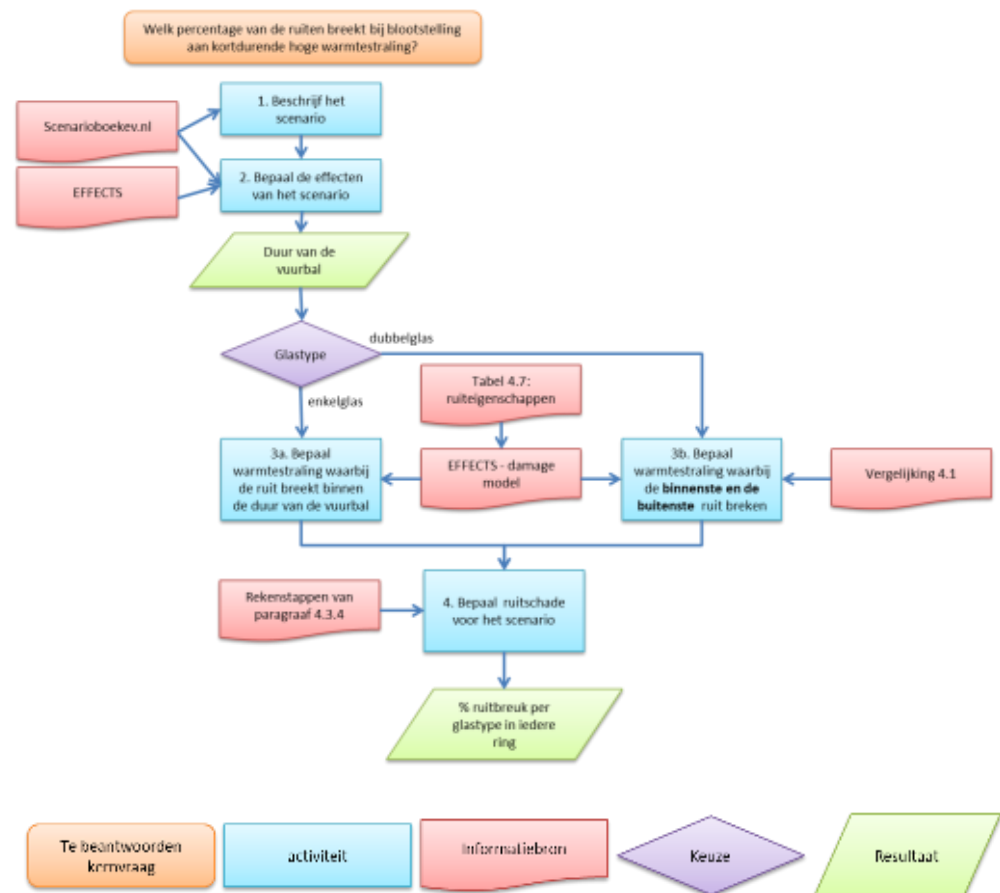
Tabel 2-9 Ruitschade ten gevolge van warmtestraling per ring van het scenarioboek

	Effectafstand (meter)	Hittestraling (kW/m ²)	Schade aan enkel glas	Schade aan dubbel glas
1^e ring	≤ 90	≥ 140	100%	20%
Grens 1 ^e ring: 99% letaal	90	140		
2^e ring	90 tot 220	140 tot 30	10%	-
Grens 2 ^e ring: 1% letaal	220	30		
3^e ring	220 tot 350	30 tot 10	-	-
Grens 3 ^e ring: 1% 1 ^e grd brw	350	10		

N.B. bij het bepalen van bovenstaande schadeafstanden is momenteel alleen rekening gehouden met ruitbreuk t.g.v. warmtestraling. Bij de BLEVE treedt naast warmtestraling ook overdruk op, die tot op een afstand van 90 m (1^e ring) kan leiden tot ruitbreuk. De volgende stap voor de schademethodiek in het vervolgonderzoek (Impuls Omgevingsveiligheid 2016 -2018) is het maken van onderscheid tussen verschillende glassoorten voor overdruk.

2.4 Methodiek voor ruitschade bij kortdurende warmtestraling

De ontwikkelde schademethodiek voor ruitschade bij kortdurende warmtestraling is samengevat in Figuur 2.6. De methodiek kan gebruikt worden voor het beoordelen van enkel en dubbel glas bij blootstelling aan scenario's met een hoge stralingsintensiteit in combinatie met een korte blootsteldingsduur, zoals de BLEVE. Bij toepassing van deze methode voor het wolkbrand scenario, waarbij (binnen de brandbare wolk) een intensiteit van 84 kW/m^2 in combinatie met een (vaste) brandduur van 3 seconden wordt gebruikt, blijkt geen ruitbreuk mogelijk. Omdat bij dit scenario echter ook overdruk-effecten (opsluitings-situatie: confined / congested area) verwacht kunnen worden, is ruitbreuk door overdruk van de gaswolkexplosie het bepalende scenario voor schade binnenshuis.



Figuur 2.6 Methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor een wolkbrand

2.5 Conclusies en aanbeveling

Conclusies

In dit rapport is de eerste stap gezet in de ontwikkeling van de schademethodiek voor de scenario's BLEVE en wolkbrand. Er is een schademethodiek ontwikkeld voor het beoordelen van enkel en dubbel glas bij blootstelling aan scenario's met

een hoge stralingsintensiteit in combinatie met een korte blootstellingsduur, zoals de BLEVE. De ontwikkelde methodiek sluit aan bij de methode van het scenarioboek en maakt het mogelijk om het percentage gebroken ruiten te schatten in de verschillende ringen van een BLEVE.

Aanbeveling

Om goed aan te sluiten bij de praktijk en de (bouw-)regelgeving is het wenselijk om brandklassen te gebruiken voor de verschillende materialen in de schademethodiek. De normen voor brandoverslag [NEN 6065, NEN 6068, NEN 6069, NEN-EN-13501, NPR 9091] zijn echter ontworpen voor branden met een lange blootstellingsduur en lagere stralingsintensiteit vergeleken bij bijvoorbeeld een BLEVE scenario.

Als voorbeeld: de werking van verschillende typen brandwerend glas is gebaseerd op een of meerdere lagen in de ruit, die bij blootstelling aan de warmtestraling van een brand opschuimen [Eggink 2016]. Na het opschuimen is het glas ondoorzichtig en laat daardoor aanzienlijk minder warmtestraling door. Voor het opschuimen is echter wel een bepaalde (blootstellings)tijd nodig. Het is de vraag in welke mate dit type brandwerende glas nog bescherming biedt bij een zeer hoge warmtestraling gedurende korte blootstellingstijd. Op basis van de momenteel beschikbare informatie kan de mate van bescherming kan variëren tussen nihil tot volledig.

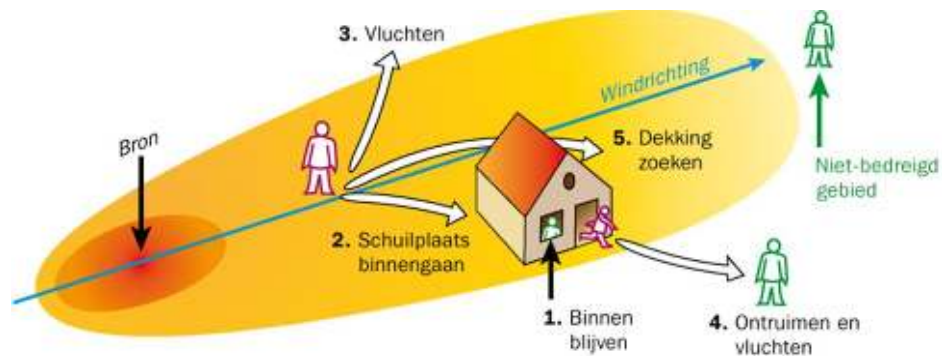
Het wordt aanbevolen om de snelheid van het opschuimen van brandwerend glas te onderzoeken om de bescherming door brandwerend glas bij een BLEVE scenario te kunnen bepalen.

3 Methodiek voor bepalen van handelingsperspectieven voor wolkbrand

De methodiek voor zelfredzaamheid en handelingsperspectieven is opgesteld aan de hand van een concreet voorbeeldscenario uit het scenarioboek. Het gekozen voorbeeldscenario voor wolkbrand is: LPG spoorketelwagen, gatgrootte 80 mm (full bore rupture), vertraagde ontsteking. De algemene beschrijving van het scenario wolkbrand is [scenarioboek.v.nl]:

Een wolkbrand wordt veroorzaakt doordat na bijvoorbeeld een botsing de vulaansluiting van de ketelwagen afbreekt. Hierdoor ontstaat een gat waar LPG uit stroomt. Er wordt een wolk gevormd die zich over de grond verspreidt. Ontsteking leidt tot een kortdurende vlammenzee. Als de wolk bij het ontbranden niet vrij kan expanderen ontstaat er een gaswolkexplosie.

Er worden vijf zelfredzame strategieën onderscheiden (zie Figuur 3.1) om zichzelf ten tijde van een (dreigend) ongeval in veiligheid te brengen: binnen blijven, een schuilplaats binnengaan, vluchten, (een gebouw) ontruimen&vluchten en dekking zoeken. Als handelingsperspectief wordt gezocht naar de beste mogelijke strategie, eventueel gecombineerd met aanvullende handelingen of (beschermende) maatregelen.



Figuur 3.1 zelfredzame strategieën

In een recent onderzoek van de Veiligheidsregio Rotterdam-Rijnmond [VRR 2015] wordt de maatregel 'schuilen/ontruimen' aanbevolen als basisadvies bij ongevallen met gevaarlijke stoffen. 'Schuilen/ontruimen' is een advies waarbij in eerste instantie wordt uitgegaan van 'schuilen', indien dit niet veilig blijkt (bijvoorbeeld voor de eerste lijn bebouwing) wordt door hulpverleners ter plaatse overgegaan tot ontruiming van onveilige schuillocaties. Door 'schuilen/ontruimen' altijd te hanteren bij ongevallen met gevaarlijke stoffen is geen informatie over de aard, omvang en specifieke situatie ter plaatse noodzakelijk alvorens kan worden gestart met de communicatie. Het basisadvies kan direct bij incidenten worden gecommuniceerd, waardoor bovendien het besef van de eigen handelingsmogelijkheden van aanwezige personen wordt verhoogd. Het basisadvies is een advies aan de operationeel leidinggevende dat geldt totdat de AGS, GAGS en/ of MPL een (ander) advies heeft uitgegeven [VRR 2015].

De resultaten van onderhavig onderzoek naar de doeltreffendheid van handelingen bij de scenario's wolkbrand en BLEVE geven input aan het advies van de AGS, GAGS en/of MPL. Daarnaast geeft het nadere invulling aan de wijze en benodigde snelheid van schuilen danwel ontruimen (en vluchten). Tenslotte wordt inzicht verkregen in de doeltreffendheid van het basisadvies 'schuilen/-ontruimen' ten opzichte van het resulterende handelingsperspectief.

3.1 Geselecteerde handelingen voor zelfredzaamheid

Voor het zelfredzaam gedrag bij een wolkbrand zijn slachtofferberekeningen uitgevoerd voor de volgende handelingen:

Indien een persoon zich binnen bevindt:

- a) niets doen (binnen blijven)
- b) ramen, deuren en ventilatie (af-)sluiten
- c) ramen en deuren wijd open zetten

Indien een persoon zich buiten bevindt:

- d) niets doen
- e) vluchten met de wind mee
- f) vluchten dwars (haaks) op de wind

De handelingen worden hieronder nader toegelicht,

- a) niets doen (binnen blijven)
ook bij niets doen is een persoon binnen beschermd, doordat het gebouw bescherming biedt tegen direct (kortstondig) vlamcontact en warmtestraling en doordat de concentraties van de (brandbare) stof buiten hoger zijn dan binnen. De binnenconcentratie wordt beïnvloed door de ventilatie van het gebouw. Het ventilatievoud is het getal dat aangeeft hoeveel maal per uur de kamerinhoud (of gebouwinhoud) aan verse lucht wordt ingebracht, het wordt uitgedrukt in de eenheid (verversingen) 'per uur'. Het gemiddelde ventilatievoud van een woning onder normale condities, met de ventilatie aan, enkele ramen op een kier en/of luchtroosters open is circa 1 per uur.
- b) ramen, deuren en ventilatie (af-)sluiten
het ventilatievoud van het gebouw wordt door het (af)sluiten van ramen, deuren en ventilatie gereduceerd. Voor het ventilatievoud na afsluiten wordt 0,25 per uur aangenomen [Groene Boek 2003].
- c) ramen en deuren wijd open zetten
het ventilatievoud van het gebouw wordt door het wijd open zetten van ramen en deuren en ventilatie vergroot tot 40 per uur [Groene Boek 2003].
- d) niets doen, buiten
men bevindt zich buiten en blijft op dezelfde locatie (staan kijken naar het incident bijvoorbeeld).
- e) vluchten met de wind mee
voor het onderzoeken van de doeltreffendheid van vluchten, gaan we er vanuit dat personen, die zich buiten bevinden (en uiteindelijk gaan vluchten), het

incident (vrijwel) direct ontdekken. Na het ontdekken van de calamiteit heeft een persoon nog 'pre-movement'-tijd nodig om de informatie te interpreteren, een besluit te nemen en eventueel voorbereidende acties te ondernemen [Oude Spraaksté 2009]. Voor vluchten wordt een pre-movementtijd van 100 seconden aangenomen [Oude Spraaksté 2009, Galea 2013]).

- f) vluchten dwars (haaks) op de wind
 ook voor haaks op de wind vluchten wordt een pre-movementtijd van 100 seconden aangenomen. Alleen de vluchtrichting verschilt met de voorgaande handeling.

De slachtofferberekeningen zijn uitgevoerd met het Self-Rescue Model (SeReMo) in de TNO ontwikkelversie van EFFECTS. SeReMo is een verzameling van letsel- en maatregelmodellen, waarmee de effectiviteit van maatregelen die de zelfredzaamheid bevorderen gekwantificeerd kan worden in termen van reductie van het aantal doden. De aannames die in deze modellering worden toegepast, worden in onderstaande paragrafen toegelicht.

3.2 Ontstekingstijd

Voor de effectberekening van de wolkbrand wordt het moment van maximale explosieve massa aangenomen. Dit is een conservatieve aanname voor het effect, echter niet altijd voor het zelfredzaam gedrag. Bij een snelle ontsteking van de wolk heeft men immers minder tijd om te handelen. Richtlijnen voor schatting van de ontstekingstijd zijn gegeven in [Trijssenaar 2013, p.34]. Voor de schatting van de ontstekingstijden wordt onderscheid gemaakt in de bevolkingsdichtheid van het bebouwd gebied, onderverdeeld in de categorieën stedelijk gebied, verstedelijkt gebied en landelijk gebied.

Twee belangrijke parameters voor het bepalen van het letsel van een wolkbrand zijn het moment van ontsteken en het moment waarop de burger begint met het treffen van maatregelen om zichzelf in veiligheid te brengen. Wanneer op het moment van ontsteken nog geen actie is ondernomen, dan heeft de maatregel uiteraard geen effect meer. In de bestaande methodieken voor risicoanalyse t.b.v. omgevingsveiligheid [HARI 2009, Paarse Boek 2005] wordt wel benoemd hoe de ontstekingskans kan worden bepaald, maar wordt niet verder ingegaan op het schatten van een ontstekingstijd. Om de ontstekingstijd af te leiden van de ontstekingskans, wordt voorgesteld om te werken met een scenario met een ontstekingstijd, corresponderend met een ontstekingskans van 95%.

De ontstekingstijd hangt af van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen [HARI 2009], [Paarse Boek 2005]. Ontstekingsbronnen die voor een ontsteking van de wolk kunnen leiden zijn onder meer auto's en aanwezigheid van bevolking (medewerkers of personen in huishoudens). De kans op ontsteking veroorzaakt door een ontstekingsbron is als volgt gemodelleerd [Paarse Boek 2005]:

$$P(t) = P_{present} * (1 - e^{-\omega t}) \quad (3.1)$$

waarbij:

P(t) de kans van ontsteking in het tijdsinterval van 0 tot t [-]

P_{present} de kans dat de bron aanwezig is op het moment dat de wolk passeert [-]
 ω de ontstekingseffectiviteit [s^{-1}]
 t de tijd [s]

De ontstekingskans van een bebouwd gebied wordt bepaald aan de hand van de bevolkingsdichtheid binnen de brandbare wolk.

$$P(t) = (1 - e^{-\omega t}) \quad (3.2)$$

waarbij:

$P(t)$ de kans van ontsteking in het tijdsinterval van 0 tot t [-]
 ω de ontstekingseffectiviteit [s^{-1}]
 t de tijd [s]
 n totaal aantal personen aanwezig binnen de brandbare wolk

Voor onderhavig project sluiten we aan bij de categorisering van het bebouwd gebied van de scenariokaarten, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen stedelijk gebied, verstedelijkt gebied en landelijk gebied. In het Groene Boek zijn bevolkingsdichtheden gedefinieerd voor 6 verschillende categorieën, zie onderstaande tabel.

Tabel 3-1 bevolkingsdichtheden voor bebouwd gebied categorieën [Groene Boek, 2003, deel 6]

Type woongebied	Bevolkingsdichtheid (pers./ha)
Natuurgebied (bos, water, hei e.d.)	0
Buitengebied (agrarisch)	1
Incidentele woonbebouwing	5
Rustige woonwijk (0% hoogbouw)	25
Drukke woonwijk (25% hoogbouw)	70
Stadsbebouwing (85% hoogbouw)	120

Voor het scenarioboek volstaat het hanteren van drie categorieën. De categorieën in het Groene Boek worden als volgt gecombineerd:

- 'landelijk gebied' wordt gelijk gesteld aan 'incidentele woonbebouwing';
- 'verstedelijkt gebied' is het gemiddelde van 'rustige' en 'drukke' woonwijk;
- 'stedelijk gebied' is gelijk aan 'stadsbebouwing'.

Onderstaande tabel toont de resulterende bevolkingsdichtheden in aantal personen per hectare.

Tabel 3-2 bevolkingsdichtheden voor 3 typen woongebied

Type woongebied	Bevolkingsdichtheid (pers./ha)
Landelijk gebied	5
Verstedelijkt gebied	47,5
Stedelijk gebied	120

Het aantal personen dat zich in de wolk bevindt, wordt bepaald door het oppervlak van de brandbare wolk. Het oppervlak en daarmee het aantal personen in de wolk verandert in de tijd. Voor het bepalen van de ontstekingstijd worden de EFFECTS resultaten van het oppervlak van de brandbare wolk als functie van de tijd gebruikt.

3.3 Gevolgen wolkbrand

In het ongevalsscenario wordt voor verstedelijkt gebied uitgegaan van een ontstekingstijdstip van 340 s ná het ontstaan van het gat in de ketelwagon. Dat is het moment waarop de ontstekingskans van de gaswolk 95% is. Voor stedelijk gebied wordt uitgegaan van een ontstekingstijdstip van 130 seconden. Voor landelijk gebied wordt de 95% ontstekingskans niet bereikt binnen de aanwezigheidsduur van de brandbare wolk. Daarom wordt voor dit type gebied de ontstekingstijd gelijkgesteld aan de tijd dat de maximale explosieve massa van de wolk optreedt: 685 seconden.

Tabel 3-3 Ontstekingstijd met 95% kans op ontsteking voor 3 typen woongebied

Type woongebied	Bevolkingsdichtheid (pers./ha)	Ontstekingstijd (minuten)
Landelijk gebied	5	11 (685 seconden)
Verstedelijkt gebied	47,5	6 (340 seconden)
Stedelijk gebied	120	2 (130 seconden)

Voor het letsel worden de volgende algemene uitgangspunten gehanteerd: Indien binnen het gebouw een brandbaar gasmengsel ontstaat, zal bij ontsteking een wolkbrand of explosie ontstaan binnen in het gebouw. Er is van uitgegaan dat alle aanwezigen binnen het gebouw dan overlijden (letaliteitsfractie = 1). Als er binnen het gebouw geen brandbaar gasmengsel bestaat, maar buiten wel, dan is aangenomen dat er buiten een wolkbrand ontstaat. Als gevolg van deze wolkbrand kunnen secundaire branden aan of binnen het gebouw ontstaan, waardoor er alsnog slachtoffers vallen in het gebouw. Het gehanteerde percentage letaal letsel als gevolg van secundaire branden is 21.5% voor woongebouwen [Ashe, 2003]. Bij ontsteking van een brandbare wolk is het mogelijk dat er een gaswolkexplosie optreedt, waarbij overdrukeffecten van belang zijn voor de schade. Dat laatste is alleen het geval wanneer een deel van het gas raakt opgesloten ('confinement') [Gele boek, p. 5.27]. In dit onderzoek is geen rekening gehouden met eventuele overdrukeffecten ten gevolge van een gaswolkontbranding.

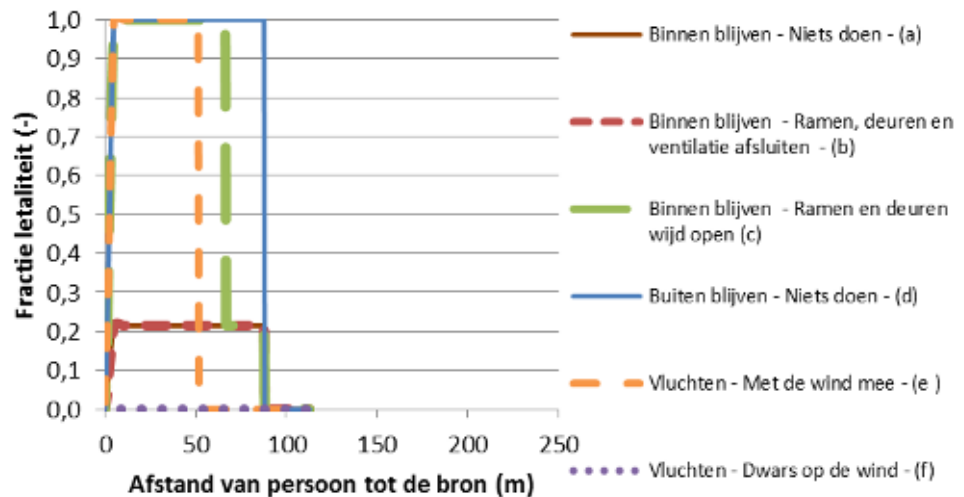
3.4 Resultaten wolkbrand

Deze paragraaf toont de resultaten voor de wolkbrand van de LPG spoorketelwagens bij verschillende handelingen van burgers.

3.4.1 Stedelijk gebied

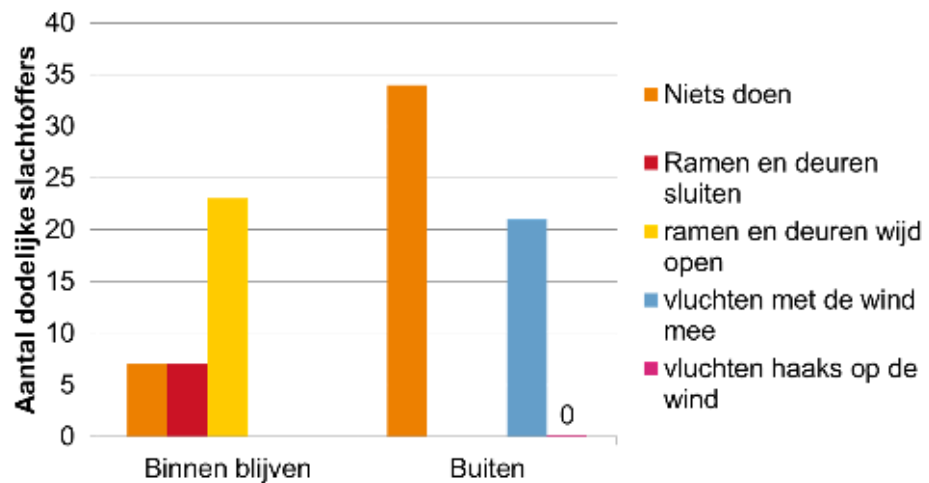
Figuur 3.2 toont de resultaten voor letaal letsel bij verschillende handelingen in stedelijk gebied als functie van de oorspronkelijke afstand van een persoon tot de bron. De handelingen (a t/m f) zijn beschreven in paragraaf 3.1. Figuur 3.2 laat zien dat er in stedelijk gebied geen verschil is tussen 'binnen blijven en niets doen' en 'binnen blijven en ramen, deuren en ventilatie afsluiten', in beide gevallen 22% letaal letsel tot 90 meter afstand van de bron. Dit is gelijk omdat, ook bij een open ventilatie, de LFL concentratie binnen nooit wordt bereikt (bij deze duur van uitstroming). De resterende 22 % letaal letsel wordt veroorzaakt doordat personen het gebouw niet (kunnen) verlaten na het ontstaan van secundaire brand aan het gebouw (zie paragraaf 3.3). Indien men het gebouw niet verlaat na de wolkbrand en

het ontstaan van secundaire brand, kan dit letsel hoger uitpakken. Het wijd open zetten van ramen en deuren zorgt –tot een afstand van 70 meter- voor een brandbare wolk binnenshuis en zorgt daardoor voor 100% letaal letsel als gevolg van explosies in de gebouwen. ‘Buiten blijven en niets doen’ is iets minder veilig: het levert tot een afstand van 90 meter- 100% letaal letsel op. ‘Met de wind mee vluchten’ is – vanaf 50 meter van de bron- beter (lees veiliger) dan ‘buiten blijven en niets doen’ en ‘binnen blijven met de ramen en deuren wijd open’. ‘Haaks op de wind vluchten’ is de beste optie: ongeacht de afstand van de bron kan men zich tijdig in veiligheid brengen voordat de wolk ontsteekt.



Figuur 3.2 Letaal letsel bij verschillende handelingen als functie van de oorspronkelijke afstand van de persoon tot de bron voor een wolkbrand in stedelijk gebied (120 pers./ha)

Figuur 3.3 toont het totaal aantal slachtoffers bij verschillende handelingen in stedelijk gebied. De linkerhelft van Figuur 3.3 toont de resultaten voor een persoon die oorspronkelijk binnen is, de rechterhelft van Figuur 3.3 toont de resultaten voor een persoon die zich oorspronkelijk buiten bevindt. De figuur toont dat ‘haaks op de wind vluchten’ de beste optie is (7 doden bij binnen blijven/ramen en deuren sluiten en 0 doden bij buiten haaks op de wind vluchten) en dat ‘buiten blijven en niets doen’ de slechtste optie is (34 doden). Verder laat het zien dat bij binnen blijven het ‘wijd openzetten van ramen en deuren’ geen goed plan is (23 doden) en dat het nauwelijks uitmaakt ten opzichte van niets doen of je de ramen en deuren en ventilatie nog verder afsluit (beide 7 doden). Als je buiten bent en wilt vluchten, maakt de richting van vluchten behoorlijk uit. Als je geen idee hebt naar welke kant de wind waait, is het hier wellicht toch verstandiger om snel ergens naar binnen te gaan, aangezien het aantal slachtoffers bij ‘binnen blijven’ met 7 doden veel lager is dan de verkeerde kant uit vluchten (21 doden).



Figuur 3.3 Aantal slachtoffers bij verschillende handelingen in stedelijk gebied

Tabel 3-4 toont de invoer en resultaten van de EFFECTS - SeReMo berekeningen van de verschillende handelingen bij een wolkbrand in een stedelijk gebied. De tabel toont als invoer de vrijgekomen stof, de ontstekingstijd, bevolkingsdichtheid, de gebouweigenschappen en de aannames voor het vluchten. De tabel toont in de 'results' zowel het totaal aantal dodelijke slachtoffers als het aantal dodelijke slachtoffers uitgesplitst per oorzaak:

- 1) de persoon bevindt zich buiten in de brandbare wolk op het moment van ontsteking;
 - 2) er is een brandbare wolk binnen ontstaan, die ontsteekt en leidt tot een explosie binnen in het gebouw, waardoor de persoon overlijdt;
 - 3) de persoon overlijdt als gevolg van een secundaire brand van het gebouw.
- N.B. het totaal aantal dodelijke slachtoffers is niet altijd gelijk aan de som van het aantal slachtoffers van de verschillende oorzaken bij elkaar, doordat er soms zowel secundaire brand ontstaat als een explosie in het gebouw, de personen worden dan door een combinatie van deze oorzaken getroffen.

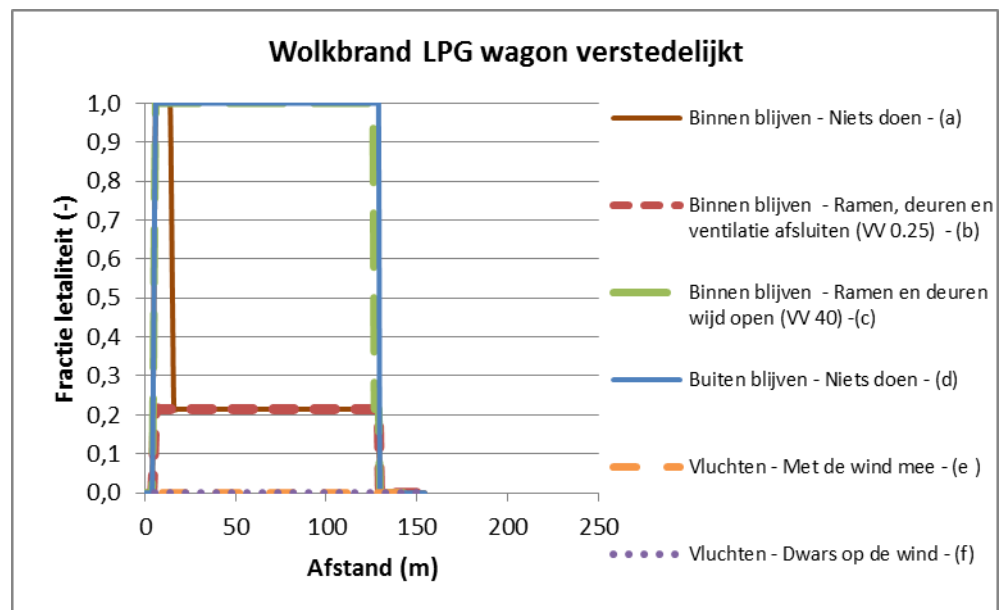
Tabel 3-4 invoer en resultaten van de EFFECTS - SeReMo berekeningen van de verschillende handelingen bij een wolkbrand in een stedelijk gebied

Inputs	a) binnen blijven – niets doen	b) binnen blijven – ramen en deuren sluiten	c) binnen blijven – ramen en deuren wijd open	d) buiten blijven – niets doen	e) Vluchten – met de wind mee	f) Vluchten –haaks op de wind
Chemical name	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)
Ignition time (s)	130	130	130	130	130	130
Population density (/ha)	120	120	120	120	120	120
Fraction of people indoors (-)	1	1	1	0	0	0
Building types	Dwellings	Dwellings	Dwellings			
Indoor ventilation rate (/hour)	1	0,25	40			
Self rescue behaviour	Do nothing	Do nothing	Do nothing	Do nothing	Flee	Flee
Start of self rescue					Upon alarm	Upon alarm
Detection and alarm time (s)					0	0
Delay time before start of self rescue actions (s)					100	100
Flee speed (m/s)					1,2	1,2
Flee direction					Alongwind	Crosswind
Results	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Nr. of lethalties inside flame area	0	0	0	34	21	0
Nr. of lethalties due to indoor ignition			20			
Nr. of lethalties indoors due to secondary fires	7	7	7			
Nr. of lethalties indoors (total)	7	7	23			
Total nr. of lethalties	7	7	23	34	21	0

3.4.2 Verstedelijk gebied

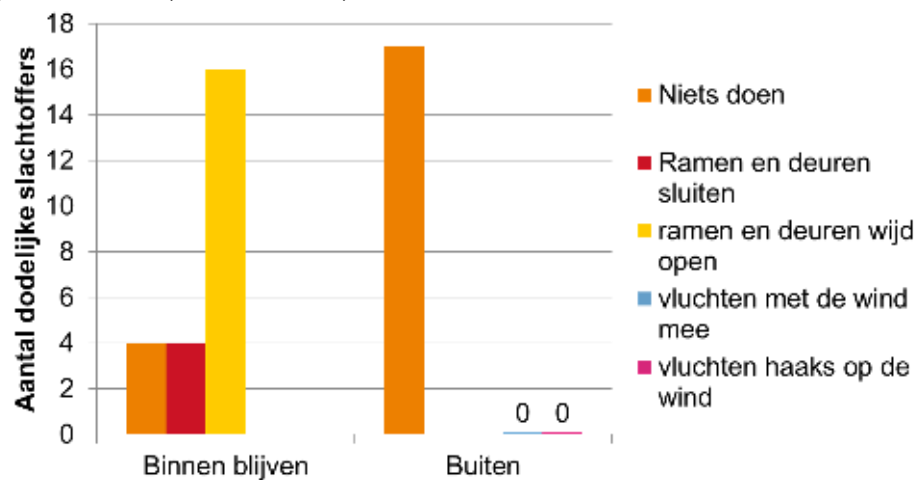
Figuur 3.4 toont de resultaten voor letaal letsel bij verschillende handelingen in verstedelijk gebied als functie van de oorspronkelijke afstand van een persoon tot de bron. De handelingen (a t/m f) zijn beschreven in paragraaf 3.1. Figuur 3.4 laat zien dat er in verstedelijk gebied een klein verschil is tussen 'binnen blijven en niets doen' en 'binnen blijven en ramen, deuren en ventilatie afsluiten': in beide gevallen 22% letaal letsel tot 130 meter afstand van de bron. Het resterende 22 % letaal letsel wordt veroorzaakt doordat personen het gebouw niet (kunnen) verlaten na het ontstaan van secundaire brand aan het gebouw (zie paragraaf 3.3). Indien men het gebouw niet verlaat na de wolkbrand en het ontstaan van secundaire brand, kan dit letsel hoger uitpakken. Het wijd open zetten van ramen en deuren zorgt –tot een afstand van 130 meter- voor een brandbare wolk binnenshuis en zorgt daardoor voor 100% letaal letsel als gevolg van explosies in de gebouwen. 'Buiten blijven en niets doen' is ongeveer even onveilig als de ramen open zetten, ook deze handeling levert tot een afstand van 130 meter 100% letaal letsel op. 'Met de wind

mee vluchten' en 'haaks op de wind vluchten' zijn de beste opties: ongeacht de afstand van de bron kan men zich in veiligheid brengen voordat de wolk ontsteekt.



Figuur 3.4 Letaal letsel bij verschillende handelingen als functie van de oorspronkelijke afstand van de persoon tot de bron voor een wolkbrand in verstedelijkt gebied (47,5 pers./ha)

Figuur 3.5 toont het totaal aantal slachtoffers bij verschillende handelingen in verstedelijkt gebied. De linkerhelft van Figuur 3.5 toont de resultaten voor een persoon die oorspronkelijk binnen is, de rechterhelft van Figuur 3.5 toont de resultaten voor een persoon die zich oorspronkelijk buiten bevindt. Het toont dat 'haaks op de wind vluchten' (0 doden) en 'met de wind mee vluchten' (0 doden) de beste opties zijn en dat 'buiten blijven en niets doen' (17 doden) de slechtste optie is. Verder laat het zien dat bij binnen blijven het 'wijd openzetten van ramen en deuren' geen goed plan is (16 doden) en dat het nauwelijks uitmaakt ten opzichte van niets doen of je de ramen en deuren en ventilatie nog verder afsluit (beide 4 doden). Als je buiten bent en wilt vluchten, maakt de richting van vluchten hier geheel niet uit (beide 0 doden).



Figuur 3.5 Aantal slachtoffers bij verschillende handelingen in verstedelijkt gebied

Tabel 3-5 toont de invoer en resultaten van de EFFECTS - SeReMo berekeningen van de verschillende handelingen (a t/m f) bij een wolkbrand in een verstedelijkt gebied. Een algemene toelichting is gegeven bij Tabel 3-4 voor stedelijk gebied.

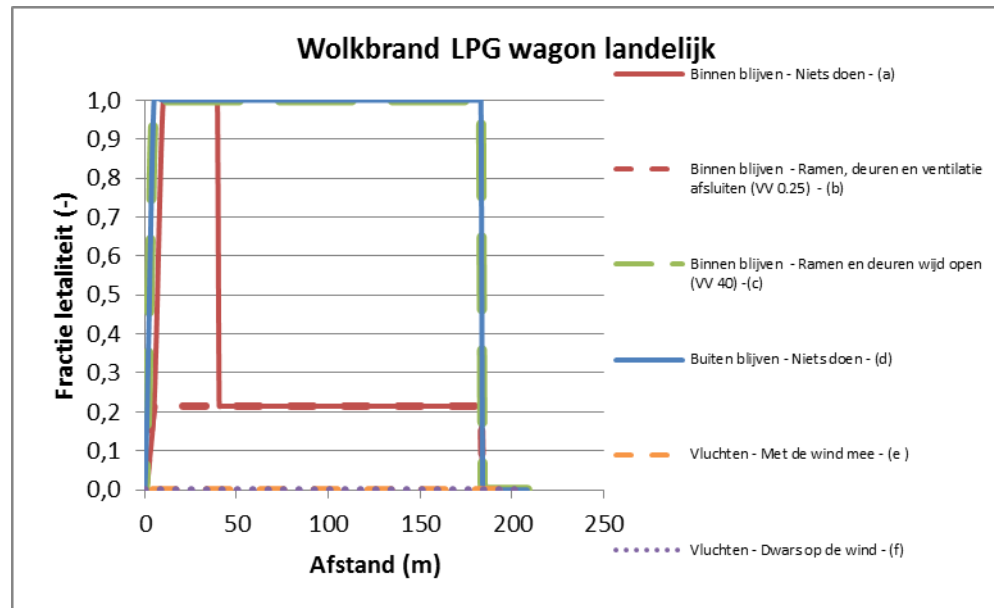
Tabel 3-5 invoer en resultaten van de EFFECTS - SeReMo berekeningen van de verschillende handelingen bij een wolkbrand in een verstedelijkt gebied

Inputs	a) binnen blijven – niets doen	b) binnen blijven – ramen en deuren sluiten	c) binnen blijven – ramen en deuren wijd open	d) buiten blijven – niets doen	e) Vluchten – met de wind mee	f) Vluchten – haaks op de wind
Chemical name	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)
Ignition time (s)	340	340	340	340	340	340
Population density (/ha)	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5
Fraction of people indoors (-)	1	1	1	0	0	0
Building types	Dwellings	Dwellings	Dwellings			
Indoor ventilation rate (/hour)	1	0,25	40			
Self rescue behaviour	Do nothing	Do nothing	Do nothing	Do nothing	Flee	Flee
Start of self rescue					Upon alarm	Upon alarm
Detection and alarm time (s)					0	0
Delay time before start of self rescue actions (s)					100	100
Flee speed (m/s)					1,2	1,2
Flee direction					Alongwind	Crosswind
Results	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Nr. of lethalties inside flame area	0	0	0	17	0	0
Nr. of lethalties due to indoor ignition	0,1	0	16	0	0	0
Nr. of lethalties indoors due to secondary fires	4	4	4	0	0	0
Nr. of lethalties indoors (total)	4	4	16	0	0	0
Total nr. of lethalties	4	4	16	17	0	0

3.4.3 Landelijk gebied

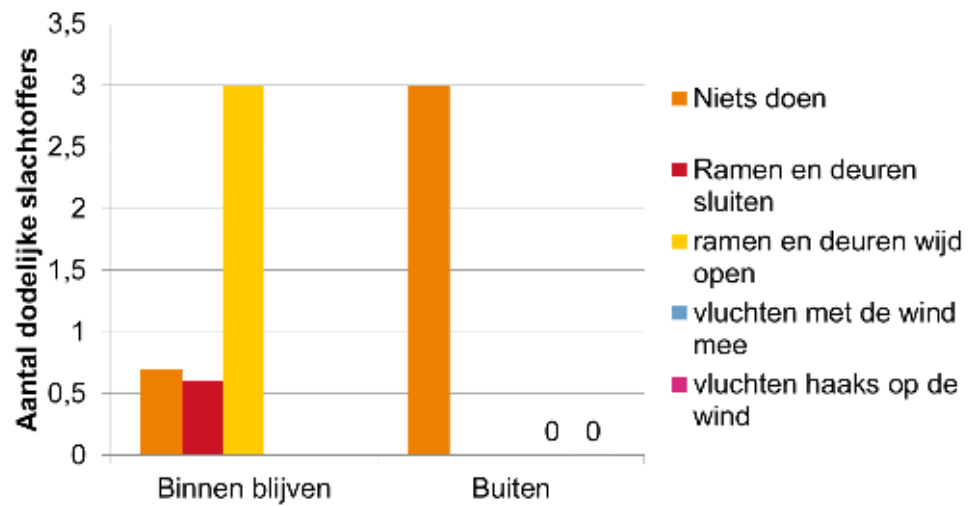
Tabel 3-6 toont de resultaten voor letaal letsel bij verschillende handelingen in stedelijk gebied als functie van de oorspronkelijke afstand van een persoon tot de bron. De handelingen (a t/m f) zijn beschreven in paragraaf 3.1. Figuur 3.6 laat zien dat er in landelijk gebied een klein verschil is tussen 'binnen blijven en niets doen' en 'binnen blijven en ramen, deuren en ventilatie afsluiten': tot ca. 40 meter afstand van de bron helpt het afsluiten. Het resterende 22 % letaal letsel wordt veroorzaakt doordat personen het gebouw niet (kunnen) verlaten na het ontstaan van secundaire brand aan het gebouw (zie paragraaf 3.3). Indien men het gebouw niet verlaat na de wolkbrand en het ontstaan van secundaire brand, kan dit letsel hoger uitpakken. Het wijd open zetten van ramen en deuren zorgt –tot een afstand van 180 meter- voor een brandbare wolk binnenshuis en zorgt daardoor voor 100% letaal letsel als gevolg van explosies in de gebouwen. 'Buiten blijven en niets doen' is even onveilig, ook deze handeling levert tot een afstand van 180 meter 100%

letaal letsel op. 'Met de wind mee vluchten' en 'haaks op de wind vluchten' zijn de beste opties: ongeacht de afstand van de bron kan men zich in veiligheid brengen voordat de wolk ontsteekt.



Figuur 3.6 Letaal letsel bij verschillende handelingen als functie van de oorspronkelijke afstand van de persoon tot de bron voor een wolkbrand in landelijk gebied (5 pers./ha)

Figuur 3.7 toont het totaal aantal slachtoffers bij verschillende handelingen in landelijk gebied. De linkerhelft van Figuur 3.7 toont de resultaten voor een persoon die oorspronkelijk binnen is, de rechterhelft van Figuur 3.7 toont de resultaten voor een persoon die zich oorspronkelijk buiten bevindt. De figuur toont dat 'haaks op de wind vluchten' en 'met de wind mee vluchten' overall de beste opties zijn (beide 0 doden) en dat 'buiten blijven en niets doen' en het 'wijd openzetten van ramen en deuren' de slechtste opties zijn (beide 3 doden). Verder laat het zien dat het bij binnen blijven nauwelijks uitmaakt of je de ramen en deuren en ventilatie nog verder afsluit (beide maximaal 1 dode). Als je buiten bent en wilt vluchten, maakt de richting van vluchten hier geheel niet uit (0 doden ongeacht de vluchtrichting), bij beide vluchtrichtingen heb je voldoende tijd om buiten het bedreigde gebied te komen voordat de wolk ontsteekt. Hoewel de strategie 'ontruimen en vluchten' niet is onderzocht kan men uit de resultaten van de andere handelingen afleiden dat deze strategie tot 0 doden zal leiden, indien men binnen 100 seconden buiten staat en start met vluchten. Bij 'haaks op de wind vluchten' en 'met de wind mee vluchten' is immers een pre-movementtijd van 100 seconden gehanteerd.



Figuur 3.7 Aantal slachtoffers bij verschillende handelingen in landelijk gebied

Tabel 3-6 toont de invoer en resultaten van de EFFECTS - SeReMo berekeningen van de verschillende handelingen (a t/m f) bij een wolkbrand in een landelijk gebied. Een algemene toelichting is gegeven bij Tabel 3-4 voor stedelijk gebied.

Tabel 3-6 invoer en resultaten van de EFFECTS - SeReMo berekeningen van de verschillende handelingen bij een wolkbrand in een landelijk gebied

Inputs	a) binnen blijven – niets doen	b) binnen blijven – ramen en deuren sluiten	c) binnen blijven – ramen en deuren wijd open	d) buiten blijven – niets doen	e) Vluchten – met de wind mee	f) Vluchten –haaks op de wind
Chemical name	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)	PROPANE (DIPPR)
Ignition time (s)	680	680	680	680	680	680
Population density (/ha)	5	5	5	5	5	5
Fraction of people indoors (-)	1	1	1	0	0	0
Building types	Dwellings	Dwellings	Dwellings			
Indoor ventilation rate (/hour)	1	0,25	40			
Self rescue behaviour	Do nothing	Do nothing	Do nothing	Do nothing	Flee	Flee
Start of self rescue					Upon alarm	Upon alarm
Detection and alarm time (s)					0	0
Delay time before start of self rescue actions (s)					100	100
Flee speed (m/s)					1,2	1,2
Flee direction					Alongwind	Crosswind
Results	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Nr. of lethalties inside flame area	0	0	0	3	0	0
Nr. of lethalties due to indoor ignition	0,1	0	3	0	0	0
Nr. of lethalties indoors due to secondary fires	0,6	0,6	0,6	0	0	0
Nr. of lethalties indoors (total)	0,7	0,6	3	0	0	0
Total nr. of lethalties	0,7	0,6	3	3	0	0

3.4.4 Discussie

De resultaten van landelijk, verstedelijkt en stedelijk gebied tonen een aantal trends ongeacht de aard van het gebied:

- Als men zich in de brandbare wolk bevindt, is men buiten kwetsbaarder voor de wolkbrand vergeleken met binnen (het verschil is een factor 5 in dodelijke slachtoffers).
- Ramen en deuren open zetten geeft een aantal dodelijke slachtoffers dat bijna gelijk is aan het aantal dodelijke slachtoffers als men zich op dezelfde plek buiten zou bevinden. Ramen en deuren open zetten heft daardoor de

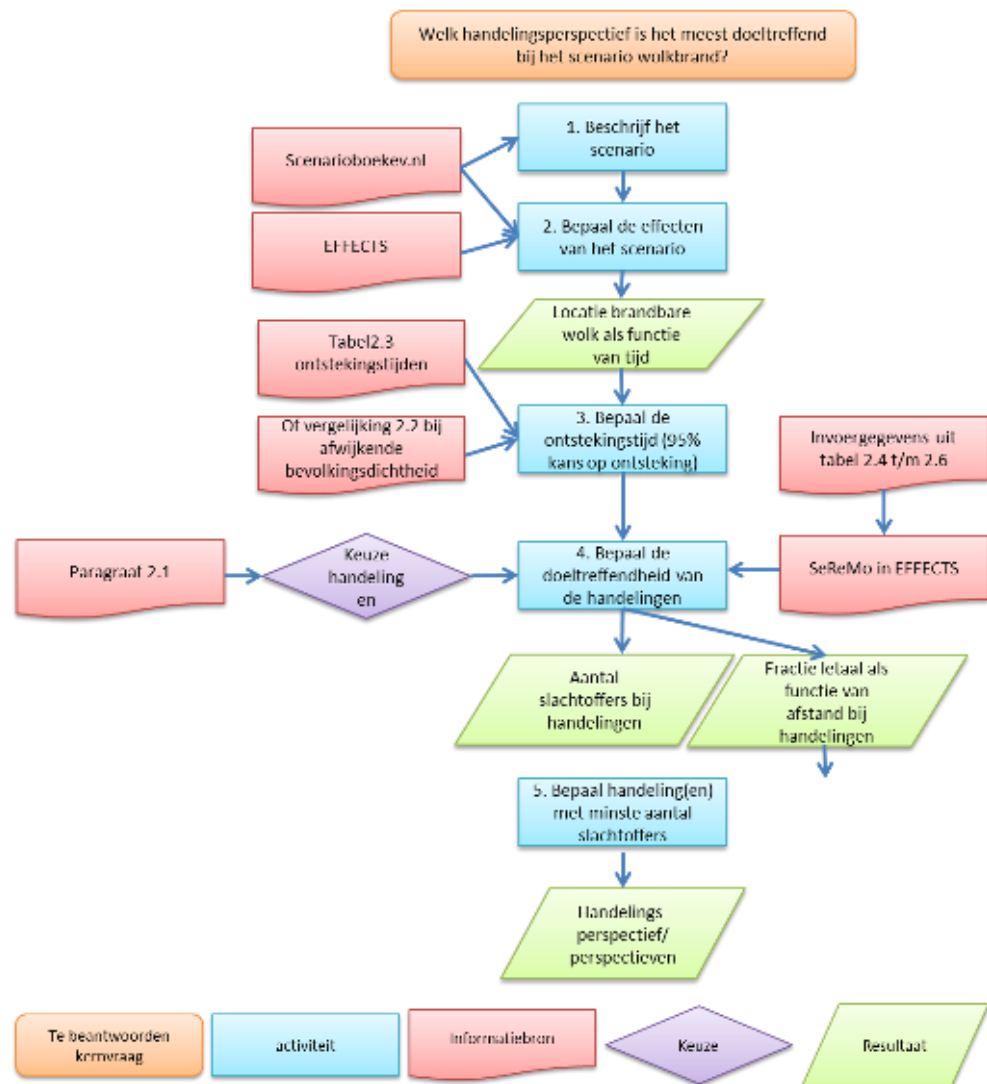
bescherming van het zich binnenshuis bevinden bijna geheel op en is daarom onverstandig.

- Ramen en deuren sluiten en de ventilatie uitzetten kan dichtbij de bron soms een beetje helpen om de brandbare wolk buitenshuis te houden. Hierbij loopt men overigens wel iets extra gevaar, doordat men zich tijdens het sluiten van ramen dichtbij het raam bevindt en daardoor extra wordt blootgesteld aan warmtestraling.

De resultaten van landelijk, verstedelijkt en stedelijk gebied verschillen door het verschil in ontstekingstijd: hoe meer personen per hectare hoe eerder de wolk ontsteekt en dus hoe minder tijd men heeft om handelingen uit te voeren. Dit heeft gevolgen voor het aantal slachtoffers in geval van vluchten. Als men in een stedelijk gebied met de wind mee vlucht is de kans om dodelijk slachtoffer te worden drie keer zo groot als de kans bij binnen blijven. Daarentegen kan men zich nog wel in veiligheid brengen als men haaks op de wind vlucht. Bij verstedelijkt gebied en bij landelijk gebied kan men zich vluchtend tijdig in veiligheid brengen.

3.5 Methodiek wolkbrand

De methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor een wolkbrand scenario is samengevat in Figuur 3.8.



Figuur 3.8 Methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor een wolkbrand

3.6 Conclusies

Gegeven het voorbeeldscenario wolkbrand na een lek uit een gat van 80 mm in een LPG spoorketelwagen, zijn de volgende conclusies te trekken:

- Het beste handelingsperspectief voor mensen die zich buiten bevinden bij aanvang van het incident is **vluchten**, waarbij men zich bij voorkeur haaks op de wind dient te bewegen;
- Bij binnen blijven zal het sluiten van ramen en deuren en het uitzetten van de ventilatie op sommige locaties (dichtbij de bron) helpen, onder voorwaarde dat men overgaat tot ontruimen nadat de wolkbrand is opgetreden en een secundaire brand heeft veroorzaakt;
- Het wijd open zetten van ramen en deuren is onverstandig;

Al bovenstaande conclusies gelden bij snel reageren, d.w.z. binnen enkele minuten, de ontsteking van de wolk vindt doorgaans snel plaats.

Bovenstaande resultaten van de doeltreffendheid van handelingen bij het wolkbrand scenario geven input aan het advies van de AGS, GAGS en/of MPL. Het basisadvies 'schuilen/ontruimen' [VRR 2015] kan bij dit scenario op sommige locaties (dichtbij de bron) helpen. Voor de personen die zich buiten bevinden kan het basisadvies leiden tot de handeling 'een schuilplaats binnen gaan', die veel minder doeltreffend is dan de handeling 'vluchten'.

4 Methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor warme BLEVE

De methodiek voor zelfredzaamheid en handelingsperspectief is opgesteld aan de hand van een concreet voorbeeldscenario uit het scenarioboek www.tno.nl/scenarioboek. Het gekozen voorbeeldscenario voor de BLEVE is: warme BLEVE van een LPG tankwagen. De algemene beschrijving van het scenario BLEVE is [[scenarioboek](http://www.tno.nl/scenarioboek)]:

Een warme BLEVE wordt veroorzaakt doordat een aanwezige brand de druk in de LPG-tank doet oplopen. Hierdoor verzwakt en bezwijkt de tankwand. LPG komt vrij en ontsteekt. Er ontstaat een vuurbal en een drukgolf.

Bij een warme BLEVE is er tijd voor het uitvoeren van zelfredzame handelingen in de periode vanaf het ontstaan van een brand onder de LPG tankwagen en het optreden van de daadwerkelijke BLEVE.

Voor het bepalen van de doeltreffendheid van verschillende zelfredzame handelingen is voor de warme BLEVE geen model nodig in EFFECTS-SeReMo. De duur van de effecten van het feitelijke vuurbal scenario is namelijk verwaarloosbaar ten opzichte van de ontstaansduur van het fenomeen: de beschikbare tijd tussen het ontstaan de brand onder tankwagen en het faaltijdstip. De handelingen vinden dus niet tijdens de BLEVE plaats, maar in de opwarmfase daaraan voorafgaand. Daarom is het voor het doorrekenen van de verschillende handelingen voor de warme BLEVE niet nodig om het model voor de handelingen te integreren met een vuurbal model. De methodiek voor het bepalen van de doeltreffendheid van verschillende zelfredzame handelingen is grotendeels opgezet ten behoeve van dit onderzoek. De onderliggende aannames zijn in dit hoofdstuk beschreven. Bij het uitvoeren van de berekeningen is gebruik gemaakt van Excel.

4.1 Geselecteerde handelingen voor zelfredzaamheid

Voor het zelfredzaam gedrag bij een warme BLEVE zijn de volgende handelingen geselecteerd:

Indien een persoon zich binnen bevindt:

- a) niets doen
- b) ramen en deuren wijd open zetten
- c) ramen en deuren wijd open zetten & gordijnen dicht
- d) toilet/ onder de trap, ruimte binnenshuis zonder ramen opzoeken

Indien een persoon zich buiten bevindt:

- e) niets doen
- f) vluchten (richting maakt niet uit)

De optie 'ramen en deuren sluiten' wordt in het geval van de BLEVE niet uitgewerkt. Er wordt aangenomen dat 'ramen en deuren sluiten' bij een BLEVE gelijk is aan 'niets doen'. Bij de BLEVE wordt immers geen brandbare stof naar binnen geventileerd, het sluiten van – in basis situatie op een kier staande- ramen en deuren zal daarom weinig effect hebben op de schade van de BLEVE. De

methodiek voor het bepalen van de doeltreffendheid van de handelingen a, b, e en f wordt hieronder toegelicht. De opties c en d worden in het vervolgproject in 2016 uitgewerkt.

4.2 Gevolgen BLEVE

a) Binnen - niets doen

Voor het handelingsperspectief schuilen kijken we naar de bescherming van de gebouwen tegen de warmtestraling van de BLEVE. In het scenarioboek externe veiligheid wordt momenteel voor de eerste ring aangenomen dat 10% van de personen die zich binnen bevinden zullen overlijden.

Tabel 4-1 Slachtoffers en schade door BLEVE hittestraling [scenarioboek EV, 2015]

TABEL "HITTESTRALING"											
	Effectafstand (meter)	Hittestraling (kW/m ²)	Slachtoffers buiten (%)				Slachtoffers binnen (%)				Schade aan objecten
			T1	T2	T3	T1	T2	T3			
1e ring	< 90	> 140	100	0	0	0	10	20	20	50	Onherstelbare schade Alle brandbare materialen gaan branden
Grens 1e ring: 90% letsel	90	140									
2e ring	90 tot 220	140 tot 30	50	20	20	10	1	5	10	25	Gemiddelde schade Brandhaarden, vervorming van hout en kunststof
Grens 2e ring: 1% letsel	220	30									
3e ring	220 tot 350	30 tot 10	0	0	0	20	0	0	0	1	Lichte schade Geen branden, afbladderen verf en ernstige verkleuringen
Grens 3e ring: 1% letsel	350	10									

N.B. zowel in de risicoanalyse als in Trijssenaar [2013, p. 65] wordt 100% letsel aangenomen voor een dergelijke hoogte van de warmtestraling. In Trijssenaar [2013] wordt dit o.a. gebaseerd op het breken van glas, afhankelijk van het glastype: dubbelglas kan 25 kW/m² weerstaan zonder te breken, thermisch gehard glas kan ca. 43 kW/m² weerstaan [IPO 2010, Eggink 2015]). Deze waarden voor ruitbreuk zijn gebaseerd op langdurende warmtestraling. In de schademethodiek in hoofdstuk 2 is m.b.v. EFFECTS een schatting gemaakt voor kortere blootstellingstijden van glas aan een hogere warmtestraling. In Trijssenaar [2013, paragraaf 6.3.5.] is een methode gegeven om het aantal personen in te schatten dat zich in de buurt van het raam bevindt. Deze personen zullen direct letsel ondervinden ten gevolge van straling en eventuele glasscherven. We sluiten hier aan bij de methode en aannames van het scenarioboek. Wel wordt aanbevolen om hier de slachtoffermethodiek aan te passen aan de inzichten uit de schademethodiek.

De mate van bescherming van het gebouw tegen warmtestraling kan sterk afhankelijk zijn van het gebouwtype: afhankelijk van soort gevelbekleding, glasoppervlak en type glas zal een constructie verschillende kwetsbaarheid voor warmtestraling hebben.

b) Binnen ramen en deuren wijd open zetten

De ramen en deuren worden open gezet vanuit de gedachte dat hierdoor het letsel ten gevolge van glasscherven kan worden voorkomen. Dichte ramen zijn veel gevoeliger voor overdruk. Tot op een afstand van circa 90 meter kan ruitbreuk optreden [scenarioboek externe veiligheid, Tabel 4-2]. Daarbuiten heeft overdruk weinig effect. Tot 90 meter bevinden personen zich echter nog in de eerste ring van de warmtestraling. Door het wijd open zetten van de ramen en deuren bevinden personen direct achter het raam zich in feite onbeschermd buiten, waar 100% letaal letsel wordt veroorzaakt door warmtestraling. Het is daarom voor dit scenario niet effectief om de ramen en deuren wijd open te zetten, zonder dat er aanvullende maatregelen worden genomen om de blootstelling aan warmtestraling tegen te gaan.

	Effectafstand (meter) *	Overdruk (bar) **	Schade aan objecten
Zone A	≤ 30	≥ 0,80	Letale vernietiging Volledige instorting van gebouwen. Meer dan 75% van alle buitenmuren zijn ingestort.
Grens zone A	30	0,80	
Zone B	30 tot 50	0,35 tot 0,35	Zware schade Onherstelbare schade. 50% - 70% van de buitenmuren zijn zwaar beschadigd. De overige muren zijn onbetroikbaar geworden.
Grens zone B	50	0,35	
Zone C	50 tot 70	0,35 tot 0,37	Gemiddelde schade Beschadigde daken, ernstige beschadigingen aan draagconstructies, ontzette muren, scheuren in gevels.
Grens zone C	70	0,37	
Zone D	70 tot 240	0,37 tot 0,03	Lichte schade Ruitbreuk en schade aan deurposten (tot ± 90 m). Bewoonbaar na kleine reparaties. Herstelbare schade.
Grens zone D	240	0,03	

Tabel 4-2 Schade door BLEVE overdruk [scenarioboek EV, 2015]

- c) Binnen - ramen en deuren wijd open zetten & gordijnen dicht
De gordijnen geven bescherming tegen de warmtestraling, totdat deze zelf ontsteken maar daar is een bepaalde stralingsduur en -intensiteit voor nodig die binnen 1^e en 2^e ring wel bereikt wordt.
- d) Binnen – toilet / onder de trap, ruimte binnenshuis zonder ramen opzoeken
De persoon schuilt in een ruimte waar deze niet geraakt kan worden door glasscherven van ruiten die falen als gevolg van de overdruk van de BLEVE, zoals het toilet of de ruimte onder de trap. Bij voorkeur wordt een ruimte gezocht die niet gevoelig is voor instorting, doordat er veel dragende delen van de constructie dichtbij zijn.
- e) buiten - niets doen
zie resultaten voor slachtoffers buiten in scenarioboek externe veiligheid
- f) vluchten
Voor de berekeningen van het handelingsperspectief vluchten kan gewerkt worden met statistische verdelingen van de benodigde tijd om te vluchten en de beschikbare tijd totdat de BLEVE optreedt (zie Figuur 4.2). De benodigde tijd is afhankelijk van de afstand tot een veilige locatie. Voor deze afstand maken we onderscheid tussen de 3 ringen uit het scenarioboek ev.nl. Met behulp van de statistische verdelingen van benodigde en beschikbare tijd kan vervolgens de kans worden bepaald dat iemand op tijd weg is als deze besluit te vluchten.

Voor de opties c en d dienen nieuwe maatregelmodellen te worden ontwikkeld.

In de berekening wordt een ondergrens en een bovengrens gehanteerd voor zowel de benodigde als de beschikbare tijd. De kans dat de benodigde tijd kleiner is dan de ondergrens is circa 1%. De kans dat de benodigde tijd kleiner is dan de bovengrens is circa 99%. De beschikbare tijd volgt een normale verdeling, de benodigde tijd volgt een lognormale verdeling [Galea, 2013].

Beschikbare tijd

Voor een tank zonder coating varieert de tijd tot het optreden van een BLEVE tussen de 5 en 25 minuten [Molag 2005], voor een tankwagen met een coating kan dit tot max 75 minuten¹ (bij onbeschadigde coating) worden gerekend.

Benodigde tijd

Vorbereidingsfase			Handelingsfase
Detectie	Alarmering	Pre-movement	<ul style="list-style-type: none"> • Ontruimen en vluchten • Vluchten • Schuilen • Dekking zoeken

Figuur 4.1 Te onderscheiden onderdelen van de benodigde tijd [Trijssenaar 2013]

Voor een BLEVE kunnen we in het beste geval te maken hebben met wakende personen, die een brand rondom de tankwagen (bijvoorbeeld bij een tankstation) direct kunnen waarnemen. Voor de minimale detectietijd wordt daarom 0 minuten aangenomen. De maximale ontdekkingstijd (= detectietijd + alarmeringstijd) voor personen in woningen en kantoren wordt met 15 minuten gelijk gesteld aan de ontdekkingstijd in de brandbeveiligingsconcepten [o.a. brandbeveiligingsconcept 2008]. In praktijk kan het voorkomen dat de dreigende BLEVE geheel niet ontdekt wordt. In dat geval is men afhankelijk van de alarmering door de hulpverlening. De ontdekking van een brand rondom een tankwagen door mensen buiten zal afhangen van of mensen de brand zien, ruiken of evt. horen. Mensen die zich buiten bevinden bewegen doorgaans, waardoor het zicht op de brand niet continu ontnomen zal zijn. Voor de maximale ontdekkingstijd voor personen buiten wordt 2 minuten aangenomen.

Na het ontdekken van de (potentiele) calamiteit heeft een persoon nog 'pre-movement'-tijd nodig om de informatie te interpreteren, een besluit te nemen en voorbereidende acties te ondernemen, zoals het verzamelen van waardevolle eigendommen [Oude Spraaksté 2009]. Een burger kan op basis van kennis of intuïtie de beslissing nemen om het gebouw te ontvluchten of een andere zelfredzame handeling uit te voeren. Voorgesteld wordt om als pre-movementtijd 100 seconden te hanteren voor personen die zich buiten bevinden en voor (gealarmeerde) personen die zich binnen in een kantoor bevinden [Galea 2013, Oude Spraaksté 2009]. Onderzoek van Purser [2003] geeft voor slapende personen in een woonhuis een 'maximale' pre-movementtijd van meer dan 20

¹ In [Molag 2006] is geconcludeerd dat voor een tankauto, gevuld met autogas, een 1 cm dikke coating voldoende zal zijn om de temperatuur van de tankwand gedurende 75 minuten onder de 300 °C te houden. Zie ook [brandweer.nl]. Aangezien onbekend is wanneer de BLEVE precies optreedt is het verstandig en conservatief om de genoemde 75 minuten als maximum te nemen.

minuten. Omdat het daadwerkelijk maximum sterk uiteen kan lopen en we dit niet willen onderschatten nemen we voor de 'maximale' pre-movementtijd in ons model (een conservatieve) 40 minuten aan. D.w.z. 1% van de personen heeft een pre-movementtijd langer dan 40 minuten. Hiermee wordt er rekening gehouden met personen die nog verminderd alert zijn (slapen voorafgaand aan alarmering).

De verplaatsingstijd bestaat uit een benodigde verplaatsingstijd om vanuit een pand naar buiten te gaan (ontruiming) en vervolgens de verplaatsingstijd buiten om buiten het bedreigde gebied te komen.

Personen die zich binnen bevinden, moeten eerst het pand verlaten. In de brandbeveiligingsconcepten staan ontruimingstijden voor verschillende gebouwtypen (zie bijvoorbeeld het 'brandbeveiligingsconcept gebouwen met een publieksfunctie' [2008] en het 'brandbeveiligingsconcept industriegebouwen' [2008]). In de brandbeveiligingsconcepten wordt een ontruimingstijd van (maximaal) 15 minuten na alarmering gehanteerd voor een gemiddeld gebouw, mits niet zeer complex en/of lager dan 50 meter. De maximale ontruimingstijden van brandbeveiligingsconcepten zijn voor onze toepassing te conservatief, het gemiddelde kantoor zal in ongeveer 5 minuten na alarmering grotendeels ontruimd zijn. Wij gaan hier uit van een extra benodigde verplaatsingstijd van 1 minuut voor een woning en 1 tot 10 minuten voor een kantoor (ontruimingstijd). Voor specifieke locaties met veel hoogbouw kan maatwerk nodig zijn.

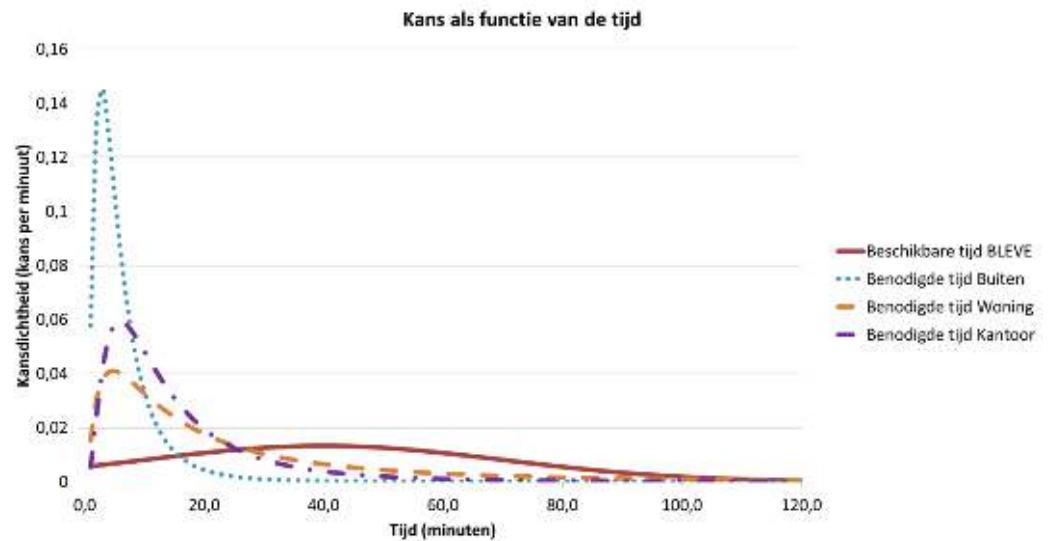
De benodigde verplaatsingstijd buiten is afhankelijk van de afstand tot de buitenkant van de 2^e ring. De maximale verplaatsingsafstand buiten is dus gelijk aan de effectafstand van de 2e ring: 220 meter. De verplaatsingstijd wordt berekend op basis van de af te leggen afstand (afhankelijk van de ring) en de vluchtsnelheid. Voor de vluchtsnelheid wordt 1,2 m/s aangenomen [Building Research Establishment 2005, Raben 2008, Trijssenaar 2003, Jin 1997], dit is een wandelsnelheid die voor het grootste deel van de personen te halen is. Het is niet te verwachten dat personen de noodzaak voelen om te rennen. Hiermee komen we op ruim 3 minuten om zich buiten tot buiten het bedreigde gebied te verplaatsen. De totale maximale verplaatsingstijd (ontruimingstijd + verplaatsingstijd buiten) voor een woning wordt dan ruim 4 minuten en voor een kantoor 13 minuten.

Onderstaande tabel geeft de ontdekkings- en pre-movementtijden voor alle ringen en de verplaatsingstijden voor de 1^e ring:

Tabel 4-3 Input voor benodigde tijd voor personen in de 1^e ring

Locatie	Ontdekkings-tijd (min)		Pre-movement tijd (min)		Verplaatsingstijd (1e ring)		Totale benodigde tijd (min)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Buiten	0	2	1,7	1,7	1,8	3,1	3,5	6,7
Woning	0	15	1,7	40	2,8	4,1	4,5	59
Kantoor	0	15	1,7	1,7	2,8	13	4,5	30

Het 'standaard gebouw' krijgt als eigenschap de benodigde tijd mee. Afhankelijk van het gebouwtype kan een andere waarde worden ingevuld. In principe wordt 1 standaardgebouw met eigenschappen gehanteerd, waarbij de input van de eigenschappen kan worden gevarieerd.



Figuur 4.2 Verdeling beschikbare en benodigde tijd - om zich in veiligheid te brengen- bij een BLEVE voor personen in 1^e ring

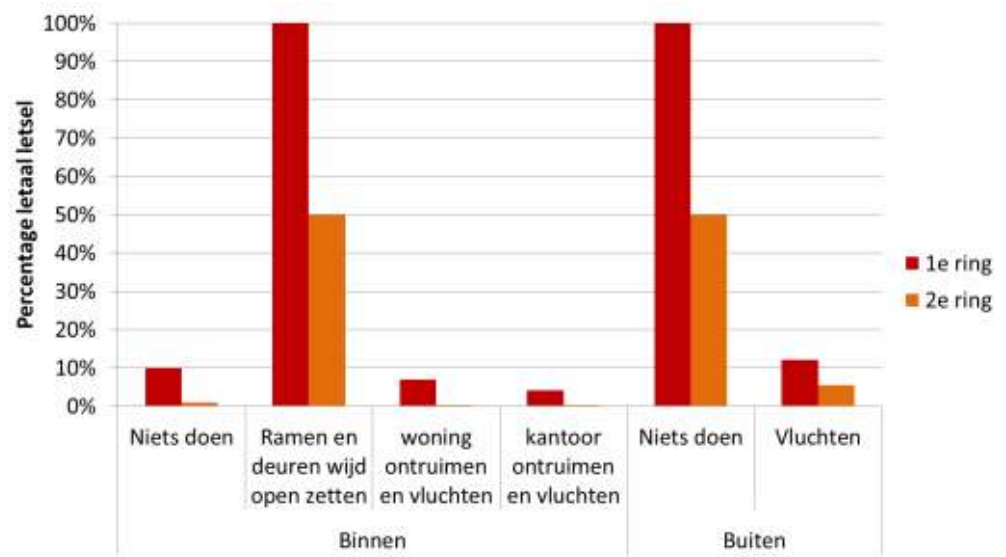
De resulterende kans dat de benodigde tijd langer is dan de beschikbare tijd geeft de kans op letsel. De hoogte van het letsel wordt bepaalde door het bijbehorende letsel in de betreffende ringen zoals gegeven in het scenarioboek.

4.3 Resultaten BLEVE

Figuur 4.3 toont de resultaten van de berekeningen.

Voor de personen in de eerste ring die zich binnen bevinden is ontruimen en vluchten de beste handeling (voor een woning en een kantoor in de eerste ring respectievelijk 7% en 4% letaal letsel). Ramen en deuren wijd open zetten geeft het grootste letsel (100% in de eerste ring). Binnen blijven en niets doen geeft 10% letaal letsel

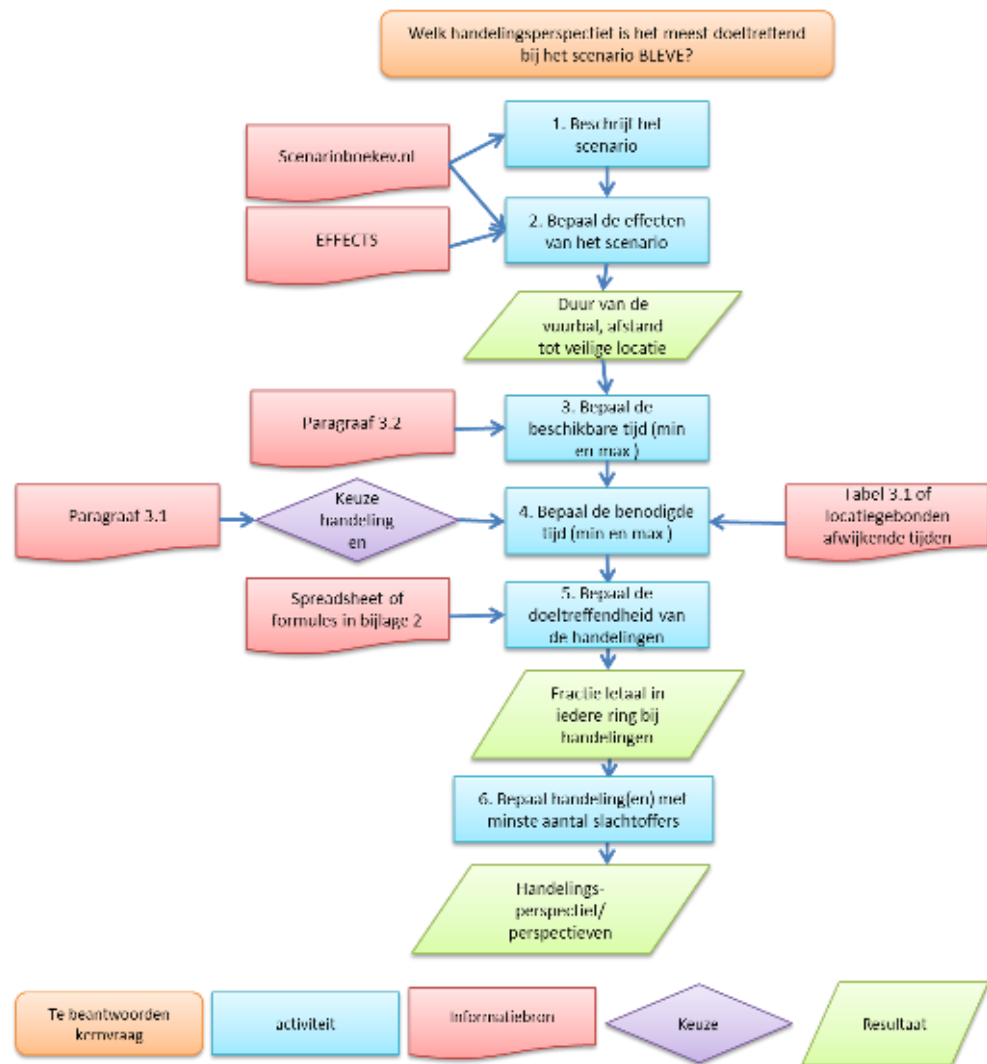
Voor de personen die zich in de eerste ring en buiten bevinden geeft niets doen 100% letaal letsel en vluchten geeft 12% letsel. Naar binnen gaan is hier niet doorgerekend, maar zal niet veel verschillen t.o.v. vluchten: het letsel binnen is 10% en een deel van de benodigde tijd is nodig om het incident te ontdekken, te besluiten en naar binnen te verplaatsen.



Figuur 4.3 Resultaten

4.4 Methodiek BLEVE

De methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor een BLEVE scenario is samengevat in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Methodiek voor het bepalen van handelingsperspectieven voor een BLEVE

4.5 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Gegeven het voorbeeldscenario warme BLEVE van een LPG tankwagen, zijn de volgende conclusies te trekken:

- Handelingsperspectief voor mensen die zich buiten bevinden bij aanvang van het incident is **vluchten**, waarbij de vluchtrichting niet uitmaakt;
- Voor mensen die zich aanvankelijk binnen bevinden is ontruimen zinvoller dan schuilen
- Het wijd open zetten van ramen en deuren is onverstandig;

Bovenstaande resultaten van de doeltreffendheid van handelingen bij het BLEVE scenario geven input aan het advies van de AGS, GAGS en/of MPL. Het basisadvies 'schuilen/ontruimen' [VRR 2015, Baars 2015] kan bij dit scenario nuttig zijn doordat:

- burgers attent worden gemaakt op het incident;

- ‘schuilen’ veiliger is dan buiten blijven;
- er relatief veel tijd is, vergeleken met bijvoorbeeld het wolkbrandscenario, om te reageren en indien nodig alsnog te ontruimen;
- het verschil tussen ‘schuilen’ en ‘ontruimen en vluchten’ niet groot is.

Aanbevelingen

De huidige slachtoffermethodiek van het scenarioboekv.nl lijkt te optimistisch voor de bescherming van slachtoffers binnen o.a. in vergelijking met [Paarse Boek 2005] en [Trijssenaar 2003]. In de eerste ring treedt een (zeer) hoge warmtestraling op, waardoor de kans op secundaire brand groot is. Personen die zich achter het glas bevinden zullen bovendien direct letsel oplopen door ruitbreuk en daarop volgende directe blootstelling aan warmtestraling.

Verder kan het effect van een snelle ontdekking of alarmering worden getoetst. Voor personen die zich in een woning of kantoor bevinden is momenteel een relatief lange ontdekkingstijd aangenomen (tussen 0 en 15 minuten met een gemiddelde van 7,5 minuut), die in overeenstemming is met brandbeveiligingsconcepten. Een dreigend BLEVE scenario zal niet snel onopgemerkt blijven door de grote brand, die nodig is voorafgaand aan de BLEVE vuurbal.

5 Slachtoffermethodiek voor plasbrand

De slachtoffermethodiek voor plasbrand is opgesteld aan de hand van een concreet voorbeeldscenario uit het scenarioboek [Scenarioboek 2016]. Het gekozen voorbeeldscenario voor plasbrand is een plasbrand van benzine bij een tankstation. De algemene beschrijving van het scenario is te vinden in [Scenarioboek 2016].

5.1 Doel van de methodiek

Doel is het opstellen van een slachtoffermethodiek bij plasbranden opstellen voor:

- Letsel bij hittestraling voor personen die zich buiten bevinden;
- Letsel bij hittestraling voor personen die binnen schuilen.

5.2 Scenariobeschrijving

Als representatief scenario wordt een plasbrand beschouwd: het “Bedrijven - Tankwagen Benzine – Plasbrand” scenario uit het scenarioboek [Scenarioboek 2016], d.d. 15 september 2016. De plasbrand is ontstaan na de uitstroom van 23 ton vloeistof en het plasoppervlak bedraagt 1200 m². Alhoewel pentaan de voorbeeld stof is voor LF2 in HART [HART 2015] en Bevi [Bevi 2013], is de verbrandingssnelheid van deze stof niet representatief voor benzine te noemen. Om die reden is de berekening gebaseerd op de meer representatieve wintergrade benzine met een verbrandingssnelheid van 0.067 kg/s/m². Deze waarde is afkomstig van de Rew/Hulbert model [Rew e.a.1997]. Ook TNO's EFFECTS (versie 10.0.5) [EFFECTS 2015] software maakt gebruik van dit two-zone model van Rew & Hulbert. In dit model zijn ook de waardes voor de Surface Emissive Power (SEP) gegeven voor het heldere deel (130 kW/m²) en het beroete deel van de vlam (22.2 kW/m²). Verder is uitgegaan van een windsnelheid van 5 m/s en een platemperatuur bij aanvang van de brand die gelijk is aan de omgevingstemperatuur van 9 °C. Als waarneemhoogte is 1.5 m genomen. Voor de blootstellingstijd is van 20 sec uitgegaan. (N.B. Bij wolkbrand en BLEVE scenario's is de duur van het brand-fenomeen zelf bepalend en speelt deze maximale blootstellingstijd geen rol). Met eventuele beschermende werking van kleding is geen rekening gehouden. In Tabel 5-1 zijn de invoerparameters en de resultaten zoals deze door EFFECTS zijn berekend weergegeven.

Tabel 5-1 Invoergegevens en resultaten EFFECTS berekeningen plasbrand

Uitgangspunten	
Modelleringssoftware	TNO Effects 10.0.5: Pool fire: Two zone model Rew & Hulbert.
Stofnaam	Winter Grade Gasoline Sample (Winterbenzine)
Totale massa vrijgekomen benzine	23.000 kg
Oppervlak plasbrand	1200 m ²
Omgevingstemperatuur	9 °C
Windrichting	West
Windsnelheid	5 m/s
Blootstellingduur personen	20 s
Observatie hoogte	1,5 m

Resultaten	
Duur van de plasbrand	4 minuten
Max. diameter van de plasbrand	40 m
Lengte van de vlammen	50 m
Temperatuur van de vlammen	1100 °C
Hittenstralingsintensiteit	130 kW/m ² helderdeel van de vlam 22.2 kW/m ² roetende deel van de vlam

5.3 Slachtoffermethodiek voor blootstelling aan hittestraling

Aan bovenstaande berekeningen liggen onderstaande relaties ten grondslag. De stralingsdosis wordt als volgt berekend:

$$D = q^{4/3} * t \quad (4.1)$$

Waarbij:

q hittestraling in W/m²

t blootstellingstijd in seconden [s]

D dosis in s*(W/m²)^{4/3}

Het percentage letaal letsel wordt vervolgens uitgerekend met:

$$Pr = -36,38 + 2,56 * \ln(t * q^{4/3}) \quad [\text{Groene Boek 2003, deel1A, formule 4.5}]$$

Eerste graadverbranding:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 * \ln(t * q^{4/3}) \quad [\text{Groene Boek 2003, deel1A, formule 4.4}]$$

Tweede graadverbranding:

$$Pr = -43,14 + 3,0186 \ln(t * q^{4/3}) \quad [\text{Groene Boek 2003, deel1A, formule 4.7}]$$

En om van de probit het percentage letsel te bepalen gebruik je

$$P = 100\% * 0,5 * \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad [\text{Paarse boek 2005, formule 5.1}]$$

Bij de berekening van het aantal gewonden en doden als gevolg van hittestraling wordt standaard uitgegaan van een blootstellingstijd van (maximaal) 20 seconden [Paarse Boek 2005, p. 5.7; Bevi 2013, p.18, 28; HART 2015. bijlage p. 89)]-

In Tabel 5-2 zijn de resultaten voor slachtoffers uitgaande van deze standaardsituatie samengevat.

Tabel 5-2 Slachtoffers, hittestraling en afstanden voor de 3 ringen.

	Hitte- straling	Effect- afstand	Slachtoffers buiten (%)			
	(kW/m ²)	(m)	Letaal	2 ^e gr brand	1 ^e gr brand	Niet gewond
1^e ring	≥ 35	≤ 30	100	0	0	0
Grens 1^e ring 99% letaal	35	30	99	1	0	0
2^e ring	10 - 35	30 - 50	37	12	50	0
Grens 2^e ring 1% letaal	10	50	1	1	88	11
3^e ring	4 - 10	50- 75 m	0	0	34	66
Grens 3^e ring 1% 1^e gr. brandwonden	4	75	0	0	1	99

De aannames die bij een standaard/ maximum blootstellingstijd van 20 seconden horen, zijn:

- De persoon zal vluchten en indien mogelijk dekking zoeken, zodanig dat de effectieve blootstellingsduur 20 seconden bedraagt;
- Gedurende deze 20 seconden wordt de persoon blootgesteld aan de hittestraling die heerst op de plek waar de persoon zich bevindt op het moment van de start van de plasbrand;
- De persoon bevindt zich buiten en is daardoor aanvankelijk relatief onbeschermd tegen de hittestraling;
- Een beschermingsfactor voor kleding kan worden meegenomen, maar dit is niet gedaan voor de resultaten uit Tabel 5-2.
- De maximum blootstellingstijd kan worden verminderd doordat het scenario stopt (brand dooft). Bij hittestraling die korter duurt dan 20 seconden gelden in principe dezelfde formules, waarbij de (korte) duur van het scenario kan worden gebruikt. Indien ook de warmtestraling tijdsafhankelijk is (dynamische BLEVE, tijdsafhankelijke fakkel) kan de dosis berekend worden als $\int q(t)^{4/3} dt$.

5.3.1 Beschermend effect van kleding

In het Groene Boek wordt er vanuit gegaan dat kleding bescherming biedt tegen warmtestraling tenzij deze ontsteekt door de hitte. Ofwel alleen direct aan straling blootgestelde (dus onbeschermd) lichaamsdelen zullen 1^e, 2^e of 3^e graad brandwonden oplopen.

Conform het Groene Boek wordt aangenomen dat als kleding in brand raakt dit tot letaal letsel zal leiden. Volgens formule 5.1 in het Groene Boek (zie ook [Reinders e.a. 2013]) zal kleding spontaan ontbranden indien een bepaalde warmtestralingsdosis (D_v) wordt bereikt:

$$D_v = t_c * Q^n \quad (4.2)$$

Hierin is t_c de blootstellingsduur en Q de stralingsintensiteit (kW/m^2). De exponent n bleek bij 4 geteste kledingmonsters ongeveer gelijk te zijn aan 2. D_v bleek toe te nemen met de stofdikte, waarbij de waarde ruwweg tussen $2.5 \cdot 10^4$ en $4.5 \cdot 10^4$ (kW/m^2)²s lag. Op basis hiervan zal voor de berekeningen van de warmtestralingsdosis waarbij kleding vlam vat het volgende worden aangehouden:

- $n = 2$;
- zomerkleding (relatief dun): $D_{vz} = 2.5 \cdot 10^4$ (kW/m^2)²s;
- winterkleding (relatief dik): $D_{vw} = 4.5 \cdot 10^4$ (kW/m^2)²s.

Verder zal 's zomers een groter deel van het lichaam aan directe straling worden blootgesteld dan 's winters. Op basis van Tabel 5-2 in het Groene Boek alsmede [Reinders e.a. 2013] kunnen de volgende percentages onbeschermd lichaamsdelen worden berekend:

- zomer: 35% – 60%,
- winter: 10% - 15%.

5.3.2 Triagering

Triageren is het beoordelen van slachtoffers bij grote(re) ongevallen en rampen en onderbrengen in categorieën (Triageklasse T1 – T3) verdeeld naar de ernst van de verwondingen of ziektebeeld. De triage-indeling is hierbij als volgt:

T1: Levensbedreigend gewond, onmiddellijke medische hulp nodig

T2: Binnen 6 uur te hospitaliseren.

T3: Minder ernstig gewonden van wie behandeling zonder gevaar zes uur kan worden uitgesteld.

In [Reinders e.a. 2013] is een methode beschreven waarmee uit brandwondenletsel de triageklasse kan worden afgeleid. Dit is weergegeven in Tabel 5-3. Hierbij is er vanuit gegaan dat alleen het niet met kleding bedekte deel van het lichaam aan straling wordt blootgesteld. Dus de stralingsdosis is recht evenredig met het percentage onbeschermd oppervlak.

Tabel 5-3 Indeling triageklassen voor graad van verbranding, onderverdeeld naar zomer en winter.

periode	Zomer	Winter
% onbeschermd lichaamsoppervlak	35-60%	10-15%
Onbeschermd delen	Hoofd, hals, handen onderarmen en - benen + mogelijk bovenarmen en - benen	Hoofd, handen + mogelijk hals
Aard van verbranding	Triageklasse	
Vlam vattende kleding	†	†
3 ^e graad brandwonden	T1	T2
2 ^e graad brandwonden	T1	T2
1 ^e graad brandwonden	T3	T3

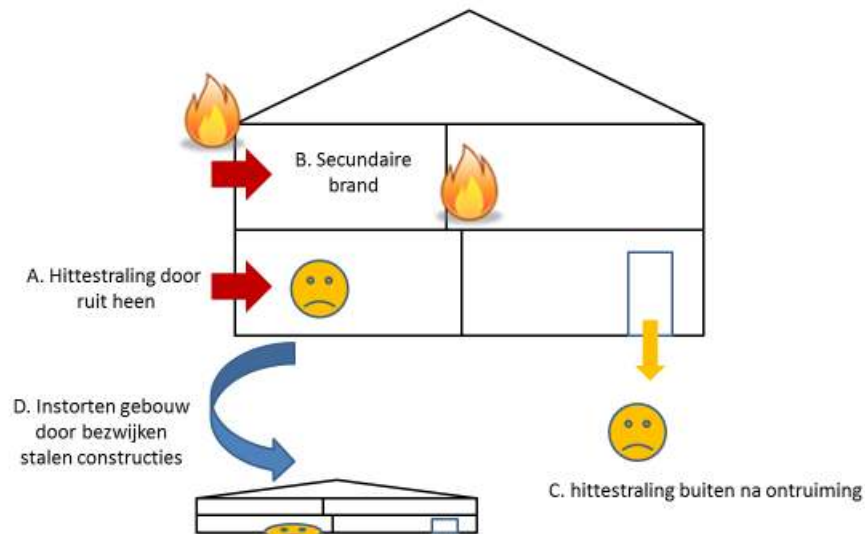
Bij 2^e en 3^e graad brandwonden over een klein oppervlak (10-15%, 's winters) is acute medische zorg niet noodzakelijk maar wel binnen een relatief korte periode. Dit zal tot triageklasse T2 leiden. Tijdens de zomer is door het grotere verbrande oppervlak de triage klasse voor 2^e en 3^e graad brandwonden altijd T1; T2 zal niet voorkomen. Bij verbranding t.g.v. vlam vattende kleding zal altijd een zodanig groot gedeelte van het lichaam ernstig verbranden dat de persoon zal overlijden. Bij minder ernstige verbrandingen (1^e graad) zal ook medische aandacht wenselijk worden geacht, maar deze is zeker niet acuut. T3 is hier acceptabel².

5.4 Slachtoffermethodiek voor binnen schuilen

Personen binnenshuis kunnen in geval van een plasbrand scenario mogelijk getroffen worden door (zie Figuur 5.1):

- A. Invallende hittestraling door de ruit heen;
- B. Secundaire brand doordat woning of interieur ontbrandt;
- C. Hittestraling buiten na een ontruiming, die noodzakelijk is vanwege een secundaire brand;
- D. Instorten van het gebouw door bezwijken van o.a. stalen constructies.

² Opgemerkt moet worden dat bij de indeling in triageklassen ook vaak rekening wordt gehouden met aantal gewonden, beschikbaarheid van hulpdiensten en hulpmiddelen en de nabijheid van (gespecialiseerde) hulpcentra, zoals een brandwondencentrum.



Figuur 5.1 Mogelijke letseloorzaken voor personen die binnen zijn tijdens een plasbrand

5.4.1 Kans op letsel door invallende hittestraling door de ruit heen (A)

De stappen voor het inschatten van de kans op letsel door invallende hittestraling door de ruit heen zijn:

- A.1. Bepaal het percentage personen dat wordt blootgesteld aan hittestraling die door de ruiten heen komt;
- A.2. Bepaal het hittestralingsniveau waaraan zij worden blootgesteld;
- A.3. Bepaal het letsel.

Hieronder zijn deze stappen elk afzonderlijk verder uitgewerkt. Onderstaande methode is een vereenvoudiging van de methode beschreven in [Trijssenaar e.a. 2013]. Hierin worden gebouw-specifieke kenmerken als vloeroppervlak en gevellengte gevraagd, terwijl onderstaande methode gebouwonafhankelijk is.

Stap A.1: Bepaal het percentage personen dat wordt blootgesteld aan hittestraling die door de ruiten heen komt

- a) Bepaal het percentage aanwezigheid in het gebouw, **N in [%]**; default is deze waarde gelijk aan 100%;
- b) Bepaal het percentage (gebouwen en/of ruimtes met) ruiten aan de risicozijde, **f_{ruit} [%]**: default aanname is dat alle kantoren en huizen ruiten aan de risicozijde hebben. Als alle gebouwen blinde muren hebben is f_{ruit} gelijk aan 0%;
- c) Bepaal het percentage van de aanwezige personen dat zich aan de risicozijde bevindt, **N_{risico} [%]**: Default aanname is dat alle personen zich (tot enkele meters) achter het raam bevinden, 50%/50% verdeeld over de risicozijde en de 'veiliger' zijde van het gebouw. Bovendien wordt aangenomen dat de hittestraling die vanaf de risicozijde het gebouw instraalt en de veiliger gebouwszijde bereikt verwaarloosbaar is.

- d) Bepaal vervolgens het totale percentage blootgestelde personen, N_b [%], default is de berekende waarde voor N_b gelijk aan 50%

$$N_b = N * f_{ruit} * N_{risico} \quad (5.1)$$

Stap A.2: Bepaal het hittestralingsniveau waaraan zij worden blootgesteld

- a) Bereken of bepaal de warmtestraling Q [kW/m^2] waaraan de gevel wordt blootgesteld;
- b) Bepaal vervolgens de transmissiviteit van de straling door de ruiten, f_d [%]. Voor de bepaling van het letsel door hittestraling door de ruit heen, speelt de doorlatendheid (ook wel transmissie) van de ruit voor hittestraling (infrarood) een grote rol. Hoe hoger de doorlatendheid des te hoger het letsel. Zoals te zien in Tabel 2-3 variëren de waarden in de literatuur voor de doorlatendheid aanzienlijk. De doorlatendheid van glas voor infrarood licht is golflengte afhankelijk en daarmee afhankelijk van de stralingstemperatuur. Met behulp van de wet van Planck [Mills, 1992] en de vlamtemperatuur is de verdeling van de hittestraling over de verschillende golflengtes bepaald. Voor de vlamtemperatuur is een waarde voor een typische koolwaterstofbrand genomen (1100 °C), zodat de berekende transmissie generiek kan worden toegepast voor alle brandscenario's met koolwaterstoffen en niet alleen voor deze plasbrand geldt. Vervolgens is voor het deel van de hittestraling bij golflengtes kleiner dan 2,8 μm een doorlatendheid aangenomen van 89% [Mills, 1992], (waarde voor glas van 3 mm dikte). Voor het deel van de hittestraling bij golflengtes groter dan 2,8 μm is een doorlatendheid van 10% aangenomen [Mills, 1992]. Bij golflengtes groter dan 2,8 μm is de doorlatendheid sterker afhankelijk van het type glas [zie Mills, 1992]. 10% is een relatief conservatieve aanname. Met bovenstaande aannames komt de totale doorlatendheid van de ruit op 50% voor enkel glas (50% = totale transmissie voor de infrarood straling van een bron op 1100 °C). N.B. als default voor het 'standaard' gebouw hanteren we enkel glas. Dit is een conservatieve aanname.

Stap A.3: bepaling van het letsel

- a) Bepaal de letselpercentages voor de blootgestelde personen (d.w.z. voor de personen achter de ruiten aan de risicozijde). Neem hierbij een blootstellingstijd van 10 seconden, deze bestaat uit 5 seconden reactietijd plus 5 seconden tijd om dekking te vinden. De default blootstellingstijd is hiermee dus kleiner dan de 20 seconden die buiten gebruikt wordt, binnen kan je immers veel sneller dekking vinden achter een muur. Met de doorlatendheid van 50% voor de ruit kan worden berekend dat bij een hittestraling buiten van bijvoorbeeld 35 kW/m^2 , de invallende hittestraling gelijk is aan 17,4 kW/m^2 , wat leidt tot 2% letaal letsel voor de personen die zich achter de ruit bevinden [EFFECTS 10.0.5] (N.B. aanname is dat de persoon zich direct achter de ruit bevindt). Het percentage letsel is afhankelijk van de afstand tot de bron en de daarbij horende hittestraling.
- b) Bepaal de letselpercentages voor de personen in het gebouw door de letselpercentages voor de blootgestelde personen uit stap 2c te vermenigvuldigen met het percentage blootgestelde personen uit stap 1d ($N_b = 50\%$). In dit voorbeeld leidt dit tot $(2\% * 50\%) = 1\%$.

De overige resultaten staan samengevat in paragraaf 5.4.6.

5.4.2 *Kans op letsel ten gevolge van secundaire brand (B)*

Voor het bepalen van de kans op letsel ten gevolge van secundaire brand, dienen we eerst de kans te bepalen op een secundaire brand, die voldoende kan ontwikkelen, ofwel kan ‘escaleren’. Vervolgens kan een eventuele ontruiming alsnog levens redden, dit is uitgewerkt in paragraaf 5.4.3. Zowel het model voor secundaire brand als het model voor ontruiming zijn gebaseerd op [Ashe 2003] voor plasbranden, maar op verschillende punten aangepast.

Een secundaire brand zou potentieel via de volgende mechanismen kunnen ontstaan:

- B.1. Ontsteking van het interieur door direct vlamcontact [Ashe 2003];
- B.2. Ontsteking van het exterieur van het gebouw en vervolgens brandoverslag van het exterieur naar het interieur [Ashe 2003];
- B.3. Indirecte ontsteking van het interieur als gevolg van hittestraling door de ruit.
- B.4. Ontsteking van het interieur na ruitbreuk

De verschillende mechanismen en hun kans van optreden zijn afhankelijk van de hittestralingsintensiteit en zijn met behulp van onderstaande gebeurtenissenbomen samen te vatten tot een totale kans op secundaire brand (zie Figuur 5.2 en Figuur 5.3). De structuur van beide gebeurtenissenbomen is gelijk, alleen de kansen van de gebeurtenissen verschillen. Figuur 5.2 toont de kansen voor een hittestraling die het exterieur kan ontbranden, Figuur 5.3 toont de kansen voor een hittestraling die zowel het exterieur van het gebouw als het interieur kan ontbranden. De hittestralingsgrenzen voor ontbranding van exterieur en/ of interieur zijn afhankelijk van het scenario. De methode voor het bepalen van de hittestralingsgrenzen worden verderop in deze paragraaf toegelicht. De secundaire brand mechanismen t.g.v. direct vlamcontact en hittestraling door de ruiten blijken niet relevant te zijn, ook dit wordt hieronder verder toegelicht.

	Direct vlamcontact	exterieur ontbrandt	brandoverslag van buiten naar binnen	Interieur ontbrandt	Brand groeit door tot 1 ruimte		kans (k_{s_tot}) op brand
							29%
	Yes					Brand	0%
kans k_{s1} =	0						
					Yes	Brand	29%
				kans k_{s5} =	0,6		
			Yes				
		kans k_{s3} =	0,5				
		Yes			No	Geen risico	
	kans k_{s2} =	1,0			0,4		
	No			Yes			
				kans k_{s4} =	0	Brand	0%
		1	No				
					0,5		
				No		Geen risico	
					1		
		No				Geen risico	

Figuur 5.2 Gebeurtenissenboom voor de kans op een secundaire brand voor een ‘gemiddeld’ gebouw bij blootstelling aan een hittestraling, die het exterieur van het gebouw kan ontbranden (>17 kW/m²)

	Direct vlamcontact	exterieur ontbrandt	brandoverslag van buiten naar binnen	Interieur ontbrandt	Brand groeit door tot 1 ruimte		kans (k_{s_tot}) op brand
							58%
	Yes					Brand	0%
	$k_{s1} =$	0					
					Yes	Brand	
				$k_{s5} =$	0,6		29%
			Yes				
		$k_{s3} =$	0,5				
		Yes			No	Geen risico	
	$k_{s2} =$	1			0,4		
					Yes	Brand	
				$k_{s5} =$	0,6		29%
				Yes			
	No		$k_{s4} =$	1			
		1	No			Geen risico	
				0,5		0,4	
				No			
					0		
		No				Geen risico	
			0				

Figuur 5.3 Gebeurtenissenboom voor de kans op een secundaire brand voor een 'gemiddeld' gebouw bij blootstelling aan een hittestraling, die zowel het exterieur van het gebouw als het interieur kan ontbranden ($>18 \text{ kW/m}^2$).

Stap B.1. Directe ontsteking van het interieur door direct vlamcontact

Ontsteking van het interieur door direct vlamcontact kan optreden als ramen of deuren open staan of doordat deze gebroken zijn ten gevolge van de hitte van de brand of evt. overdruk fenomenen die bij het scenario optreden (falen van drukvat) en de vlammen van het plasbrand scenario vervolgens contact maken met het interieur. Bij een plasbrand zal doorgaans geen vlamcontact optreden, dit komt vrijwel alleen voor bij gebouwen die in of direct naast de plas staan. Daarom wordt aan dit mechanisme bij plasbrand een kans van "nul" toegekend (in Figuur 5.2: kans $k_{s1} = 0$).

Stap B.2. Ontsteking van het exterieur van het gebouw en vervolgens brandoverslag van het exterieur naar het interieur

De hittestraling waarbij de buitenkant van een gebouw of huis in brand kan raken wordt vastgesteld zoals hieronder uiteengezet.

Ontsteking van een gebouw zal doorgaans optreden indien brandbare materialen aan de buitenkant (hier de gevel die naar de plasbrand is gekeerd) vlamvatten. Dit zullen houten of kunststof delen zijn zoals randen van het dak of de dakgoot, of (delen van) buitendeuren of raamkozijnen. Ontbranding van het exterieur van het gebouw zal pas optreden boven een bepaalde hittestraling en is gerelateerd aan de blootstellingsduur van de plasbrand. Boven deze hittestralingsgrens wordt de kans dat het exterieur ontbrandt door Ashe 100% geschat (kans k_{s2} in de gebeurtenissenboom), beneden de hittestralingsgrens schat hij de kans 0%.

Uitgaand van de aanwezigheid van vonken en vliegvlam, wordt voor het exterieur van gebouwen doorgaans ontbranding met 'aansteekvlam, zonder contact met het oppervlak' (ofwel piloted ignition) aangenomen [Groene Boek 2003], [Ashe 2003]. Het brandgedrag van kunststoffen vertoont een vrij grote variatie, maar

aangenomen mag worden dat ontbranding of ernstige desintegratie optreedt onder vergelijkbare omstandigheden als waarbij hout ontbrandt [Groene Boek 2003].

Voor een schatting van de hittestraling, waarbij gevels ontbranden binnen de blootstellingsduur van de plasbrand, zijn verschillende vergelijkingen beschikbaar:

- Vergelijking voor ontbranding van hout [Ashe 2003; Lawson1952].

$$Q_e = \frac{C_{is}}{t_i^n} + \quad (5.2)$$

- Q_e hittestraling (kW/m²);
- t_i tijdsduur van het incident, oftewel de brandduur (s); Deze is hier 286 sec (zie Tabel 5-1);
- Q_{cr} kritische hittestraling (kW/m²), voor (zacht) hout: $Q_{cr} = 14,7$ kW/m² voor ontbranding met aansteekvlam (piloted ignition) en $Q_{cr} = 25,6$ kW/m² voor spontane ontbranding (zonder aansteekvlam);
- C_{is} constante, voor hout $C_{is} = 118,4$ kJ/m²s^{1/3} voor ontbranding met aansteekvlam en $C_{is} = 167,6$ kJ/m²s^{1/5} voor spontane ontbranding;
- n index, $n = 2/3$ voor ontbranding met aansteekvlam en $n = 4/5$ voor spontane ontbranding.

Met deze formule is berekend dat een hittestraling (q_e) van 17.4 kW/m² nodig zou zijn voor ontbranding bij plasbrand duur van 286 sec.

- 'House Burning Distance' vergelijking [Gasunie, PIPESAFE]

$$t_i = \frac{17500}{(Q_e - Q_{cr})^2} \quad (5.3)$$

- Q_{cr} kritische hittestraling (kW/m²), $Q_{cr} = 12$ kW/m² voor ontbranding met aansteekvlam;
- 17500 constante met eenheid (kW²/m⁴)

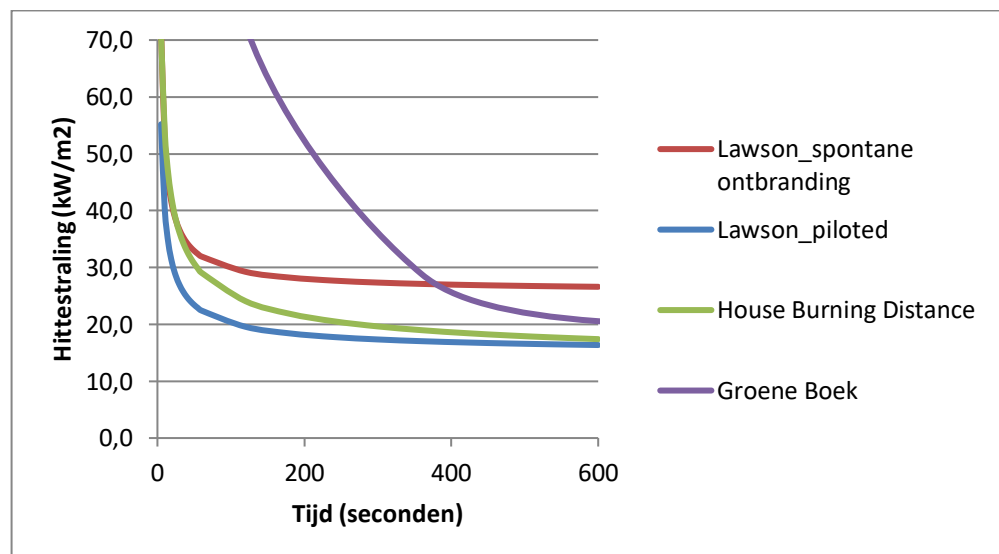
Hoewel de formule door Gasunie wordt toegepast voor scenario's met hogedruk aardgasleidingen is de verwachting dat de formule generiek toepasbaar is voor de ontbranding van woningen bij hittestralingsincidenten. Een nadere toelichting van de formule is opgevraagd bij Gasunie, maar ontbreekt nog op het moment van schrijven van onderhavig rapport.

- Extrapoleren van het gebruik van de Groene Boek methode voor ruiten en staal naar het gebruik voor hout ten behoeve van het inschatten van falen door hittestraling. Verschil van hout met ruiten en staal is de veel lagere geleidbaarheid van warmte. Een hittestraling van minimaal 34 kW/m² is nodig voor een houten lat met een dikte van circa 1,5 cm. De gebruikte input staat in Tabel 5-4 en correspondeert met de bekende kritische warmtestraling van 15 kW/m² bij langdurige aanstraling van een half uur of langer door een brand met een constante hittestraling, die dus niet in de tijd varieert [Groene Boek 2003]. Gezien de grote verschillen van deze ge-extrapoleerde methode uit het Groene Boek met de hierboven beschreven empirische modellen van Lawson 1952 en Gasunie, gaan we ervanuit dat deze ge-extrapoleerde methode niet gebruikt kan worden voor hout.

Tabel 5-4: input voor berekening hittestralingsgrens met ge-extrapolerde groene boek methode

Houteigenschap	Parameterwaarde	Parameternaam in spreadsheet
Verhouding oppervlak inkomende straling / oppervlak uitkomende straling [-]	1	S_i/s_u
Dichtheid hout [kg/m ³]	558	Rho
Soortelijke warmte [J/kg K]	2467	C
Absorptiecoëfficiënt [-]	1	Abs
Emissiecoëfficiënt [-]	1	Epsilon
Omgevingstemperatuur [K] _r	293	T0
coëfficiënt voor convectieve warmteoverdracht (W/m ² K)	7	Alpha
Dikte [m]	0,015	Dikte
Kritieke eindtemp [K]	683	Krit. eindtemp

We kiezen voor gebruik van vergelijking 5.2 van [Ashe 2003; Lawson1952]. Lawson is iets conservatiever en de herkomst is goed onderbouwd o.a. in [Ashe 2003]. Bij overschrijding van deze ontvangen hittestraling Q_e wordt door de auteurs 100% ontbranding verondersteld (Kans k_{s2} in de gebeurtenissenboom).



Figuur 5.4 Hittestralingsgrens voor ontbranding van hout volgens verschillende methoden

Brandoverslag naar het interieur

Na brandoverslag naar het interieur zal een secundaire brand kunnen ontstaan. Brandoverslag van de buitenkant naar binnen kan optreden via kieren en doorgangen, zoals bijvoorbeeld schoorstenen [Ashe 2003] en brievenbussen. Daarnaast kunnen ruiten springen bij brandende kozijnen. Bij gebrek aan informatie over de kans van brandoverslag van buiten naar binnen en op basis van de inschatting dat de kans hierop vrij klein is gezien de locatie van de brandende materialen (dakgoot, dakranden, latjes aan raamkozijnen en deuren) t.o.v. doorgangen naar binnen, schat Ashe een conservatieve kans hierop van 50% [Ashe 2003] (kans k_{s3} in de gebeurtenissenboom).

Stap B.3. Indirecte ontsteking van het interieur als gevolg van hittestraling door de ruit

Voor indirecte ontsteking, ofwel spontane ontsteking zonder aanwezigheid van een aansteekvlam, geldt voor hout een kritische stralingsintensiteit van 35 kW/m^2 en voor andere - meer brandbare - materialen als kurk en zachtboard een kritische hittestraling van 23 kW/m^2 (zie Tabel 2-1). Aangezien ramen een deel van de straling absorberen zal een grotere stralingsintensiteit buiten nodig zijn om binnen de vereiste 23 kW/m^2 te halen [Groene Boek 2003], [Ashe 2003]. Bij aanname van 50% doorlatendheid van enkel glas (zie paragraaf 5.4.1), is er minimaal 46 kW/m^2 nodig bij een duur van 30 minuten of langer. Bij correctie voor de kortere (ca 5 min) duur van dit plasbrand scenario zijn de hittestralingsgrenzen voor dit mechanisme m.b.v. vergelijking 5.2 zelfs te corrigeren naar bijna 50 kW/m^2 . Op basis van het Groene Boek kan worden berekend dat het glas zelf niet lang intact zal blijven bij dergelijke intensiteiten. Derhalve zal dit mechanisme een verwaarloosbare rol spelen bij het ontstaan van brand.

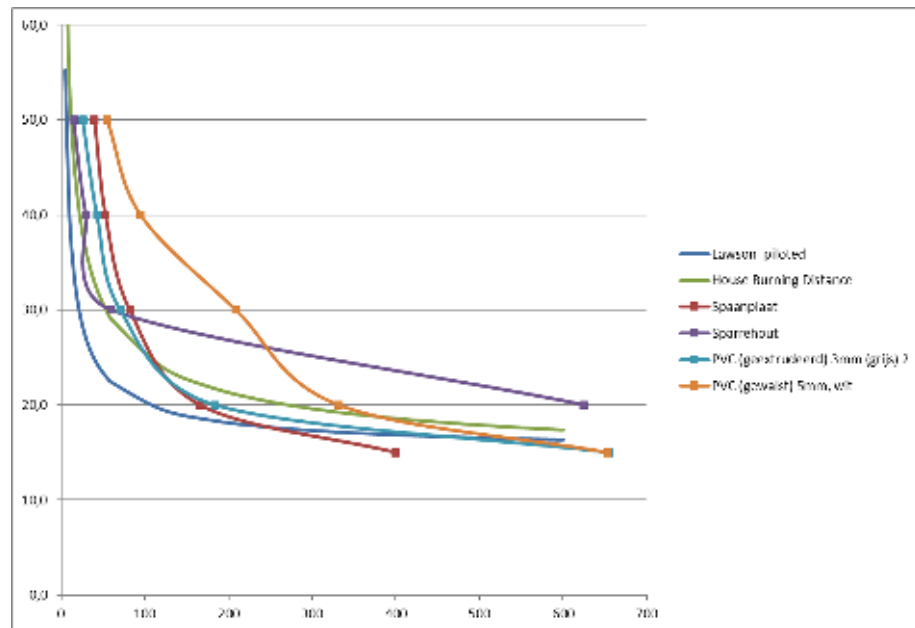
Concluderend: Het glas zelf zal tot op grotere afstand van de brand breken dan tot waar spontane ontbranding van hout en/of kunststof (gevel)delen optreedt. Daarom kan indirecte ontsteking van het interieur als gevolg van hittestraling door de ruit als ontstekingsmechanisme worden verwaarloosd.

Stap B.4. Ontsteking interieur na ruitbreuk

Ruitbreuk kan optreden als gevolg van hittestraling of overdruk. Overdruk speelt een rol bij scenario's zoals BLEVE en gaswolkexplosie, niet bij het scenario plasbrand. Na ruitbreuk wordt het interieur direct blootgesteld aan de hittestraling van de plasbrand.

Vanaf het moment dat de ruiten van een gebouw breken hebben we te maken met 'ontsteking in aanwezigheid van een aansteekvlam zonder direct vlamcontact', bijvoorbeeld door vonken of vlieg vuur [Groene Boek 2003]. Het interieur wordt dus niet door direct vlamcontact ontstoken. Voor het berekenen van de hittestralingsgrens waarbij de ruiten breken maken we gebruik van de methodiek zoals beschreven in paragraaf 2.4 en de invoergegevens uit Tabel 2-7. Enkel glas zal bij ca. 7 kW/m^2 breken binnen de tijdsduur van de plasbrand. Voor dubbel glas zal deze waarde ca. 9 kW/m^2 bedragen. Bij deze lage waarden voor de hittestraling, de relatief grote afstand tot de brand en de geringe resterende duur van de plasbrand zal het interieur nog weinig kans hebben om vlam te vatten.

Het interieur kan naast hout ook andere materialen bevatten, zoals zachtboard of hardboard met lagere kritische warmtestraling dan hout (zie Tabel 2-1). In Figuur 5.5 staan voor verschillende materialen tijdsafhankelijke relaties voor ontbranding [Ashe 2003]. Tot een blootstellingsduur van 250 seconden is de vergelijking van Lawson voor hout (vergelijking 5.2) het meest conservatief. Bij langere blootstelling ontbrandt spaanplaat bij een lagere hittestraling. Bij 18 kW/m^2 breekt de ruit na 73 seconden en ontbrandt het interieur (volgens vergelijking 5.2) 210 seconden na het breken van de ruiten, samen precies binnen de blootstellingsduur van de plasbrand (286s). De kans op ontsteking wordt 100% verondersteld vanaf een hittestralingsgrens van 18 kW/m^2 (Kans $k_{s4} = 1$ in de gebeurtenissenboom voor $Q > 18 \text{ kW/m}^2$ en $k_{s4} = 0$ voor $Q < 18 \text{ kW/m}^2$).



Figuur 5.5 Hittestralingsgrens voor ontbranding als functie van blootstellingstijd voor verschillende materialen

Escalatie van de brand

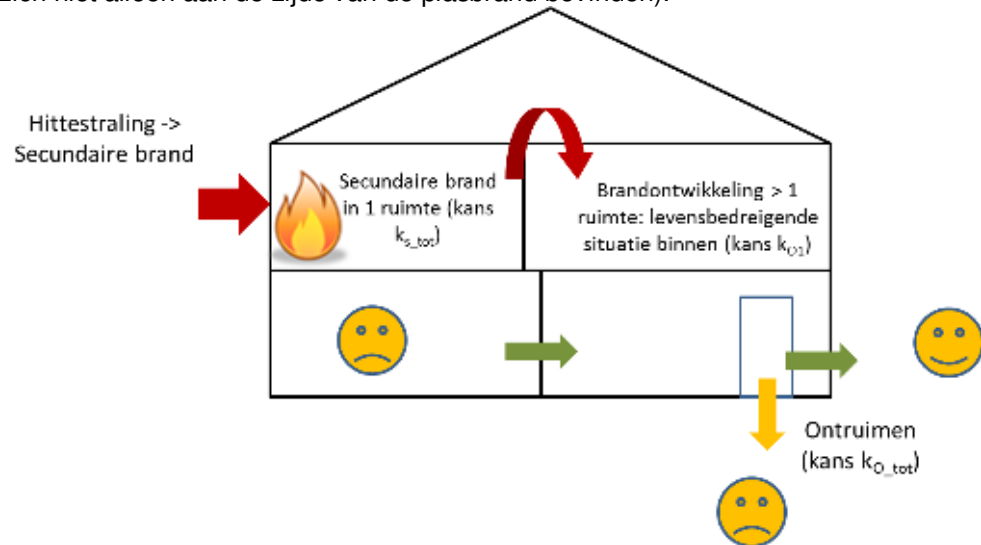
Via bovenstaande ontstekingsmechanismen kunnen de eerste vlammen in het interieur worden gegenereerd. Deze eerste vlammen kunnen ofwel weer vanzelf doven of ze kunnen ontwikkelen tot een grotere brand in een ruimte binnen een gebouw. Op basis van brandstatistieken van de Engelse 'Home Office' [Home Office, 1995] over het percentage branden in woningen en andere gebouwen die beperkt blijven tot een enkel ontstoken item, heeft Ashe de kans op brandontwikkeling geschat op 57% voor woningen en 66% voor andere gebouwen. Ten behoeve van de scenariokaart gaan we uit van een 'standaard' gebouw, dat is opgebouwd uit 94% woningen en 6% kantoren (aannahme op basis van [BAG 2014]). Hiermee komen we op een kans op brandontwikkeling van -afgerond- 60% (kans $k_{s5} = 0,6$ in de gebeurtenissenboom, zie Figuur 5.2 en Figuur 5.3).

Deelconclusie: kans op secundaire brand

De methodiek in deze paragraaf geeft de totale kans op secundaire brand in geval van een plasbrand, afhankelijk van de lokaal heersende hittestraling en de duur van de plasbrand. N.B. deze totale kans k_{s_tot} betreft een brand die (nog) beperkt is tot 1 ruimte). De totale kans op een secundaire brand (kans k_{s_tot}) voor het beschouwde plasbrandscenario is 0% bij een hittestraling $< 17 \text{ kW/m}^2$, 29% bij een hittestraling tussen 17 en 18 kW/m^2 , en 58% bij een hittestraling $> 18 \text{ kW/m}^2$. In dit geval zijn de verschillen tussen de hittestralingsgrenzen vrij klein. Indien dit vaak optreedt kan de methodiek in de toekomst vereenvoudigd worden. Door de kortere duur van de plasbrand zijn de waarden iets hoger dan de waarde van het bouwbesluit voor brandoverslag van 15 kW/m^2 . De waarde van het bouwbesluit komt overeen met de waarde aan van de kritische hittestraling voor blootstelling aan brand gedurende een half uur of langer, aangezien gebouwbranden doorgaans langer duren.

5.4.3 Kans op succesvolle ontruiming in geval van secundaire brand (B)

Het ontstaan van secundaire brand hoeft niet onmiddellijk te betekenen dat alle personen in het gebouw overlijden (het is hierbij wel belangrijk dat de vluchtwegen zich niet alleen aan de zijde van de plasbrand bevinden).



Figuur 5.6 van kans op secundaire brand in 1 ruimte naar kans op succesvolle ontruiming

Bij hittestralingsscenario's zoals een plasbrand een secundaire brand aan 1 kant van het gebouw te verwachten. Ashe heeft een model opgesteld om de kans van overlijden te bepalen, gegeven dat er een secundaire brand optreedt. Hij gebruikt hiervoor brand- en rookverspreidingsberekeningen met het zone model FAST van NIST [Peacock et al, 1997] en eenvoudige ontruimingsberekeningen.

De beoordeling van het succes van een ontruiming wordt gedaan op basis van een schatting van:

- De beschikbare tijd, rekening houdend met de vuurlast, brandontwikkelingssnelheid en de geometrie van het gebouw;
- De benodigde tijd, rekening houdend met eigenschappen van gebouw en populatie.

De aannames voor woningen en kantoren zijn weergegeven in Tabel 5-5. Deze aannames zijn door Ashe genomen voor de brandontwikkelingssnelheid en de ontruimingsberekening en zijn alleen aan te passen door een nieuwe berekeningen te maken met FAST en een daaraan gekoppelde ontruimingsberekening.

De benodigde tijd is opgebouwd uit een detectietijd (t_{det}), een pre-movement tijd (t_{pre}) en een looptijd (t_{travel}):

$$t_{benodigd} = t_{det} + t_{pre} + t_{travel}$$

Ashe neemt aan dat de detectie van het incident geen extra tijd meer kost ($t_{det} = 0$), hierbij heeft hij echter een wolkbrand in gedachten, voor andersoortige incidenten zoals plasbrand, doet hij geen specifieke uitspraak. De pre-movement tijd is gelijk verondersteld aan de pre-movementtijd bij een 'een vooropgenomen spraak systeem en/of informatieve visuele berichten m.b.v. een display' [BSI, 1997], (zie

Tabel 5-5 voor de gehanteerde pre-movement tijden). Daarnaast neemt Ashe aan dat personen die zich in de ruimte bevinden waar de brand ontstaat altijd succesvol zijn in hun ontruiming. Hoewel deze aannames van Ashe voor de benodigde tijd weinig conservatief lijken (bijvoorbeeld in relatie tot de eerdere aannames voor de benodigde tijd voor de BLEVE in paragraaf 4.2) komen totaalkansen om te overlijden bij een secundaire brand (zie verderop Figuur 5.7) alsnog hoger uit dan de kans op overlijden per brand uit de brandstatistieken.

Tabel 5-5 aannames voor ontruiming en brandontwikkeling van woningen en kantoren [Ashe 2003]

Gebouw layout	Woning = 2 verdiepingen met totaal 6 kamers Kantoor = 3 verdiepingen, 'open plan' [BRE, 1996]
Maximaal af te leggen ontruimingsafstand (gebaseerd op gebouwen die gebouwd worden volgens huidige UK regelgeving)	Woning = 35 meter [DOE, 1992] Kantoor = 45 meter [DOE, 1992]
Pre-movement tijd (gebaseerd op het niveau van alertheid en bekendheid met het gebouw)	Woning (dag) = 180 seconden [BSI, 1997] Woning (nacht) = 240 seconden [BSI, 1997] Kantoor = 180 seconden [BSI, 1997]
Vluchtsnelheid	Ongehinderd = 1.0 m/sec. [BSI, 1998] Door rook gehinderd = 0.3 m/sec. [BSI, 1998]
Snelheid van brandontwikkeling	Woning = gemiddelde brandontwikkelingsnelheid [BSI, 1997] Kantoor = gemiddelde brandontwikkelingsnelheid [BSI, 1997]
Koolmonoxide probit	$Pr = - 37.98 + 3.7 \ln (C^*t)$ [TNO, 1989]
Hittestralingsprobit	$Pr = - 14.90 + 2.56 \ln (I^{4/3}t)$ [TNO, 1989]

Gebeurtenissenboom voor ontruiming

De kans op een succesvolle ontruiming is weergegeven in een gebeurtenissenboom (zie Figuur 5.7) en hangt af van [Ashe, 2003]:

- de kans dat de brandontwikkeling zodanig is, dat deze verder komt dan ruimte van de brandontsteking, deze kans wordt voor secundaire brand aan 1 zijde van het gebouw op 19% geschat voor een woning en op 21% voor een kantoor [BSI 1997]; Ten behoeve van de scenariokaart is een 'gemiddeld gebouw' aangenomen dat uitgaat van 94% woningen en 6% kantoren. Voor een gemiddeld gebouw komt de kans op brandontwikkeling op 19% (kans k_{01} in Figuur 5.7);
- het percentage van de aanwezigen dat probeert te vluchten, deze kans is door Ashe op basis van slechts 1 woningincident [Davis, 1998] geschat op 90% en op basis van 1 kantoorincident [Lees, 1995] op 98%. Voor een 'standaard' gebouw komt de kans op 90% (kans k_{02} in Figuur 5.7);
- en het met FAST en ontruimingsmodel berekende kans op een succesvolle ontruiming: 99% voor een woning overdag, 75% voor een woning 's nachts en 99% voor een kantoor. Voor een gemiddeld gebouw komt de kans op 91% (kans k_{03} in Figuur 5.7).

Uit Figuur 5.7 blijkt dat de totale kans om te overlijden in een gemiddeld gebouw, nadat er secundaire brand is uitgebroken, gelijk is aan 3%. Dit percentage is dus

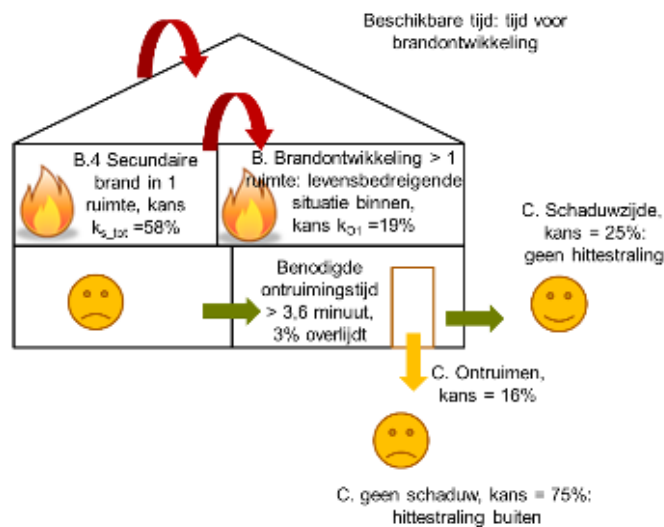
onafhankelijk van de warmtestralingsintensiteit op de gevel: indien er een secundaire brand uitbreekt dan is de kans op overlijden 3% (in Figuur 5.7 kans $k_{O_tot} = 3\%$). De kans op ontsnappen uit het gebouw is daarmee dus 97%. Volgens de UK brandstatistieken leidt minder dan 1% van alle branden tot een letaal slachtoffer. Het model van Ashe is in totaal dus waarschijnlijk conservatief.

	brand groeit verder dan ruimte van brandontsteking	Fractie personen dat probeert het gebouw te verlaten	Ontruiming succesvol	Overlevenden	dodelijke slachtoffers (kans k_{O_tot})
				97%	3%
			Yes		
		$kans\ k_{o3} =$	0,91	16%	
		Yes			
	$kans\ k_{o2} =$	0,90	No		
	Yes		0,09		1,5%
$kans\ k_{o1} =$	0,19	No			1,9%
		0,10			
	No				
	0,81			81%	

Figuur 5.7 Gebeurtenissenboom voor de kans op overlijden in geval van een secundaire brand van een gemiddeld gebouw

5.4.4 *Kans op letsel buiten na een succesvolle ontruiming (C)*

Een succesvolle ontruiming betekent helaas niet per definitie dat men er letselvrij vanaf komt. Bij een externe hittebron, c.q. plasbrand, die langer duurt dan de ontruimingstijd kan de vluchtende persoon buiten immers worden blootgesteld aan hittestraaling. De stappen in de ontruiming worden getoond in Figuur 5.8 en hieronder verder toegelicht.



Figuur 5.8 Letsel na ontruiming

De kans op letsel buiten na ontruiming wordt met de volgende stappen bepaald:

- D.1. Bepaal minimale ontruimingstijd. De ontruimingstijd is geschat aan de hand van de data in Tabel 5-5. De geschatte tijden variëren tussen minimaal 3,6 en maximaal 5,9 minuten. In het voorbeeld van deze plasbrand is de duur van het scenario met 4,8 minuten ruimschoots langer dan de minimale ontruimingstijd.
- D.2. Als de duur van het scenario groter is dan de minimale ontruimingstijd, dan zullen de personen die het gebouw hebben verlaten mogelijk worden blootgesteld aan de hittestraling die buiten heerst. Het percentage personen dat 'succesvol' is ontruimd en naar buiten gaat (kans $k_{O1} = 16\%$) is af te lezen uit de gebeurtenissenboom in Figuur 5.7.
- D.3. Indien de persoon het gebouw aan de schaduwzijde kan verlaten, d.w.z. het gebouw staat tussen de persoon en de plasbrand in op het moment van buitenkomen, is men overigens wel veilig. De kans dat de persoon het gebouw aan de schaduwzijde kan verlaten is afhankelijk van de situatie. Bij eengezinswoningen (rijwoning) is er doorgaans een voor- en een achteruitgang. Bij galerijwoningen is er vaak slechts 1 uitgang. Een conservatieve aanname is dat de kans dat men het gebouw veilig aan de schaduwzijde kan verlaten 25% is. Voor specifieke locaties kan deze parameter desgewenst worden aangepast. Bij transportassen is de oriëntatie van straten en woningen vaak parallel aan de transportas. Dan is het logisch dat vrijwel alle eengezinswoningen een uitgang hebben aan de veilige schaduwzijde.
- D.4. De blootstellingsduur is maximaal gelijk aan de duur van het scenario verminderd met de tijd die nodig is voor het initiëren van brand en de minimale ontruimingstijd. Voor de hittestralingsgrenzen van 17,4 en 18 kW/m² is de duur van het scenario precies voldoende lang om brand te initiëren. Met de vergelijking 5.2 van Lawson [Lawson 1952] is berekend dat het initiëren en volledig ontwikkelen van de brand tot een levensbedreigende situatie binnen ca 266 seconden duurt bij 23 kW/m². Vanaf deze hittestraling resteert er buiten nog tenminste 20 seconden blootstellingstijd buiten (de plasbrand duurt immers 286 seconden). Hierdoor zullen bij 23 kW/m² 72% van de personen die succesvol ontruimd zijn alsnog overlijden, als zij het gebouw niet aan een schaduwzijde kunnen verlaten. De extra slachtoffers die buiten vallen worden berekend met:

$$(100\% - \text{transmissieslachtoffers}) * \text{kans } k_{s_tot} * \text{kans } k_{O1} * 72\% \text{ letaal} * 75\% \text{ _geenschaduw} = (100\% - 0\%) * 58\% * 16\% * 72\% * 75\% = 5\%$$

Bij 23 kW/m² is de uiteindelijke kans op letsel door 'binnen blijven totdat er secundaire brand opbreekt en vervolgens ontruimen' gelijk aan 7% (=slachtoffers transmissie + slachtoffers secundaire brand + slachtoffers buiten na ontruiming) = 0% + 1,9% + 5% = 7%.

5.4.5 *Instorten van het gebouw door bezwijken van stalen constructies (D)*

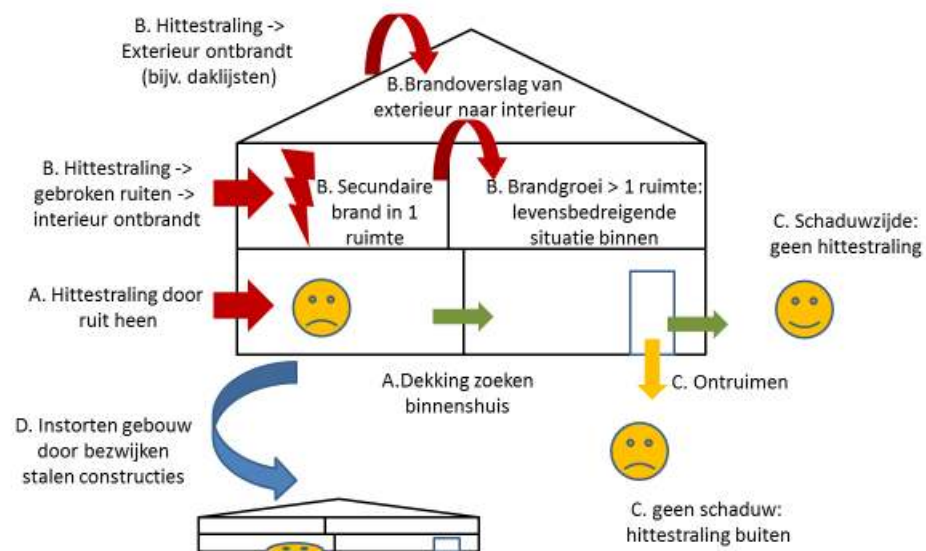
Dragende stalen constructie-onderdelen, welke niet bekleed zijn, kunnen bij blootstelling aan hoge hittestraling bezwijken en leiden tot instorten van het gebouw. Op het moment dat het gebouw instort kan doorgaans 100% letsel worden aangenomen.

Om te bepalen wanneer een stalen constructie bezwijkt, is de geometrie van belang voor het oppervlak (s_u) dat de warmte uitstraalt ten opzichte van het oppervlak (s_i) dat de invallende warmtestraling ontvangt. Veel voorkomende profielen zijn het I-profiel en een vierkant buisprofiel met s_i/s_u verhoudingen variërend van 0,17 tot 0,33. Het Groene Boek houdt een globaal gemiddelde s_i/s_u verhouding van 0,25 en een bezwijktemperatuur van 500 °C. Het instorten van het gebouw door bezwijken van stalen constructies kan pas bij langere blootstellingsduur (ca 30 minuten) optreden bij een kritische hittestraling van 100 kW/m² [Groene Boek 2003]. De blootstellingsduur van deze plasbrand is aanzienlijk korter, daarom is te verwachten dat het bezwijken van stalen constructies alleen vrij dichtbij de brand zal optreden.

Aanbeveling voor het project Impuls Omgevingsveiligheid van 2017 is om te corrigeren voor de kortere blootstellingsduur van de plasbrand m.b.v het model en de gegevens uit het Groene Boek (deel1B, pagina 13 en bijlage 1). Daarnaast wordt aanbevolen om een gevoeligheidsanalyse en toets van de invoereigenschappen van stalen constructies uit te voeren, die gebruikt zijn voor de berekeningen in het Groene Boek [Groene Boek 2003].

5.4.6 Samenvatting effectafstanden en gevolgen

Personen die zich binnen in een gebouw bevinden ten tijde van een plasbrand van benzine, kunnen blootgesteld worden aan verschillende gevaren (zie Figuur 5.9). Ten eerste worden ze via de ruit blootgesteld door transmissie door de ruit. Vervolgens kan er na verloop van tijd een secundaire brand ontstaan die zich in een deel van de gevallen kan ontwikkelen tot een levensbedreigende situatie. Deze bedreigende situatie kan men proberen te ontlopen door het gebouw te verlaten. Bij buitenkomst kan men alsnog blootgesteld worden aan de plasbrand.



Figuur 5.9 Mechanismen van letseloorzaken voor personen die binnen zijn tijdens een plasbrand

Het totale letsel voor personen die zich oorspronkelijk binnen bevinden is weergegeven in de laatste kolom van Tabel 5-6. Bij 35 kW/m² treedt 9% letaal letsel op. Dit is alsnog minder dan de helft van het letsel vergeleken met personen die zich initieel buiten bevinden.

Tabel 5-6 Slachtofferpercentages buiten en binnen

	Hitte- straling	Kans op letsel binnen door transmissie	Kans op secundaire brand	Kans op letsel bij secundaire brand	Kans op letsel bij buitenkomst	Totaal % slachtoffers binnen
	[kW/m ²]	†		†	†	†
Grens 1e ring 99% letaal buiten	35	0,8%	58%	3,3%	99%	9%
Grens buiten letaal letsel na ontruiming	23	0,0%	58%	3,3%	72%	7%
Grens interieur brandt na ruitbreuk	18	0%	58%	3,3%	0%	2%
Grens exterieur brandt	17	0%	29%	3,3%	0%	1%
Grens 2e ring 1% letaal buiten	10	0%	0%	0%	0%	0%
Grens dat ruit breekt	7	0%	0%	0%	0%	0%
Grens 3e ring 1% 1e graads buiten	4	0%	0%	0%	0%	0%

Hieronder worden de gebouw eigenschappen samengevat, die gebruikt zijn voor de bepaling van het % slachtoffers buiten. We noemen dit het 'standaard gebouw'. N.B. HET standaard gebouw bestaat uiteraard niet, maar is een middeling van eigenschappen van verschillende woningen en kantoren, waarbij gestreefd is om (licht) conservatieve waarden te kiezen.

Tabel 5-7 Eigenschappen van het 'standaard' gebouw

Eigenschap	Gekozen waarde/ type
Percentage woningen	94%
Percentage kantoren	6%
Ruittype	Enkel glas
Doorlatendheid van de ruit voor hittestraling (%)	50%
Ruiteigenschappen voor ruitbreukbepaling	Zie Tabel 2-7
Materiaaleigenschappen voor bepaling ontsteking interieur	Zie Figuur 5.5

Aanbevelingen

Aanbevelingen voor het project Impuls Omgevingsveiligheid van 2017 zijn:

- Stappenplan uitwerken voor uitvoeren van de berekeningen;
- waar mogelijk vereenvoudigen van het model voor secundaire brand;
- bepalen effect blootstellingsduur op bezwijken van stalen constructies;
- gevoeligheidsanalyse en toets invoereigenschappen van stalen constructies.

6 Methodiek voor bepalen van het handelingsperspectief voor plasbrand

De methodiek voor zelfredzaamheid en handelingsperspectieven is opgesteld aan de hand van het voorbeeldscenario uit het scenarioboek zoals in het vorige hoofdstuk omschreven. Informatie is ook te vinden op de website www.scenarioboek.nl.

6.1 Doel en aanpak van de methodiek

Methodiekontwikkeling voor zelfredzaamheid bij (plas)branden.

6.2 Handelingen bij plasbrand

De volgende handelingen worden onderscheiden:

- 1) Personen binnen:
 - a) Binnen blijven & dekking zoeken
 - b) Eerst (a), maar ontruimen bij secundaire brand;
- 2) Personen buiten:
 - a) Niets doen (immobiel)
 - b) Effectieve blootstellingsduur 20 s
 - c) Vluchten met de wind mee
 - d) Vluchten haaks op de wind (niet behandeld in deze studie, mogelijk in vervoltraject in 2017)
 - e) Dekking zoeken (in "schaduw" van omliggende gebouwen vluchten)

Voor het vluchten wordt onderscheid gemaakt naar de mate van mobiliteit van personen:

- Gezonde zelfredzame personen
- Minder zelfredzame personen

6.3 Handelingsperspectieven voor personen binnen

In paragraaf 5.3.1 is het slachtoffermodel beschreven waarmee de kans op overlijden bepaald kan worden afhankelijk of de personen ontruimen uit een brandend gebouw.

1a) Binnen blijven & dekking zoeken

Voor het bepalen van het percentage slachtoffers als personen 'niets doen', oftewel 'niet ontruimen' vullen we in de gebeurtenissenboom van figuur 5 de waarde 0 in voor 'fractie personen dat probeert het gebouw te verlaten'. We gaan er in deze voorbeeldberekening van uit dat personen die zich achter de ruit bevinden wel in het gebouw dekking zullen zoeken. Aanname is dat de personen wel binnen in het gebouw blijven, ook als er een secundaire brand in het gebouw ontstaat. De resultaten van de handeling 'binnen blijven & dekking zoeken' zijn samengevat in Tabel 6-1:

Tabel 6-1: Resultaten voor handeling 'binnen blijven & dekking zoeken'

	Hittestraling op gevel	% slachtoffers binnen
	[kW/m ²]	†
Grens 1e ring 99% letaal buiten	35	12%
Grens buiten letaal letsel na ontruiming	23	11%
Grens interieur brandt na ruitbreuk	18	11%
Grens exterieur brandt	17	6%
Grens 2e ring 1% letaal buiten	10	0%
Grens dat ruit breekt	7	0%
Grens 3e ring 1% 1e graads buiten	4	0%

Personen die volledig immobiel zijn zullen eerst blootgesteld worden aan de hittestraling die door de ruit wordt doorgelaten (=50% van de straling buiten bij een doorlatendheid van de ruit van 50%). Bij intensiteiten boven de 7 kW/m² barst de ruit, waarna de persoon wordt blootgesteld aan 100% van de hittestraling totdat de plasbrand stopt. Bij de bepaling van het letsel kunnen de relaties uit in paragrafen 5.3 en 5.4.1 worden gebruikt.

1b) Eerst binnen blijven & dekking zoeken, maar ontruimen bij secundaire brand; Vooralsnog nemen we voor deze voorbeeldberekening dezelfde aannames als voor het 'standaard gebouw' uit de vorige paragraaf: 90% van de personen start met een ontruiming nadat de brand de ruimte heeft verlaten. Indien mogelijk zoeken de personen buiten dekking in de schaduw van het gebouw. De resultaten van deze handeling zijn samengevat in onderstaande tabel:

Tabel 6-2 Resultaten voor handeling 'Eerst binnen blijven & dekking zoeken, maar ontruimen bij secundaire brand'

	Hittestraling op gevel	Totaal slachtoffers binnen
	[kW/m ²]	†
Grens 1e ring 99% letaal buiten	35	9%
Grens buiten letaal letsel na ontruiming	23	7%
Grens interieur brandt na ruitbreuk	18	2%
Grens exterieur brandt	17	1%
Grens 2e ring 1% letaal buiten	10	0%
Grens dat ruit breekt	7	0%
Grens 3e ring 1% 1e graads buiten	4	0%

Conclusie voor personen binnen is dat de handeling 'eerst binnen blijven & dekking zoeken, maar ontruimen bij secundaire brand' minder letsel geeft dan alleen 'binnen blijven & dekking zoeken'. Als niemand het gebouw verlaat (kans k_{O2} in Figuur 5.6=0) zullen (11% van de personen overlijden. Dit is de kans op een secundaire brand (k_{s_tot}) vermenigvuldigd met de kans op doorontwikkeling naar een levensbedreigende brand k_{O1} in Figuur 5.7= 19%, (Kans $k_{O_tot} = k_{O1}$ als kans $k_{O2} = 0$). Dit zijn de maximaal 19% personen die anders naar buiten zullen komen.

Aanbeveling voor het project Impuls Omgevingsveiligheid 2017:

- Onderzoeken hoeveel procent van de personen in een brandend gebouw ook daadwerkelijk zullen overgaan tot ontruimen.
- Letsel binnen berekenen voor immobiele personen.

6.4 Handelingsperspectieven voor personen buiten

In deze paragraaf wordt de invloed van vluchten of dekking zoeken op de ernst van de verwondingen in meer detail behandeld. Ook de invloed van kleding op de brandwonden zal worden meegenomen. Verder zal een inschatting worden gemaakt van de aantallen slachtoffers in de drie triageklassen T1, T2 en T3, zoals die door hulpverleners wordt toegepast om de urgentie van behandeling van slachtoffers aan te geven op een ongevalslocatie (zie ook §5.3.2).

6.4.1 *Buiten blijven niets doen*

Personen hebben een natuurlijke reactie om van hittestraling weg te vluchten [Groene Boek 2003]. De situatie waarbij een persoon buiten is en geheel niet reageert op blootstelling aan hitte, zal zich alleen voordoen als deze persoon niet in staat is om weg te gaan, doordat de persoon geheel niet mobiel is of geheel niet in staat is te reageren. Voor dergelijke personen geldt dat de blootstellingsduur gelijk is aan de duur van de plasbrand. Voor het onderhavige scenario bedraagt deze 286 seconden, hetgeen zou inhouden dat tot op ca. 95 m van de rand van de plas letaal letsel zou optreden t.g.v. 3^e grad brandwonden.

6.4.2 *Vluchten met de wind mee*

Een meer realistisch scenario is dat een persoon zal proberen weg te vluchten van de brand en, indien mogelijk, dekking te zoeken achter een muur of gebouw. De windrichting is hierbij van belang omdat deze de vlammen van een (plas)brand zal doen afbuigen. Het scenario zoals dat in het scenarioboek staat houdt rekening met een windsnelheid van 5 m/s waarbij de vlammen in de richting van de blootgestelde personen zullen afbuigen. Voor deze personen geldt dat vluchten (weg van het vuur) inhoudt vluchten met de wind mee. Dit is hier verder uitgewerkt. Voor de berekeningen zijn van belang:

- De locatie van de persoon bij aanvang van de brand (x_0). Deze verschilt per persoon, per ring: volgt uit scenarioboek
- De reactietijd (t_r), d.w.z. de tijd tussen de aanvang van de brand en het moment waarop de persoon begint te vluchten.
- De vluchtsnelheid (u).
- De af te leggen afstand (x_v) totdat een veilige locatie is bereikt

De mate van verwonding hangt dan af van de vluchtsnelheid van een persoon, de reactietijd en de afstand tot een veilige locatie. De volgende vergelijkingen kunnen nu worden opgesteld voor de locatie ($x(t)$) van de vluchtende persoon als functie van de tijd (t):

$$x(t) = x_0 \text{ voor } t \leq t_r \quad (6.1)$$

$$x(t) = x_0 + u \cdot (t - t_r) \text{ voor } t \geq t_r \quad (6.2)$$

Mogelijke vluchtwegen kunnen overigens versperd zijn door de brand [Groene Boek, 2003, 1A, p. 49]. Hiermee is in deze berekeningen echter geen rekening gehouden.

In de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Voor een zelfredzame volwassene is in de berekeningen uitgegaan van:
 $u = 4 \text{ m/s}$ en $t_r = 5 \text{ s}$.
- Voor minder zelfredzame personen (kinderen onder de 10 jaar, zieken, gehandicapten en ouderen zijn de volgende waardes gehanteerd:
 $u = 1,2 \text{ m/s}$ en $t_r = 7,5 \text{ s}$.
- Gemiddeld 26% van de bevolking bestaat uit kinderen jonger dan 10 jaar en ouderen [Groene Boek 2003]
- Voor de afstand (x_v) tot een schuilplaats zijn de volgende waardes gebruikt [Groene Boek 2003]:
 - Stedelijk gebied: $x_v = 20\text{m}$, geeft blootstellingsduur van zelfredzame persoon van $5 \text{ s} + 20 \text{ [m]} / 4 \text{ [m/s]} = 10$ seconden, daarna stopt de blootstelling.
 - Bebouwd gebied: $x_v = 50 \text{ m}$, geeft blootstellingsduur van zelfredzame persoon van $5 \text{ s} + 50 \text{ [m]} / 4 \text{ [m/s]} = 18$ seconden
 - Onbebouwd gebied: geen dekking/schuilplaats mogelijk, vluchten tot het stralingsniveau is afgenomen tot 1 kW/m^2 , voor dit plasbrand: vluchten tot 106 m . Geeft blootstellingsduur van zelfredzame persoon van $5 \text{ s} + 106 \text{ [m]} / 4 \text{ [m/s]} = 31,5$ seconden

6.4.3 Resultaten

Resultaten van berekeningen zijn weergegeven in Bijlage 5 uitgaande van het plasbrandscenario uit het scenarioboek (§ 5.2). De volgende uitgangspunten zijn hierbij gehanteerd:

- Wel en geen beschermende werking van kleding.
 - Daar waar met de beschermende werking van kleding rekening gehouden is, wordt ook de verdeling van de gewonden over de verschillende Triageklassen aangegeven. Voor het percentage lichaamsoppervlak dat aan hittestraling wordt blootgesteld is conservatief uitgegaan van 60% gedurende de zomer en 15% gedurende de winter. Ook is het absolute aantal gewonden in elke triageklasse aangegeven, uitgaande van een bevolkingsdichtheid van 120 personen per ha (stedelijk gebied).
 - Daar waar met de beschermende werking van kleding geen rekening wordt gehouden is uitgegaan van volledige blootstelling aan de hittestraling (100% huidoppervlak). Uiteraard is er hier geen onderscheid gemaakt tussen zomer en winter.
- Vluchtsnelheden en reactietijden:
zelfredzame personen ($u = 4 \text{ m/s}$ en $t_r = 5 \text{ s}$)
minder zelfredzame personen ($u = 1,2 \text{ m/s}$ en $t_r = 7,5 \text{ s}$.)
- Vluchtafstanden:
20 m, 50 m en tot 1 kW/m^2 (1 kW/m^2 komt hier overeen met 106 m).
- Ringgrenzen:
99% letaal, 1% letaal en 1% 1^e graad brandwonden.

Hieronder worden enkele van deze berekeningen nader toegelicht. Dit zijn de berekeningen voor zelfredzame personen over een vluchtafstand van 20 m, waarbij de situaties wel en geen beschermende kleding worden vergeleken

De ringgrenzen (99% letaal, 1% letaal en 1% 1^e graad brandwonden) zijn nu anders dan bij de standaardsituatie uit het scenarioboek:

- Ten eerste omdat de personen gedurende de blootstellingsperiode weglopen en dus tijdens de vlucht een steeds lager stralingsniveau zullen ondervinden en

- ten tweede doordat ze na het bereiken van de veilige positie (hier: 20m) helemaal niet meer aan hitte worden blootgesteld.

In Tabel 6-3 zijn de resultaten weergegeven voor de situatie zonder beschermende werking van kleding. Hierbij is ook een opdeling per ring gemaakt in eerste, tweede en derde graad brandwonden.

Tabel 6-3 Geen beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

	Straling	Afstand	Percentages		
20 m vluchten, 4 m/s	kW/m ²	m	letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 105 105	< 24 24	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	21 - 105 21	24 - 37 37	32%	11%	66%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	8 - 21 8	37 - 57 57	0%	0%	28%

Indien de beschermende werking van kleding wordt meegenomen levert dit onderstaande resultaten op. Hierbij is dus onderscheid gemaakt in zomer en winter.

Tabel 6-4 Beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

winter	Straling	afstand	Percentages		
20 m vluchten, 4 m/s	kW/m ²	m	letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	105 - 130 105	23 - 24 24	2%	2%	91%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	37 - 105 37	24 - 30 30	0%	0%	23%
zomer					
	Straling	afstand	percentages		
20 m vluchten, 4 m/s	kW/m ²	m	letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	33 - 130 33	23 - 31 31	32%	12%	66%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	12 - 33 12	31 - 47 47	0%	0%	28%

Tabel 6-5 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	Personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	81%	20	overleden	32%	20
3e graad brandwonden		0%	0		9%	5
2e graad brandwonden	T2	0%	0	T1	12%	7
1e graad brandwonden	T3	18%	5	T3	47%	29
totaal		100%	25		100%	62

Uit Tabel 6-5 blijkt dat bij 120 pp/ha gedurende de zomer 25 en gedurende de winter 20 personen zullen komen te overlijden door vlam vattende kleding en/of 3^e graad brandwonden. Deze personen vormen 41% (9% + 32%) van het aantal slachtoffers 's zomers en 81% van het aantal slachtoffers 's winters. In de winter zal nog 5% van de personen 1^e graad brandwonden oplopen (dit is dan triage klasse 3). 's Zomers loopt 7% 2^e graad en 29% 1^e graad brandwonden op.

6.4.4 *Samenvatting slachtoffers / handelingsperspectieven buiten*

In Tabel 6-6 is het verwachte aantal slachtoffers voor de verschillende scenario's weergegeven (zie Bijlage 5). Duidelijk blijkt het effect van loopsnelheid en – afstand: een kortere afstand tot een veilig gebied en een grotere loopsnelheid verkleinen het aantal slachtoffers, zoals ook te verwachten valt. Verder is het duidelijk dat winterkleding de beste bescherming biedt. Berekeningen voor vluchten loodrecht op de windrichting zijn nog niet gemaakt. Hiervoor moet een andere brandcurve worden gebruikt. Aangezien de vlammen dan niet in de looprichting afbuigen valt het te verwachten dat vluchten loodrecht op de windrichting of tegen de wind in tot een kleiner aantal slachtoffers zal leiden. Indien echter een schuilplaats aanwezig is in de richting van de wind, kan het mogelijk voordelig zijn om snel naar deze schuilplaats te gaan, i.p.v. loodrecht op de wind een grotere afstand af te leggen. Toekomstige berekeningen kunnen hierover duidelijkheid scheppen.

Tabel 6-6 Overzicht van verwacht aantal slachtoffers voor de verschillende scenario's

Aantal slachtoffers uitgaande van 120 p/ha (stedelijk gebied)													
snellheid	afstand	onbeschermd				beschermd zomer				beschermd winter			
m/s	m	totaal	letaal	2e	1e	totaal	letaal	2e	1e	totaal	letaal	2e	1e
4	20	97	31	15	51	62	25	7	29	25	20	0	5
	50	110	33	17	60	69	26	8	35	25	20	0	5
	106	114	33	18	63	71	26	9	36	25	20	0	5
1,2	20	190	49	36	105	121	35	19	67	35	21	1	13
	50	235	57	46	132	149	39	25	85	40	21	2	17
	106	246	60	50	136	157	41	27	90	41	21	2	18

7 Referenties

- Ashe 2003 Ashe, B.S.W., Rew, P.J., Effects of flashfires on building occupants, WS Atkins Consultants Ltd, HSE Books, Research Report 084, ISBN 0717621812, 2003.
- Baars 2015 Baars M., I. van der Woude, L. Schotman, 'Regionaal Protocol Schuilen of Ontruimen/ Evacuëren bij incidenten met gevaarlijke stoffen', 2015.
- BAG 2014 Basisregistraties Adressen en Gebouwen, Kadaster, 2014.
- Bevi 2013 Handleiding Risicoberekeningen Bevi, RIVM 2015
- Brandweer-nl 2008-1 'Brandbeveiligingsconcept gebouwen met een publieksfunctie', handreiking brandweer, beleidsadvies, www.brandweernederland.nl, 2008.
- Brandweer-nl 2008-2 'Brandbeveiligingsconcept industriegebouwen', handreiking brandweer, beleidsadvies, www.brandweernederland.nl, 2008.
- Brandweer-nl Brandweer.nl, <http://www.brandweer.nl/algemene-onderdelen/zoeken/@7458/coating/>
- BRE 2005 Building Research Establishment, 'Escape of disabled people from fire', 2005.
- BSI,1997 British Standards Institution (1998), DD240 Part 1: 'Fire Safety Engineering in Buildings', BSI, London, UK, 1997.
- EFFECTS 2015 EFFECTS 10.0.5, A computer program to calculate the physical effects and consequences for the escape of hazardous materials, TNO, 2015.
- Eggink e.a. 2015 Eggink, S., A. Veens, J.L.M. Eskens, R.T.J. van Miltenburg, M. van der Hulst, "Handreiking bouwen binnen een veiligheidszone en plasbrandaandachtsgebied", revisie 1.2, 2015.
- Eggink e.a. 2016 Eggink, S., J.L.M. Eskens, R.T.J. van Miltenburg, M. van der Hulst, 'Handreiking bouwen binnen een invloedsgebied, Deel 2: de mogelijkheden van glas als beschermingsmiddel', versie 1.0, januari 2016.
- Galea e.a. 2013 Galea E.R. G. Sharp, L. Filippidis, S. Deere, M. Sauter, 'Investigating the impact of culture on evacuation behaviour – a UK data-set', 2013.
- Gele Boek 2005 Gele Boek - Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials (liquids and gases), CPR14E, PGS2, 2005.
- Groene Boek 2003 Groene Boek – 'Methoden voor het bepalen van mogelijke schade aan mensen en goederen door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen, PGS1, Ministerie van VROM, December 2003.
- Harada e.a. 2000 Harada, K., A. Enomoto, K. Uede, T. Wakamatsu, 'Experimental study on glass cracking and fallout by radiant heat exposure', Fire Safety Science – Proceedings of the Sixth International Symposium, ed. M. Curtat, IAFSS, pp. 1063-1074, 2000.

HARI 2009	Handleiding Risicoberekeningen Bevi, versie 3.2 RIVM, Juli 2009.
HART 2015	Handleiding Risicoanalyse Transport, Rijkswaterstaat, 2015
Home Office 1995	Home Office, 'Fire Statistics United Kingdom 1993', Table I and J, pp.65, UK, 1995.
Hymes 1983	Hymes, I. 'The physiological and pathological effects of thermal radiation' U.K. Atomic Energy Authority, Safety and Reliability Directorate, Culchetch, Warrington, SRD R 275, 1983.
Hymes 1996	Hymes, I., Boydell, W. & Prescott, B., 'Thermal Radiation: Physiological and Pathological Effects', Major Hazards Monograph, IChemE, ISBN 0 85295 328 3, 1996.
IPO10 2010	Catalogus bouwkundige maatregelen externe veiligheid, revisie 5.3, Oranjewoud, 2010.
Jin 1997	Tadahisa Jin, 'Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke', Proc. 5 th Int. Symp. On Fire Safety Science pp 3-21, 1997.
Landucci, 2011	Landucci G., Tugnoli A., Busini V., Derudi M., Rota R., Cozzani V., 'The Viareggio LPG accident : Lessons Learnt', Journal of loss prevention in the process industries 24, p. 466-476, 2011.
Lawson 1952	Lawson D., Simms D., 'The ignition of wood y radiation', British Journal of Applied Physics, 3., pp 288- 292, 1952
Margolin 2013	Margolin, S., 'Flash fire part 2, Validating the Standards', Well Servicing, 2013.
Molag e.a. 2005	Molag M., Kruithof A., 'BLEVE prevention of a LPG tank vehicle or a LPG tank wagon', TNO-report B&O-A R2005/364, 2005.
Molag e.a. 2006	Molag, M., Reinders, J.E.A., Elbers, S.J., 'BLEVE van een autogas tankauto', TNO-Rapport 2006-A-R0307/B, 2006.
Mills, 1992	Mills A.F., 'Heat transfer', ISBN 0-25607642-1, 1992.
NEN 6065	NEN 6065: Bepaling van de bijdrage tot brandvoortplanting van bouw materiaal (combinaties)
NEN 6068	NEN 6068 (nl); Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen ruimten
NEN 6069	NEN 6069: Beproeving en klassering van de brandwerendheid van bouw delen en bouw producten
NEN-EN-13501-1	NEN-EN-13501-1 Brandclassificatie van bouw producten en bouw delen - Deel 1: Classificatie op grond van resultaten van beproeving van het brandgedrag
NEN-EN-13501-2	NEN-EN-13501-2 buitenbrandkromme
NIBRA 2004	NIBRA Verhallen P., Aubel P., 'Coatings voor LPG-tankauto's', NIBRA-rapport, 2004.
NPR 6091	Nederlandse praktijk richtlijn (NPR) NPR 6091: Brandveiligheid van gebouwen – Brandoverslag door straling tussen ruimten
Oude Spraaksté 2009	Oude Spraaksté, D. "Effecten van maatregelen t.b.v. zelfredzaamheid, een onderzoek naar de kwantificeerbaarheid van zelfredzaamheid bevorderende maatregelen". TNO rapport, april 2009.

Paarse Boek 2005	Paarse Boek - Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book), PGS 3, Ministerie van VROM, Den Haag, 2005.
Pagni e.a. 2002	Pagni P.J., 'Thermal Glass Breakage', Fire Safety Science - Proceedings of the Seventh International Symposium, IAFSS, pp.3-22, 2002
Peacock 1997	Peacock R.D., Reneke P.A., Jones W.W., Bukowski R.W. & Forney G.P., 'A User's Guide for FAST Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport', National Institute of Standards and Technology, Special Publication 921, 1997.
Pontiggia e.a.2010	Pontiggia M., Busini V., Derudi M., Alba M., Scaioni M. Rota R., Landucci G., Molag M., Tugnoli A., Cozzani V., 'Safety of LPG rail transportation in the perspective of the Viareggio accident', Reliability, Risk and Safety- Ale, Papazoglou & Zio (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60427-7, p. 1881 – 1888, 2010.
Purser 2003	Purser, 'data benefits', Fire Engineers Journal & Fire Protection (FEJ & FP), p. 21-24, august 2003.
Raben e.a. 2008	I.M.E. Raben, I.J.M. Trijssenaar, S.I. Wijnant, 'Kwantificering van zelfredzaamheid', TNO rapport 2008-U-R0487/B, 2008
Reinders e.a. 2013	Reinders J.E.A., Trijssenaar I., "Van letselmodellering naar Triageklassen", TNO rapport (2013)
Rew e.a.1997	Rew, P.J. & Hulbert, W.G. (1997) Modelling of Thermal radiation from external hydrocarbon poolfires, in Trans IChemE, Vol.75 part B.
Scenarioboek 2016	Scenarioboek.nl, Scenarioboek Externe Veiligheid, www.scenarioboek.nl, 2016
SeReMo	SeReMo staat voor Self-Rescue Model. SeReMo is een verzameling van letsel- en maatregelmodellen, waarmee de effectiviteit van maatregelen die de zelfredzaamheid bevorderen gekwantificeerd kan worden in termen van reductie van het aantal doden en niet letale slachtoffers. SeReMo is geïmplementeerd in de TNO ontwikkelversie van EFFECTS.
Trijssenaar 2003	Trijssenaar, I.J.M., 'samenvatting literatuurstudie zicht voor zelfredzaamheid', TNO-rapport CR2003/ 291, 2003.
Trijssenaar e.a. 2013	Trijssenaar, I. , C. Thijssen, R. Sterkenburg, I. Raben, M. Kobes, "Kwantificering van de effectiviteit van maatregelen voor ongevallen met gevaarlijke stoffen, Fase 2", TNO-rapport R11365, 2013.
Venart 2010	Venart, J.E.S., 'Buncefield: cause and consequences', Reliability, Risk and Safety- B. Ale, Papazoglou & Zio (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60427-7, pp. 1881 – 1888, 2010.
VRRR 2015	Veiligheidsregio Rotterdam-Rijnmond 'Handelingsperspectief bij ongevallen met gevaarlijke stoffen', Versie 1.0 – Definitief, 2015.

Wenzel e.a. 1995

Wenzel, H.G. & Spitzer, H., 'Glas Als Schutzstoff Gegen Warmestrahlung', Stahl und Eisen, February, 4: 30-232, 1995.

8 Definities en afkortingen

8.1 Definities zelfredzaamheid

Benodigde tijd

De benodigde tijd is de tijd die een persoon nodig heeft om zichzelf in veiligheid te brengen. De benodigde tijd is onderverdeeld in de volgende elementen:

- *Detectietijd*
De tijd tussen het moment van ontstaan van de ramp en het moment van detectie van de ramp.
- *Alarmeringstijd*
De tijd tussen het moment van detectie van de ramp en het moment dat er wordt gealarmeerd.
- *Ontdekkingstijd*
De ontdekkingstijd is gedefinieerd als de som van de detectietijd en de alarmeringstijd. De tijd tussen het moment van ontstaan van de ramp en het moment dat er wordt gealarmeerd.
- *Pre-movementtijd*
De tijd tussen het moment van alarmering en het moment dat men begint met handelen. In deze tijd interpreteert men informatie en besluit hoe te reageren op het gevaar: men kiest een zelfredzame strategie. Daarnaast bevat deze pre-movementtijd het nemen van voorbereidende acties, zoals het verzamelen van waardevolle eigendommen en (soms) het waarschuwen van anderen.
- *Handelingstijd*
De tijd waarin men de gekozen zelfredzame strategie uitvoert.

Handelingsperspectief

een handelingsperspectief is de meest effectieve handeling die een burger kan uitvoeren om zichzelf in veiligheid te brengen

Zelfredzaamheid

Zelfredzaamheid is in dit onderzoek: de mate waarin een persoon zichzelf in veiligheid kan brengen bij een ongeval met gevaarlijke stoffen

Binnen blijven

Binnen zijn en blijven

Schuilen

Schuilplaats binnengaan en binnen blijven

Ontruimen

een persoon verlaat na alarmering een gebouw vanwege een (dreigend) gevaar.

Vluchten

het zichzelf in veiligheid brengen door weg te gaan van een (dreigend) ongevalsscenario in de buitenlucht. De persoon verplaatst zich hierbij van 'bedreigd' naar 'onbedreigd' gebied.

Dekking zoeken

Direct in de buitenlucht beschutting zoeken, bijvoorbeeld achter een gebouw of wal of in een greppel.

8.2 Definities hittestraling**Absorptiecoëfficiënt (Absorbtion coefficient)**

De absorptiecoëfficiënt geeft aan welk deel van de invallende hittestralingsflux wordt geabsorbeerd [Groene Boek, 2003]

Emissiecoëfficiënt (Emission coefficient)

Deel van de invallende hittestralingsflux dat wordt uitgezonden van een oppervlakte bij een bepaalde temperatuur [NEN 6068]

Kritieke eindtemperatuur (Critical temperature of glass)

De kritieke eindtemperatuur is de temperatuur op het moment dat schade optreedt.

Kritische stralingsintensiteit

Die stralingsintensiteit, waarbij bij *langdurige* expositie nog juist schade optreedt. Bij een stralingsintensiteit die lager is dan de kritische stralingsintensiteit, zal ook bij oneindig lange expositie geen ontbranding van het materiaal optreden.

Ambient temperature (K)

omgevingstemperatuur

Critical temperature of glass (K)

Kritieke eindtemperatuur

Heat capacity of glass (J/kg*K)

warmtecapaciteit van het glas

Heat exchange coefficient of glass (W/m/K)

Warmte-overdrachtscoëfficiënt

Heat load on glass (kW/m²)

Stralingsintensiteit ofwel hittestralingsflux

Surface temperature of glass (K)

oppervlakte temperatuur van het glas, initieel doorgaans gelijk aan de omgevingstemperatuur (ambient temperaturen)

Surface Emissive Power of SEP (kW/m²)

Hittestraling vanaf het oppervlak van een vlam.

8.3 Afkortingen**AGS**

Adviseur Gevaarlijke Stoffen

BLEVE

Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

GAGS

Gezondheidskundig Adviseur Gevaarlijke Stoffen

MPL

Meetplanleider

9 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:
LEV (Laboratorium Externe Veiligheid)
Samenwerking tussen veiligheidsregio's in de Provincies Noord-Holland, Flevoland en Utrecht
Postbus 92171
1090 AD Amsterdam
Postadres:
Brandweer Amsterdam-Amstelland
T.a.v. Norbert Gret
Postbus 92171
1090 AD Amsterdam

Naam en paraaf tweede lezer:



Hans Boot

Ondertekening:



Ingrid Raben
Projectleider

Autorisatie vrijgave:



Erica de Feijter
Research Manager

Bijlage 1: literatuursamenvatting schade bij wolkbranden

In het verleden zijn verschillende ongevallen gebeurd waarbij een wolkbrand heeft plaatsgevonden. Het ongeval in Viareggio op 29 juni 2009 is beschreven en geanalyseerd in de literatuur [Pontiggia 2010, Landucci, 2011].

Viareggio

In Viareggio heeft een ongeval plaatsgevonden als gevolg van de ontsporing van een trein die 14 wagons met LPG voorttrok. De eerste wagon is lekgeraakt na de ontsporing, waardoor de gehele inhoud is vrijgekomen en een brandbare wolk heeft gevormd. Ontsteking van de wolk heeft geleid tot een uitgebreide en zeer Ernstige wolkbrand, die meerdere huizen in brand heeft gezet, leidend tot grote schade en 31 doden.

Schade in Viareggio

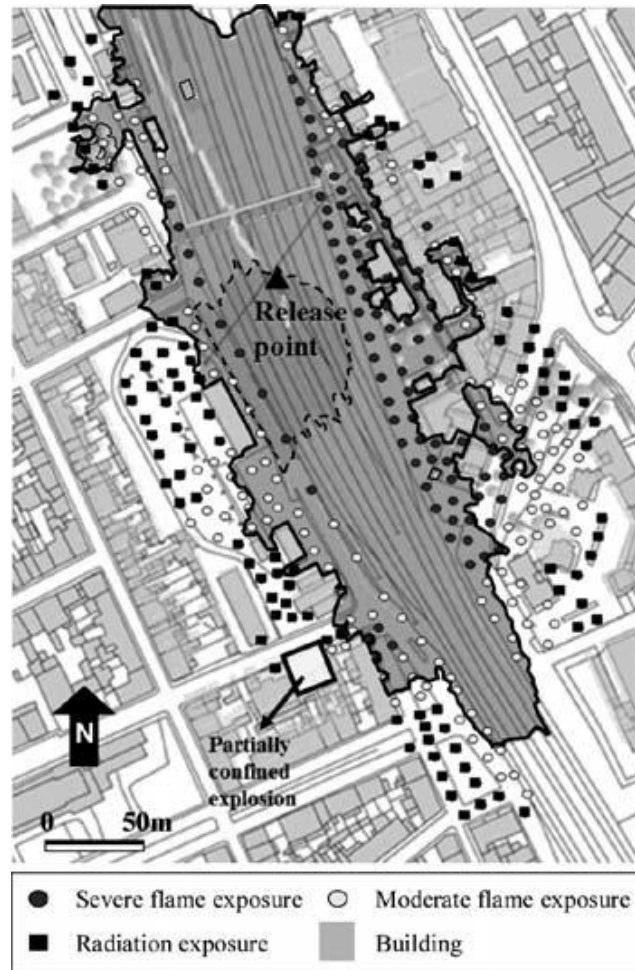
Figuur 1 toont de resultaten van de schade analyse van [Pontiggia, 2010]. De schade analyse is gedaan op basis van

- 1) Directe inspectie van openbaar (niet-afgezet) gebied op 3 juli 2009;
- 2) Analyse van foto's en video's, die op het internet zijn gepubliceerd;

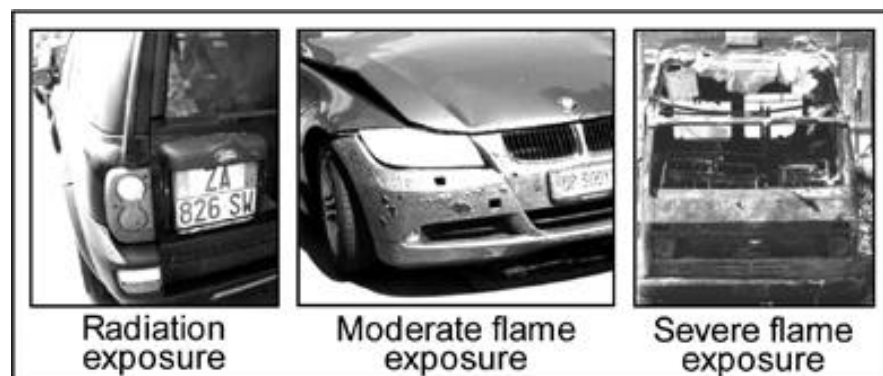
Het schadebeeld geeft geen bewijs van een eventuele externe overdruk. Wel zijn verschillende huizen en een garage beschadigd door de effecten van een explosie in het gebouw. Door het warme weer hadden veel huizen de ramen en tuindeuren open staan. De explosie in het gebouw heeft waarschijnlijk plaatsgevonden door verbranding van het brandbare gas dat door de open ramen en deuren is binnengekomen [Pontiggia 2010].

De schade is in kaart gebracht aan de hand van een systematische classificatie van de schade aan gebouwen, voertuigen en vegetatie. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende schadeniveaus (zie figuur 2 voor een voorbeeld):

- Schade door warmtestraling: schade door warmtestraling zonder direct vlamcontact: vervormd plastic, gedeeltelijk verschroeide vegetatie
- Matige vlamschade: schade door direct vlamcontact met significante effecten op gras/ struikgewas, matig effect op gebouwen (vegetatie is verschroeid, maar heeft niet vlam gevat; muren zijn zwart, autolak en plastics zijn gesmolten, maar hebben niet vlam gevat)
- Zware vlamschade: gras / vegetatie heeft vlam gevat, gebouwen en auto's hebben vlam gevat, ruiten zijn gesprongen door sterke thermische uitzetting)



Figuur 1. Schadekaart aangevuld met een berekende UEL (gestippelde lijn) en LEL (doorgetrokken lijn) op grondniveau op 300 seconden na vrijkomen [Pontiggia 2010]

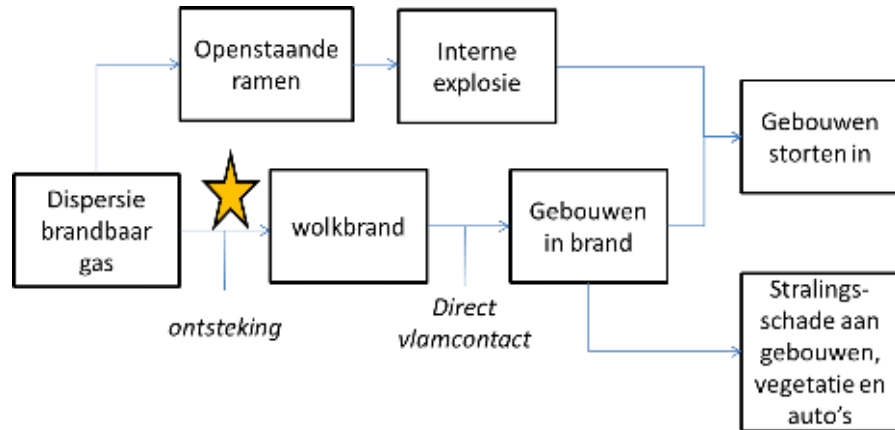


Figuur 2. Voorbeeld van de classificatie van beschadigde voertuigen met toenemend schadeniveau

De ontstekingstijd is ca. 3 minuten [Landucci, 2011] tot 5 minuten [Pontiggia, 2010]. Wolkbrand zonder overdruk, explosie in gebouwen (interne explosie), brand van gebouwen zelf na ontsteking door direct vlamcontact (van wolkbrand)

[Landucci, 2011]. Instorten van gebouwen ofwel door interne overdruk of door de brand, die ontstaan is als gevolg van de wolkbrand.

Waarschijnlijk is de stralingsschade veroorzaakt door de branden van gebouwen, niet direct door de wolkbrand.



Bijlage 2: Statistische modelberekeningen voor bepalen van de kans op letsel bij een BLEVE

We gaan ervan uit dat de beschikbare tijd een normale verdeling volgt. Doorgaans is het eenvoudigst om op basis van literatuurgegevens een schatting te maken van een lage waarde (1^e percentiel, d.w.z. de cumulatieve kans op een beschikbare tijd kleiner dan deze lage waarde is 1%) en een hoge waarde (99^e percentiel, d.w.z. de cumulatieve kans op een beschikbare tijd kleiner dan deze hoge waarde is 99%).

De kansdichtheidsfunctie voor de beschikbare tijd is:

$$p_{beschikbare\ tijd}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

De kans dat de beschikbare tijd kleiner is dan een bepaalde tijd kan wiskundig berekend worden met de cumulatieve verdelingsfunctie:

$$P_{beschikbare\ tijd < t} = 0,5 + 0,5 * erf\left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

Waarin

μ de gemiddelde waarde voor de beschikbare tijd, $\mu = (\text{laag} + \text{hoog})/2$

σ de standaard deviatie van de verdeling, deze is te berekenen door de lage tijds-waarde in te vullen in de vergelijking voor P, waarvoor geldt dat $P_{beschikbare\ tijd < laag} = 1\%$

Voor de benodigde tijd gaan we uit van een lognormale verdeling, dit blijkt onder meer uit experimenten van [Galea 2013] en het beoordelingsmodel van Purser [Purser 2003]. De cumulatieve verdelingsfunctie voor de benodigde tijd is:

$$P_{benodigde\ tijd < t} = 0,5 + 0,5 * erf\left(\frac{\ln(t) - \mu_{ben}}{\sigma_{ben}\sqrt{2}}\right)$$

μ_{ben} de natuurlijke logaritme van de mediaan van de benodigde tijd, oftewel (\ln (mediaan)), te bepalen door

$\mu = (\ln(\text{laag}) + \ln(\text{hoog}))/2$; de mediaan is gelijk aan e^μ .

σ de standaarddeviatie van de verdeling, deze is te berekenen door de lage tijdswaarde in te vullen in de vergelijking voor P, waarvoor geldt dat $P_{beschikbare\ tijd < laag} = 1\%$

Voor de bepaling van de waarden van de totale kans dat de benodigde tijd kleiner is dan de beschikbare tijd voeren we de volgende berekening uit:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} (p_{beschikbare\ tijd}(t) * P_{benodigde\ tijd < t}) dt \\ &= \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) * \left(0,5 + 0,5 * erf\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right) \right) dt \end{aligned}$$

Bijlage 3: Andere grenswaarde hittestraling

Eggink [2015] hanteert een grenswaarde voor de warmtestraling van 9 kW/m^2 voor enkel glas. De glasdikte is 6 mm. Waarschijnlijk is hiervoor een absorptiecoëfficiënt van 0,34 (absorptie van 34%) gehanteerd, aangezien 66% van de warmtestraling wordt doorgelaten [Eggink 2015]. De waarde van 9 kW/m^2 kan met het model worden gereproduceerd met een kritieke eindtemperatuur van 93 °C of een warmteoverdrachtscoëfficiënt van $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. De input voor de reproductie van de 9 kW/m^2 grenswaarde is gegeven in Tabel 1. De resultaten van de reproductie zijn verder niet gebruikt voor de schademethodiek.

Tabel 1 Reproductie van grenswaarde van 9 kW/m^2 voor enkel glas

Parameters	
Inputs	
Heat load on glass (kW/m^2)	9
Density of glass (kg/m^3)	2600
Thickness of glass (mm)	6
Surface temperature of glass (K)	293
Heat capacity of glass ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	840
Heat exchange coefficient of glass ($\text{W/m}^2\text{K}$)	7
Critical temperature of glass ($^{\circ}\text{C}$)	92
Emission coefficient	1
Absorbtion coefficient	0,34

Bijlage 4: Berekeningen voor vluchten buiten

In deze bijlage zijn de berekende resultaten voor de verschillende scenario's samengevat, uitgaande van het plasbrandscenario uit het scenarioboek (§ 5.2). De volgende uitgangspunten zijn hierbij gehanteerd:

- Wel en geen beschermende werking van kleding.
 - Daar waar met de beschermende werking van kleding rekening gehouden is, wordt ook de verdeling van de gewonden over de verschillende Triageklassen aangegeven. Voor het percentage lichaamsoppervlak dat aan hittestraling wordt blootgesteld is conservatief uitgegaan van 60% gedurende de zomer en 15% gedurende de winter. Ook is het absolute aantal gewonden in elke triageklasse aangegeven, uitgaande van een bevolkingsdichtheid van 120 personen per ha.
 - Daar waar met de beschermende werking van kleding geen rekening wordt gehouden is uitgegaan volledig blootstelling aan de hittestraling (100% huidoppervlak). Uiteraard is er hier geen onderscheid gemaakt tussen zomer en winter.
- Vluchtsnelheden en reactietijden:
 - zelfredzame personen ($u = 4$ m/s en $t_r = 5$ s.)
 - minder zelfredzame personen ($u = 1,2$ m/s en $t_r = 7,5$ s.)
- Vluchtafstanden:
 - 20m, 50m en tot 1 kW/m² (hier is dit tot 106 m).
- Ringgrenzen:
 - 99% letaal, 1% letaal en 1% 1^e graad brandwonden.

Tabel 0-1 Afstand tot ringgrenzen (vanaf centrum plas) en bijbehorende stralingsniveaus voor zelfredzame personen en situatie zonder beschermende werking van kleding.

	20 m vluchten, 4 m/s		50 m vluchten, 4 m/s		106 m vluchten, 4 m/s	
	afstand (m)	kW/m ²	afstand (m)	kW/m ²	afstand (m)	kW/m ²
99% letaal grens	< 23 23	130 130	< 23 23	> 130 130	< 23 23	> 130 130
1% letaal grens	33 - 23 33	28 - 130 28	38 - 23 38	19 - 130 19	40 - 23 40	17 - 130 17
1% 1e gr br.w. grens	53 - 33 53	9 - 28 9	62 - 38 62	7 - 19 7	64 - 40 64	6 - 17 6

Tabel 0-2 Afstand tot ringgrenzen (vanaf centrum plas) en bijbehorende stralingsniveaus voor minder zelfredzame personen en situatie zonder beschermende werking van kleding.

	20 m vluchten, 1,2 m/s		50 m vluchten, 1,2 m/s		106 m vluchten, 1,2 m/s	
	afstand (m)	kW/m ²	afstand (m)	kW/m ²	afstand (m)	kW/m ²
99% letaal grens	< 23 23	> 130 130	< 23 23	> 130 130	< 24 24	> 105 105
1% letaal grens	40 - 23 40	17 - 130 17	47 - 23 47	12 - 130 12	49 - 24 49	11 - 105 11
1% 1e gr br.w. grens	62 - 40 62	7 - 17 7	73 - 47 73	4 - 12 4	74 - 49 74	4 - 11 4

Tabel 0-3 Geen beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

20 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 105 105	< 24 24	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	21 - 105 21	24 - 37 37	32%	11%	66%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	8 - 21 8	37 - 57 57	0%	0%	28%

Tabel 0-4 Geen beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand

50 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 105 105	< 24 24	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	18 - 105 18	24 - 39 39	31%	11%	67%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	7 - 18 7	39 - 60 60	0%	0%	30%

Tabel 0-5 Geen beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand

106 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 105 105	< 24 24	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	18 - 105 18	24 - 39 39	33%	11%	66%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	7 - 18 7	39 - 61 61	0%	0%	31%

Tabel 0-6 Geen beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

20 m vluchten, 1,2 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 56 56	< 27 27	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	11 - 56 11	27 - 49 49	33%	12%	65%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	4 - 11 4	49 - 73 73	0%	0%	32%

Tabel 0-7 Geen beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand

50 m vluchten, 1,2 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 48 48	< 28 28	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	9 - 48 9	28 - 54 54	34%	12%	65%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	3 - 9 3	54 - 81 81	0%	0%	31%

Tabel 0-8 Geen beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand

106 m vluchten, 1,2 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 48 48	< 28 28	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	8 - 48 8	28 - 56 56	34%	11%	64%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	3 - 8 3	56 - 81 81	0%	0%	31%

Tabel 0-9 Beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

winter 20 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	105 - 130 105	23 - 24 24	2%	2%	91%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	37 - 105 37	24 - 30 30	0%	0%	23%

zomer 20 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	33 - 130 33	23 - 31 31	32%	12%	66%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	12 - 33 12	31 - 47 47	0%	0%	28%

Tabel 0-10 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	81%	20	overleden	32%	20
3e graad brandwonden	T2	0%	0	T1	9%	5
2e graad brandwonden		0%	0		12%	7
1e graad brandwonden	T3	18%	5	T3	47%	29
totaal	0	100%	25	0	100%	62

Tabel 0-11 Beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand

winter 50 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	105 - 130 105	23 - 24 24	2%	2%	92%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	37 - 105 37	24 - 30 30	0%	0%	28%

zomer 50 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	30 - 130 30	23 - 32 32	32%	12%	66%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	11 - 30 11	32 - 50 50	0%	0%	29%

Tabel 0-12 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand.

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	79%	20	overleden	29%	20
3e graad brandwonden	T2	0%	0	T1	9%	6
2e graad brandwonden		0%	0		12%	8
1e graad brandwonden	T3	20%	5	T3	50%	35
totaal	0	100%	25	0	100%	69

Tabel 0-13 Beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand

winter 106 m vluchten, 4 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	105 - 130 105	23 - 24 24	2%	2%	92%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	33 - 105 33	24 - 31 31	0%	0%	25%
zomer 106 m vluchten, 4 m/s					
	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	28 - 130 28	23 - 33 33	29%	11%	68%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	10 - 28 10	33 - 51 51	0%	0%	27%

Tabel 0-14 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	79%	20	overleden	28%	20
3e graad brandwonden	T2	0%	0	T1	9%	6
2e graad brandwonden		0%	0		12%	9
1e graad brandwonden	T3	21%	5	T3	51%	36
totaal	0	100%	25	0	100%	71

Tabel 0-15 Beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

winter 20 m vluchten, 1 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	56 - 130 56	23 - 27 27	11%	9%	85%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	21 - 56 21	27 - 37 37	0%	0%	24%
zomer					
20 m vluchten, 1 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 83 83	< 25 25	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	16 - 83 16	25 - 41 41	29%	11%	69%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	7 - 16 7	41 - 62 62	0%	0%	30%

Tabel 0-16 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Zelfredzame personen. 20 m vluchtafstand

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Minder mob. personen. 20 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	56%	20	overleden	16%	20
3e graad brandwonden	T2	2%	1	T1	12%	15
2e graad brandwonden		4%	1		16%	19
1e graad brandwonden	T3	37%	13	T3	55%	67
totaal	0	100%	35	0	100%	121

Tabel 0-17 Beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand

winter 50 m vluchten, 1 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	56 - 130 56	23 - 27 27	14%	11%	84%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	16 - 56 16	27 - 41 41	0%	0%	26%
zomer					
50 m vluchten, 1 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 83 83	< 25 25	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	14 - 83 14	25 - 44 44	31%	11%	67%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	5 - 14 5	44 - 69 69	0%	0%	30%

Tabel 0-18 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 50 m vluchtafstand

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Minder mob. personen. 50 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	50%	20	overleden	13%	20
3e graad brandwonden	T2	3%	1	T1	13%	19
2e graad brandwonden		5%	2		17%	25
1e graad brandwonden	T3	42%	17	T3	57%	85
totaal	0	100%	40	0	100%	149

Tabel 0-19 Beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand

winter 106 m vluchten, 1 m/s	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 130 130	< 23 23	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	56 - 130 56	23 - 27 27	16%	12%	83%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	15 - 56 15	27 - 42 42	0%	0%	27%
zomer 106 m vluchten, 1 m/s					
	Straling kW/m ²	afstand m	percentages		
			letaal	2e gr brand	1e gr brand
ring 1 grens (99% letaal)	> 83 83	< 25 25	100%	0%	0%
ring2 grens (1% letaal)	13 - 83 13	25 - 46 46	30%	11%	68%
ring 3 grens (1% 1e gr. brandw.)	5 - 13 5	46 - 69 69	0%	0%	31%

Tabel 0-20 Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Minder zelfredzame personen. 106 m vluchtafstand

Triageklassen bij beschermende werking van kleding. Minder mob. personen. 106 m vluchtafstand						
120 pp/ha	Winter			Zomer		
Aard van verbranding	Triageklasse	%	personen	Triageklasse	%	personen
Vlam vattende kleren	overleden	48%	20	overleden	13%	20
3e graad brandwonden	T2	3%	1	T1	13%	21
2e graad brandwonden		5%	2		17%	27
1e graad brandwonden	T3	44%	18	T3	57%	90
totaal	0	100%	41	0	100%	157