

# Alternatieve blusmiddelen



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
[www.nipv.nl](http://www.nipv.nl)  
[info@nipv.nl](mailto:info@nipv.nl)  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2022

Auteurs	T. Geertsema, V. Jansen en R. van Liempd
Opdrachtgever	Lectoraat Brandweerkunde
Contactpersoon	R. Weewer

Datum	21 oktober 2022
-------	-----------------

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

# Samenvatting

Fabrikanten en distributeurs laten ons weten dat er alternatieve blusmiddelen op de markt zijn gekomen die mogelijk van meerwaarde zijn bij reguliere en bijzondere brandscenario's. In de meeste gevallen wordt de werking van deze middelen door fabrikanten onderbouwd middels praktijktesten. Het probleem waar brandweerkorpsen (en het lectoraat Brandweerkunde) voor staan is: zijn de testresultaten te vertalen naar de praktijk? Daarnaast is soms niet geheel helder in welke gevallen en in welke mate deze middelen een bijdrage leveren aan de brandbestrijding, of voor welke tactiek of werkmethode ze toepasbaar zijn. Inmiddels maken verschillende veiligheidsregio's al wel gebruik van deze blusmiddelen. Het lectoraat Brandweerkunde van NIPV heeft daarom een verkennend (literatuur)onderzoek uitgevoerd (lopend van oktober 2018 tot januari 2020) met als doel brandweerkorpsen meer inzicht te geven in de werkingsprincipes, toepassingskaders en beperkingen van deze blusmiddelen.

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

*Wat zijn de werkingsprincipes van (alternatieve) blusmiddelen en wat is de toepasbaarheid van die blusmiddelen in de verschillende incidentscenario's?*

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, zijn de volgende deelvragen geformuleerd:

1. Welke soorten alternatieve blusmiddelen bestaan er?
2. Welke relevante kennis, kaders en handelingsperspectieven zijn er in de literatuur te vinden over alternatieve blusmiddelen?
3. Wat is de bluswerking van deze blusmiddelen?
4. Wat is de werking van de blusmiddelen binnen zowel standaard als specifieke incidentscenario's?

Hierbij is gezocht naar onderbouwing vanuit natuurkundige en scheikundige principes om te kunnen duiden op welke wijze het blusmiddel een brand blust. Op basis van deze principes kan bepaald worden in welke incidentscenario's een blusmiddel toepasbaar is.

Voor het literatuuronderzoek is, hoofdzakelijk digitaal, gezocht naar nationaal en internationaal gepubliceerde artikelen, onderzoeksrapporten, testverslagen en publicaties door overheden, onafhankelijke instituten en in wetenschappelijke tijdschriften, maar ook naar onderzoeken uitgevoerd in opdracht van of door fabrikanten zelf. Hierbij is gebruikgemaakt van de sneeuwbalmethode, waarbij genoemde referenties verder onderzocht zijn op relevantie informatie. Vervolgens is in overleg met de opdrachtgever een aantal scenario's opgesteld waartegen de geselecteerde blusmiddelen zijn afgezet. Op basis van de informatie die uit het literatuuronderzoek naar voren is gekomen, is per scenario een uitspraak gedaan over de effectiviteit van de blusmiddelen.

De blusmiddelen zijn op basis van een eerder uitgevoerd verkennend literatuuronderzoek onderverdeeld in:

- > Watergedragen additieven:
  - Gelvormende middelen
  - Mineraalblusmiddelen
  - Zeepvormende middelen
  - Surfactanten
- > Aerosolgeneratoren.

Blusmiddelen binnen de groep watergedragen additieven hebben verschillende fysische en chemische werkingen. De belangrijkste fysische werkingen zijn het afdichten van de brand (gelvormende, minerale en zeepvormende<sup>1</sup> middelen) en een groter indringend vermogen in de brandstof (surfactanten). De belangrijkste chemische werkingen zijn het koelen van de brandstof (gelvormende en mineraalblusmiddelen en surfactanten) en het afbreken van de brandstof (zeepvormende middelen).

De fysische werking van blusmiddelen binnen de groep aerosolen is het verdringen van brandbare gassen en zuurstof en de chemische werking is het neutraliseren van radicalen. Voor wat de toepassingskaders betreft, wordt opgemerkt dat na het gebruik van een aerosolgenerator wel vaak afblussen met water nodig is, omdat een aerosolgenerator niet voldoende koelt.

---

<sup>1</sup> Het afdichten van de brand door zeepvormende middelen is het gevolg van het afbreken van de brandstof waardoor een schuim gevormd wordt.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
	<b>Voorwoord</b>	<b>6</b>
	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Onderzoeksmethode</b>	<b>10</b>
1.1	Uitvoering van het onderzoek	10
1.2	Geraadpleegde bronnen	10
1.3	Vastgestelde scenario's	10
<b>2</b>	<b>Blusprincipes</b>	<b>12</b>
2.1	Brand en branddriehoek	12
2.2	Blussende principes per zijde van de branddriehoek	18
2.3	Brandklassen van blusmiddelen	24
<b>3</b>	<b>(Blus)werking van blusmiddelen</b>	<b>25</b>
3.1	Hoofdgroepen blusmiddelen	25
3.2	Aerosolen	26
3.3	Gelvormende middelen	29
3.4	Mineralen	31
3.5	Zeepvormende middelen	35
3.6	Surfactanten	37
3.7	In de markt verkrijgbare producten anno 2020	40
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>41</b>
4.1	Beantwoording van de deelvragen	41
4.2	Beantwoording van de hoofdvraag	42
	<b>Literatuurlijst</b>	<b>43</b>
	<b>Bijlage 1: Producten</b>	<b>52</b>

# Voorwoord

Met grote regelmaat worden de brandweer alternatieve blusmiddelen aangeboden die branden op miraculeuze wijze beloven te blussen. Ook wij binnen het lectoraat Brandweerkunde krijgen mails, filmpjes en folders opgestuurd met de vraag wat we ervan vinden, en soms ook of we het blusmiddel willen aanbevelen. Veelal zijn er geen onderzoeksrapporten, maar slecht kleine demonstraties beschikbaar, en wordt er ook niet op gestructureerde wijze casuïstiek verzameld op basis waarvan de werking kan worden geëvalueerd. Zo kan het gebeuren dat de brandweer in Nederland blusmiddelen aanschaft zonder duidelijk te hebben hoe de exacte werking is en voor welk scenario ze geschikt zijn.

Er hebben diverse pilots plaatsgevonden waarvan nauwelijks resultaten beschikbaar zijn, en verschillende blusmiddelen zijn in het magazijn verstoofd, omdat ze zijn afgewezen na een enkele mislukte poging. Om deze reden zijn wij gestart met het in kaart brengen van de op dit moment beschikbare alternatieve blusmiddelen. Een dergelijk overzicht bestond nog niet. Wij hebben ons best gedaan zo veel mogelijk blusmiddelen mee te nemen, maar het is uiteraard mogelijk dat er ergens nieuwe alternatieven opduiken. We hopen daarmee bereikt te hebben dat de brandweer dan alternatieve blusmiddelen zelf kan indelen naar werking en gebruik op basis van de indeling in dit rapport. Omdat uiteindelijk elk blusmiddel iets moet doen met een van de zijden van de branddriehoek, is ook gekeken hoe de werking is, en hebben we een globale indeling gemaakt van de toepasbaarheid in verschillende scenario's.

Ik mag wel zeggen dat het echt een enorme klus is geweest om alle gegevens in dit document te verzamelen, te interpreteren en in te delen naar werking en scenario. Veel groter dan we in eerste instantie hadden gedacht. De dikte van het rapport weerspiegelt absoluut niet de hoeveelheid werk die erin zit. Maar het is wel een mooi overzicht geworden. Ik hoop en verwacht dat de brandweer in Nederland haar voordeel met dit document kan doen!

Ricardo Weewer  
Lector Brandweerkunde

# Inleiding

## Achtergrond

De afgelopen jaren komen er steeds meer alternatieve blusmiddelen op de markt waarvan (deels) onduidelijk is wat hun werkingsprincipe is, maar waaraan door fabrikanten en distributeurs bijzondere kenmerken worden toegeschreven die voordelen opleveren ten opzichte van blussing met (alleen) water. Voorbeelden hiervan zijn een groter koelend vermogen, een sterker afdekkend vermogen, beperken of stoppen van pyrolyse, een negatief katalytische werking of een isolerend vermogen. Het is echter vaak onbekend wat de fysische en/of chemische verklaring voor deze eigenschappen is. Ook is vaak onbekend wat de primaire en secundaire blussende werking van een blusmiddel is. Dit is echter essentiële informatie, zonder welke niet veilig en effectief gebruikgemaakt kan worden van deze middelen. Ook moet bekend zijn in welke situaties deze blusmiddelen ingezet kunnen worden en welke beperkingen ze kennen.

In de meeste gevallen wordt de werking van deze middelen door fabrikanten onderbouwd middels praktijktesten. De vraag waar brandweerkorpsen (en het lectoraat Brandweerkunde) voor staan is: zijn de testresultaten te vertalen naar de praktijk? Daarnaast is soms niet geheel helder in welke gevallen en in welke mate deze middelen een bijdrage leveren aan de brandbestrijding, of in welke tactiek of werkmethode ze toepasbaar zijn. Inmiddels maken verschillende regio's echter al wel gebruik van deze middelen. Het lectoraat Brandweerkunde heeft dit rapport geschreven met als doel meer inzicht geven aan brandweerkorpsen in de werkingsprincipes, toepassingskaders en beperkingen van deze alternatieve blusmiddelen. Een belangrijk deel van de vragen over toepasbaarheid van (bijzondere) blusmiddelen komt immers voort uit een gebrek aan kennis over de werkingsprincipes van de blusmiddelen.

## Aanpak

Het onderzoek is ingestoken als literatuuronderzoek waarin getracht is een scala aan alternatieve blusmiddelen te beschouwen. Er is gekeken naar blusmiddelen waarvan nog niet of niet geheel duidelijk is wat hun werkingsprincipe is, en in welke incidentscenario's deze middelen mogelijk toepasbaar zijn. Hierbij is de focus gelegd op blusmiddelen die nog niet algemeen in gebruik zijn bij Nederlandse brandweerkorpsen, bijvoorbeeld omdat ze pas korte tijd op de markt zijn, of waarvan Nederlandse brandweerkorpsen overwegen ze aan te schaffen. Daarnaast zijn er, mede door de energietransitie, een aantal relatief nieuwe incidentscenario's ontstaan, waarbij de vraag is of een alternatief blusmiddel een toegevoegde waarde heeft.

Voorafgaand aan onderhavig onderzoek is in 2018 een verkennend marktonderzoek uitgevoerd. Op basis hiervan werd duidelijk dat de (alternatieve) blusmiddelen in te delen zijn in twee groepen: watergedragen additieven en aerosolgeneratoren. Deze indeling wordt ook in de voorliggende rapportage gebruikt.

## Doel

Het doel van dit onderzoek is het bundelen van kennis over werkingsprincipes van (alternatieve) blusmiddelen en over de toepasbaarheid van deze blusmiddelen in incidentscenario's. Uitgangspunt hierbij is dat er wordt gezocht naar onderbouwing vanuit natuurkundige en scheikundige principes om te kunnen duiden op welke wijze het blusmiddel een brand blust. Op basis van deze principes wordt aangegeven bij welke incidentscenario's een blusmiddel toepasbaar is. Met de resultaten van dit onderzoek worden brandweerkorpsen en brandweeropleidingen ondersteund met praktisch toepasbare kennis, een handelingsperspectief en kaders over (alternatieve) blusmiddelen.

## Hoofd- en deelvragen

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

*Wat zijn de werkingsprincipes van (alternatieve) blusmiddelen en wat is de toepasbaarheid van die blusmiddelen in de verschillende incidentscenario's?*

Op basis van deze centrale hoofdvraag is een aantal deelvragen geformuleerd:

1. Welke soorten alternatieve blusmiddelen bestaan er?
2. Welke relevante kennis, kaders en handelingsperspectieven zijn er in de literatuur te vinden over alternatieve blusmiddelen?
3. Wat is de fysische en chemische werking van deze blusmiddelen?
4. Wat is de werking van de blusmiddelen binnen zowel standaard als specifieke incidentscenario's?

## Afbakening

Het onderzoek is uitgevoerd in de periode oktober 2018 tot januari 2020. Het is slechts verkennend; er wordt geen uitputtend onderzoek naar alle aspecten van elk afzonderlijk blusmiddel gedaan. Ook is uitsluitend gebruikgemaakt van Nederlands- of Engelstalige literatuur, te vinden in bekende vakliteratuur, artikelen en rapporten. De blusmiddelen die worden meegenomen in het onderzoek zijn te koop, in productie of zullen naar verwachting binnen twee jaar na verschijnen van het rapport verkrijgbaar zijn op de markt. In dit rapport zal worden aangegeven in hoeverre de blusmiddelen ingezet kunnen worden bij een aantal reguliere en specifieke incidentscenario's. Denk hierbij aan woningbranden of voertuigbranden (regulier) en moderne brandstoffen zoals accupakketten en natuurbranden (specifiek).

## Leeswijzer

Hoofdstuk 1 beschrijft de onderzoeksmethode. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de verschillende manieren waarop een brand kan worden bestreden. In hoofdstuk 3 komen de gevonden alternatieve blusmiddelen aan bod en wordt beschreven wat er is gevonden over hun



fysische en chemische werking. In hoofdstuk 4 geven we antwoord op de hoofd- en deelvragen. Bijlage 1 bevat een lijst met in 2020 verkrijgbare alternatieve blusmiddelen en hun indeling naar bluswerking.

# 1 Onderzoeksmethode

Dit onderzoek heeft tot doel om inzicht te geven in de bestaande kennis, kaders en handelingsperspectieven met betrekking tot moderne blusmiddelen in één van de twee groepen. Hiervoor is gezocht naar informatie over de samenstellingen, werkingen, toepassingen, handelingsperspectieven en/of neveneffecten van alternatieve blusmiddelen. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe dit verkennende onderzoek is uitgevoerd.

## 1.1 Uitvoering van het onderzoek

Er is hoofdzakelijk digitaal gezocht naar nationaal en internationaal gepubliceerde artikelen, onderzoeksrapporten, testverslagen en publicaties door overheden, wetenschappelijke tijdschriften en onafhankelijke instituten, maar ook publicaties opgesteld in opdracht van of door fabrikanten zelf. Hierbij is gebruikgemaakt van de sneeuwbalmethode, waarbij genoemde referenties verder onderzocht zijn op relevantie informatie.

Er is gezocht via Google, en dan voornamelijk via Google Scholar, met zoektermen die betrekking hebben op de werking van blusmiddelen, hun (geclaimde) eigenschappen, bestanddelen en/of effecten, alsmede fabrikanten, productnamen en/of scenario's. Verder zijn er gesprekken gevoerd met een aantal fabrikanten en is informatie verkregen bij (inter)nationale congressen. Daarnaast is de huidige les- en leerstof van de voormalige Brandweeracademie van het IFV (het huidige NIPV) met betrekking tot de blussende werking van verschillende typen blusmiddelen geraadpleegd. Verder is gebruikgemaakt van de kennis en expertise van de onderzoekers zelf.

## 1.2 Geraadpleegde bronnen

Er is gebruikgemaakt van informatie uit de volgende bronnen, in volgorde van belangrijkheid:

1. publicaties en artikelen in wetenschappelijke (peer-reviewed) tijdschriften en (internationale) kennisinstituten
2. factsheets (SDS) en/of certificeringen van de specifieke producten
3. incidentrapportages, casussen en mediaverslagen
4. productinformatie van fabrikanten en informatie van de veiligheidsregio's.

## 1.3 Vastgestelde scenario's

Op basis van expert judgement zijn door de onderzoekers een aantal scenario's opgesteld waartegen de geselecteerde blusmiddelen worden afgezet. De scenario's zijn weergegeven in Tabel 1.1. Op basis van de informatie die uit het literatuuronderzoek naar voren komt,

wordt in hoofdstuk 3 een uitspraak gedaan over de effectiviteit van het blusmiddel per scenario.

**Tabel 1.1 Overzicht van de vastgestelde scenario's**

Scenario	Toelichting
Blussing oppervlaktebrand	Het actief uitmaken van een oppervlaktebrand (meest voorkomende branden)
Blussing kernbrand	Het actief uitmaken van een brand die diep in materialen gezeteld is (b.v. in biomassa, schroot of bij een silo-brand)
Beperken pyrolyse nog niet brandend materiaal	Het voorkomen dat andere materialen gaan mee branden
Rookgaskoeling	Het koelen van hete rookgassen om zelfontbranding ervan te voorkomen
Voorkomen brandoverslag	Het voorkomen dat een brand overslaat naar andere objecten / percelen
Vloeistofbrand	Brand waarbij brandbare vloeistoffen zijn betrokken (b.v. plas- of spillbrand van koolwaterstoffen)
Elektriciteitsbrand	Brand waarbij elektrische installaties zijn betrokken (transformator, onderstation, PV-installatie)
Brandend accupakket	Brand in een accupakket dat in 'thermal runaway' raakt

## 2 Blusprincipes

We gebruiken de branddriehoek om de blusprincipes van een blusmiddel te bepalen. Om de toepasbaarheid van een bepaald alternatief blusmiddel te kunnen bepalen is het van belang te weten wat de bluswerking en het blusprincipe ervan zijn. Met het blusprincipe wordt bedoeld op de zijde van de branddriehoek waarop het blusmiddel effect heeft en met de (blus)werking wordt bedoeld op de fysische of chemische eigenschap die dat blusprincipe veroorzaakt (zie tabel 2.1).

### 2.1 Brand en branddriehoek

Voor het ontstaan van een verbrandingsreactie zijn drie factoren nodig: voldoende warmte of activeringsenergie, zuurstof en brandstof (Jones, 1985; The Fire Service College, 2001). Deze worden vaak weergegeven als een branddriehoek (Figuur 2.1). Het beïnvloeden van een verbrandingsreactie kan worden bereikt door één of meerdere zijden van de branddriehoek weg te nemen of te beïnvloeden. Door deze beïnvloeding wordt de verhouding tussen zuurstof en het brandbaar mengsel verstoord en/of stopt de reactie. Of een brand geblust wordt, hangt af van de effectiviteit van het blusmiddel. Sommige blusmiddelen blussen de brand niet, maar vertragen de snelheid van de verbranding.

In de literatuur wordt ook wel eens gesproken over een brandvijfhoek. Deze is feite een (overbodige) verbijzondering van de driehoek. Toegevoegd zijn dan de negatieve katalysator en de mengverhouding. De term negatieve katalysator is een niet-bestaande term, en in feite bestaat een negatieve katalysator ook niet. Wat hier bedoeld wordt is dat een blusmiddel (vaak bluspoeder) in staat is om radicalen van de verbrandingsreactie in te vangen, en daarmee dus brandstof weg neemt. Een katalysator is namelijk een stof die niet meedoet, maar de activeringsenergie van een reactie verlaagt. Met mengverhouding wordt bedoeld op de mate waarin de brandstof en de zuurstof met elkaar in contact komen. Hiermee wordt bedoeld op het feit dat de zuurstof en de brandstof met elkaar moeten kunnen reageren; daarom is het een overbodige toevoeging.

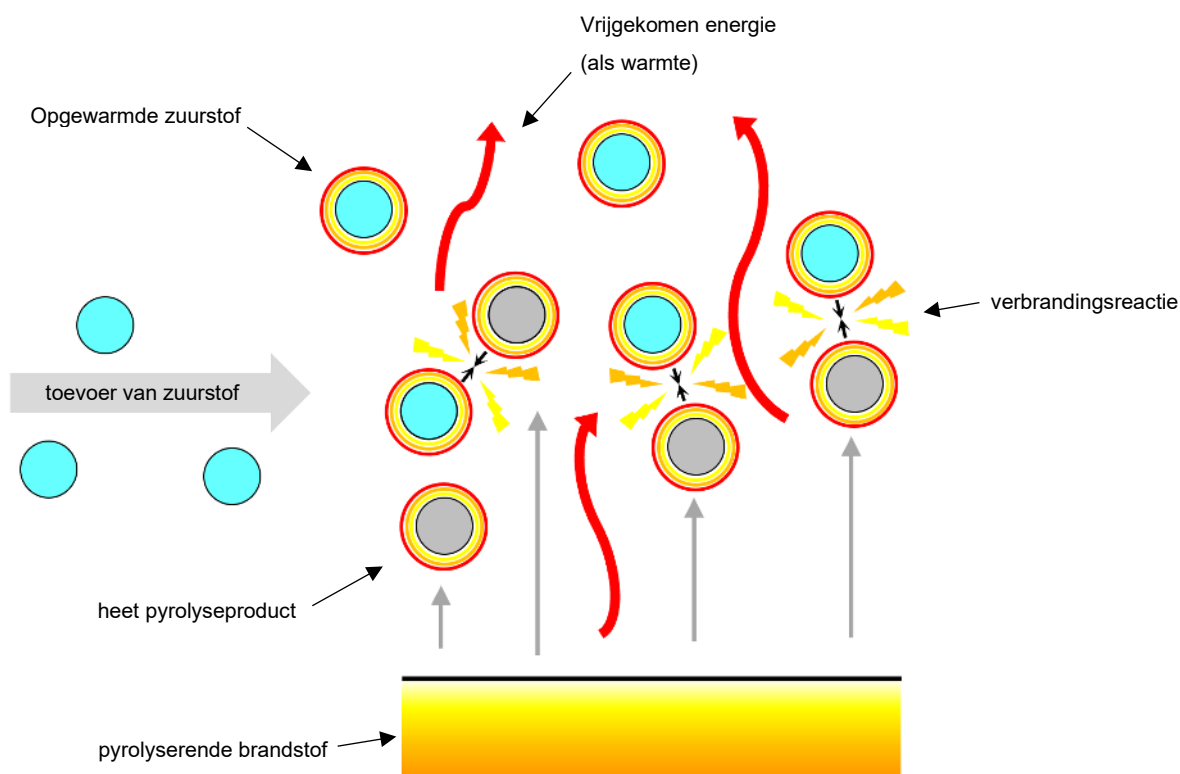


**Figuur 2.1 De branddriehoek**

Voor verreweg de meeste brandstoffen geldt dat ze in de gasfase moeten zijn om te kunnen mengen met zuurstof, waardoor een brand kan ontstaan. Voor vaste stoffen betekent dit dat ze eerst moeten uitgassen (sublimeren) of smelten en daarna verdampen voordat de brandstof beschikbaar is in de gasfase. Voor vloeistoffen geldt dat deze voldoende damp af moeten geven om de verbrandingsreactie in stand te houden. Dit betekent in de meeste

gevallen dat de brandstof opgewarmd moet zijn voor er brandbare gassen ontstaan. Het opwarmen van een materiaal waarbij verschillende soorten brandbare stoffen ontstaan, staat bekend als pyrolyse. Afhankelijk van de activeringsenergie van de verbrandingsreactie van de pyrolyseproducten kunnen deze makkelijk of moeilijk ontbranden.

Omdat een verbrandingsreactie een exotherme reactie is, is er in principe ook voldoende energie beschikbaar om de volgende verbranding te activeren; zo ontstaat een kettingreactie. De brand wordt daarmee zelfonderhoudend. De warmte (energie) die ontstaat, kan afgegeven worden aan de brandstof door bijvoorbeeld de straling van de vlammen, maar ook door straling van hete rook boven de brand. Hoe meer warmte de brand afgeeft aan het brandbare materiaal, des te meer gassen er uitdampen uit het materiaal. Een brand kan zichzelf op die manier in omvang laten toenemen. De reactiesnelheid neemt ook toe naarmate de temperatuur stijgt (Hoff, van 't J.H., Cohen, E., Ewan, 1896). Voorwaarde is dat er voldoende zuurstof aangevoerd wordt, zodat de concentratie hoog genoeg blijft om de mengverhouding in stand te houden. In Figuur 2.2 is een schematische weergave van een verbrandingsreactie weergegeven.



**Figuur 2.2 Schematische weergave verbrandingsreactie**

**Tabel 2.1 Blusprincipes per zijde van branddriehoek**

Zijde branddriehoek	Blussende werking	Aanduiding
<b>Zuurstof</b>	Verdringen van zuurstof	Z1
	Afsluiten van zuurstoftoevoer	Z2
<b>Brandstof</b>	Verdringen van brandstof	B1
	Afsluiten van brandstoftoevoer	B2
	Binden van pyrolysegassen en/of radicalen	B3
	Koelen van de pyrolyserende brandstof	B4
<b>Temperatuur</b>	Verdringen van hete gassen	T1
	Warmte-energie opnemen via faseovergang	T2
	Warmte-energie opnemen via warmtecapaciteit	T3
	Warmte-energie opnemen via endotherme reactie	T4

Een verbrandingsreactie bestaat uit verschillende deelreacties. Een verbrandingsreactie kan zich (bij bepaalde omstandigheden) in stand houden zonder invloeden van buitenaf. Dit komt, doordat er relatief veel energie bij de deelreacties vrijkomt die kan worden gebruikt om de deelreacties voort te zetten. In deze deelreacties ontstaan radicalen, zeer instabiele chemische verbindingen, die makkelijk met andere stoffen reageren. Een voorbeeld van de manier waarop deelreacties met radicalen in een vlam kan verlopen wordt gegeven in de volgende vergelijking (Vergelijking 2.1; W. E. Wilson et al., 1963):

1.  $\bullet OH + H_2 \rightarrow H_2O + \bullet H$
2.  $\bullet H + O_2 \rightarrow \bullet OH + \bullet O$
3.  $\bullet O + H_2 \rightarrow \bullet OH + \bullet H$
4.  $\bullet H + \bullet H + M \rightarrow H_2 + M$

### Vergelijking 2.1 Basis deelreacties verbranding

In vergelijking 1 tot en met 3 worden radicalen geproduceerd (aangegeven met een  $\bullet$ ) en in reactie 4 worden ze verbruikt. De zelfkatalyse vindt plaats bij reacties 2 en 3, waarbij één radicaal twee nieuwe radicalen kan vormen. De reactiesnelheden van 2 en 3 zijn ook veel hoger dan die van 4. In werkelijkheid is de totale verbrandingsreactie nog complexer en vinden er veel meer deelreacties plaats. Zo zijn er bij de verbranding van methaan ruim 30 deelreacties betrokken (Zeng et al., 2020). Verschillende stoffen hebben een verschillende mate van reactiviteit met vrije atomen en radicalen in de deelreacties. Smeulbranden zijn deelreacties met een trage reactiesnelheid. Een bijzonderheid bij een smeulbrand is dat deze nog bij erg lage zuurstofconcentraties kan plaatsvinden en dat de reactie tussen zuurstof en brandstof direct aan het oppervlak van de vaste brandstof plaatsvindt (SFPE, 2016, Chapter 19).

Iedere stof heeft twee temperatuurgrenzen die van invloed zijn op het ontstaan van brand en die tevens van belang zijn bij de principes die gebruikt worden bij het blussen van een brand:

- > *Ontbrandingstemperatuur*. Dit is de laagste temperatuur waarbij een brandbare stof voldoende damp afgeeft om te ontsteken als er voldoende zuurstof aanwezig is en er een ontstekingsbron bij de damp wordt gehouden. Bij vloeistoffen wordt dit het vlampunt genoemd. Voor sommige vloeistoffen ligt deze temperatuur onder kamertemperatuur en ontstaat er dus bij kamertemperatuur al een brandbare damp.
- > *Zelfontbrandingstemperatuur*. Dit is de laagste temperatuur waarbij de brandstof geen ontstekingsbron meer nodig heeft om tot ontbranding te komen.

Deze temperatuurgrenzen worden beïnvloed door de omstandigheden waarin de brand plaatsvindt. De omgevingsdruk of de gassenstelling van de lucht kunnen van invloed zijn op de (zelf)ontbrandingstemperatuur van een stof.

### **2.1.1 Invloed van de brandstof- en zuurstofzijde van de branddriehoek**

Over het algemeen beïnvloeden blusmiddelen meer dan één zijde van de branddriehoek. Ze hebben als het ware meerdere blussende principes. Op het moment dat water op een brandend oppervlak wordt opgebracht, zal er niet alleen koeling van het brandende object optreden waardoor dit niet of minder pyrolyseert. Ook zal er namelijk water verdampen, waardoor er energie aan de verbrandingsreactie wordt onttrokken, verdunning van de pyrolysegassen plaatsvindt en zuurstof verdrongen wordt. Deze blusactie heeft dus effect op alle drie de zijden van de branddriehoek.

Een aantal blussende principes houdt sterk met elkaar verband en het pure onderscheid tussen die principes is daarom lastig te maken. Met name het verlagen van de zuurstofconcentratie, het verlagen van de brandstofconcentratie en het toevoegen van thermische ballast<sup>2</sup> zijn bijna niet te onderscheiden. Belangrijk is dat meerdere principes bijdragen aan het blussen van een brand; vaak is het wel mogelijk om aan te geven wat het primaire blussende principe is en wat secundaire (bij)effecten zijn die bijdragen aan het blussen van een brand. In de meeste gevallen is er sprake van een gelijktijdig effect op zowel de brandstof- als de zuurstofconcentratie. Invloed uitoefenen op de brandstof- en/of zuurstofconcentratie en daarmee ook de mengverhouding, wordt vaak inertiseren genoemd. Een brandbaar mengsel van gassen dat enkel een bepaalde temperatuur hoeft te bereiken om te ontbranden zal bij verstoring van de brandstof- en/of zuurstofconcentraties niet meer ontbranden, ook niet meer als de benodigde temperatuur bereikt wordt. Het mengsel is daarmee geïnertiseerd.

Van een aantal brandbare stoffen zijn de concentraties bekend waarbij het mengsel niet meer kan ontbranden. Dit zijn de onderste explosiegrenzen of Lower Flammability Limits (LFL) en bovenste explosiegrenzen of Upper Explosive Limits (UEL). Ligt de brandstofconcentratie onder de LEL, dan is er te weinig brandstof en is het mengsel te arm. Ligt de brandstofconcentratie boven de UEL, dan is er te veel brandstof en is het mengsel te rijk. Wanneer de zuurstofconcentratie te laag is, kan een brandbaar mengsel niet meer

---

<sup>2</sup> Deeltjes die niet aan de reactie deelnemen (bijvoorbeeld inerte gassen zoals stikstof), worden aangeduid als thermische ballast. Deze deeltjes worden opgewarmd door de vrijkomende energie van een reactie; dit opwarmen kost energie die dan niet meer gebruikt kan worden in andere reacties. Hoe hoger de thermische ballast, hoe meer energie er van de (ketting)reactie wordt weggenomen. Een blusinstallatie met stikstof blust bijvoorbeeld een brand door thermische ballast toe te voegen (maar verdringt ook de zuurstof).

ontbranden, ongeacht de concentratie brandstof. Dit is de limiterende zuurstofconcentratie ofwel de Limiting Oxygen Concentration (LOC).

### 2.1.2 De invloed van de energiezijde van de branddriehoek

Naast de invloed van concentratie is het ook van belang de rol van energiebalansen te bekijken. Wanneer een verbrandingsreactie (met blusactie) als energiebalans in een formule wordt weergegeven, dan ziet dat er als volgt uit (vergelijking 2.2). Dit geldt voor een vaste stof als brandstof en water als blusstof (Särdqvist & Svensson, 2001):

$$L_v \dot{m}'' + \dot{q}_l'' + \dot{q}_w'' = f \Delta H_c \dot{m}'' + \dot{q}_e''$$

$L_v$  = verdampingswarmte [J/kg]

(hoeveel energie kost het om de gassen uit het object te laten pyrolyseren)

$\dot{q}_l''$  = warmteverliezen aan het brandende oppervlak [ $W/m^2$ ]

(aan het brandende oppervlak zijn bijvoorbeeld wat convectieve warmteverliezen)

$\dot{q}_w''$  = warmteverliezen door het water [ $W/m^2$ ]

$f$  = deel van het brandvermogen dat terug straalt naar het brandende oppervlak [-]

(bijvoorbeeld circa 30% van het brandvermogen kan vrijkomen als stralingswarmte en 70% als convectieve warmte)

$\Delta H_c$  = verbrandingswarmte [J/kg]

$\dot{m}''$  = verbrandingssnelheid [kg/s]

$\dot{q}_e''$  = energie door externe straling [ $W/m^2$ ]

(door bijvoorbeeld een hete rooklaag of warme muren kan het brandende object opgewarmd worden door straling)

### Vergelijking 2.2 Energiebalans verbranding en blussing

In een tweetal figuren op de volgende pagina lichten we de verbrandingsreactie als energie-uitwisseling op micro- en macroniveau toe. Op microniveau kijken we naar de energie afgiftes en -opnames die bij een verbranding van een stof voorkomen. De brandstof is in dit voorbeeld de bekleding en vulling van een brandende bank. Op macroniveau kijken we naar een brandende bank in een ruimte, met daarbij de invloed van de beslotenheid van een brandend object op de energieafgifte en -opname.

#### Microniveau: energieafgifte en -opname bij een verbranding (figuur 2.3)

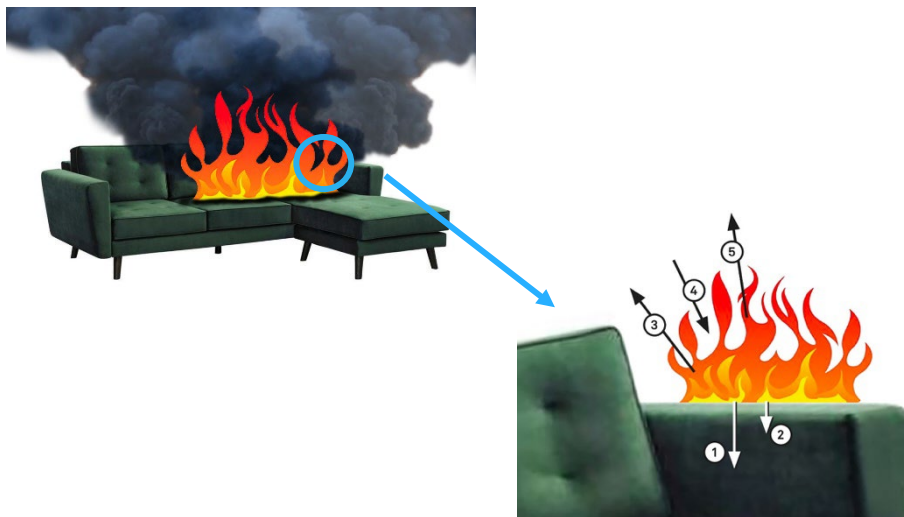
Of de bank op microniveau gaat branden wordt bepaald door de hoeveelheid energie die nodig is om de brandbare stoffen uit de bank te laten pyrolyseren en te ontsteken. De grenswaarde hiervoor is de verdampingswarmte: de hoeveelheid energie die nodig is om een stof om te zetten van de vaste of vloeibare fase naar de gasfase (5). Bij voldoende brandbare pyrolysegassen en een ontstekingsbron ontstaan vlammen. Deze vlammen warmen het brandende object verder op (1). Daarnaast raakt de verbrandingsreactie wat energie kwijt door geleiding (conductie) aan het oppervlak (2). Er wordt potentieel nog extra energie toegevoegd vanuit de warme rooklaag of opgewarmde wanden, waardoor het brandende oppervlakte verder wordt opgewarmd (4). Wanneer er meer energie wordt opgenomen door het brandbare object dan dat er wordt afgestaan, blijft de verbrandingsreactie zichzelf in stand houden (totdat een deel van de branddriehoek wordt onderbroken). De ontstane energie kan potentieel worden opgenomen door een blusmiddel (3).

#### Macroniveau: energieafgifte en -opname in een besloten ruimte<sup>3</sup> (figuur 2.4)

<sup>3</sup> De invloed van het gebouw is niet meegenomen.

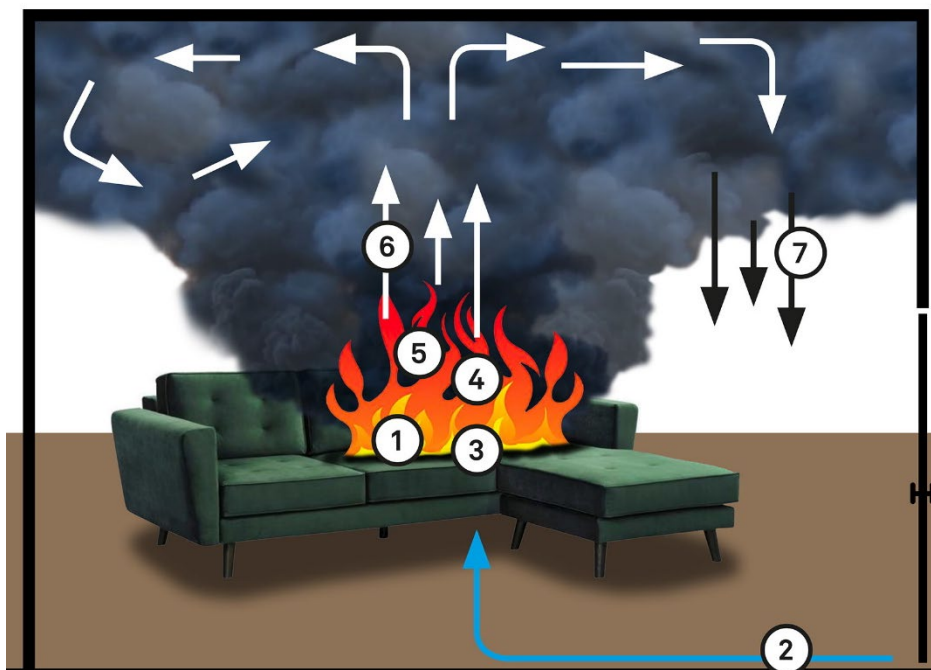


Door de brand op micro niveau (1, 2, 3) ontstaan vlammen (4) en geeft de verbrandingsreactie op diverse wijzen energie af. De stralingsenergie van de vlammen warmen het brandbare object en de directe omgeving van de vlammen verder op (5). Daarnaast wordt er convectie energie afgegeven aan de rooklaag (6). Het opwarmen van de rooklaag zorgt voor het afgeven van stralingsenergie door de rooklaag (7). Daarnaast warmen oppervlaktes die in contact staan met de rooklaag ook verder op. Wanneer de rooklaag warm genoeg is, kan dit ervoor zorgen dat ook brandbare objecten in de ruimte die niet direct in de buurt van de vlammen zijn toch gaan opwarmen, pyrolyseren en uiteindelijk branden.



1. Energieafgifte door stralingsenergie van vlammen aan het object.
2. Energieafgifte aan het object (op basis van geleiding / conductie).
3. Energieopname door het blusmiddel.
4. Externe stralingsenergie (bijvoorbeeld hete rooklaag of wanden).
5. Latente verdampingsenergie.

**Figuur 2.3 Energieafgifte en -opname bij een verbranding**

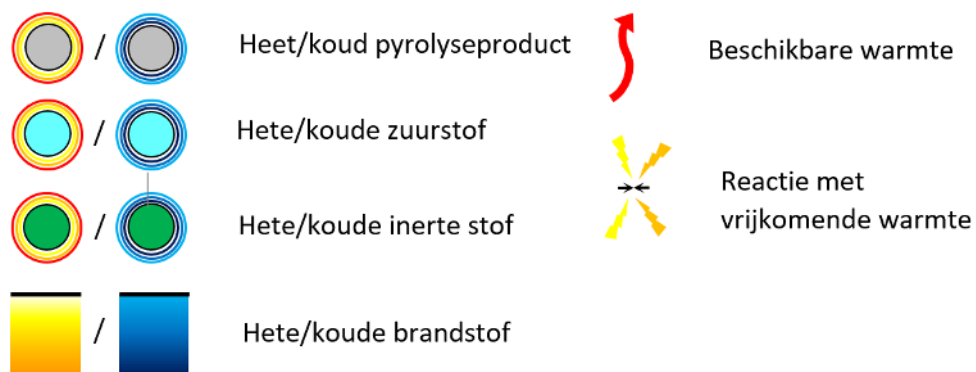


1. Pyrolyse van gassen uit een brandbaar object door opwarming van dit object. Gasvormige moleculen vallen uiteen in vrije radicalen.
2. Zuurstof stroomt in, radicalen mengen met zuurstof.
3. Radicalen en zuurstof gaan een reactie met elkaar aan bij voldoende ontstekingsenergie.
4. Door de verbrandingsreactie ontstaan vlammen.
5. Vlammen geven stralingsenergie af aan het brandbare object.
6. De brand geeft door middel van convectie energie af aan de rooklaag.
7. De hete rooklaag geeft stralingsenergie af aan het brandbare object.

**Figuur 2.4 Energieafgifte en -opname in een besloten ruimte**

## 2.2 Blussende principes per zijde van de branddriehoek

Deze blussende principes worden uitgelegd aan de hand van schematische verbrandingsreacties zoals eerder weergegeven in Figuur 2.2. Voor de beschouwing van de blussende principes wordt gebruikgemaakt van tekeningen met de onderstaande legenda (Figuur 2.5).



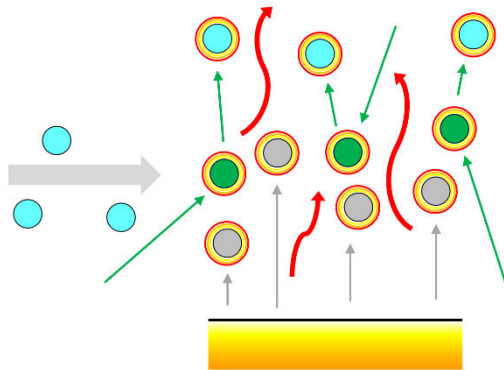
**Figuur 2.5 Legenda blussende principes**

### 2.2.1 De zuurstofzijde

Blusacties die de zuurstof-zijde beïnvloeden, hebben als doel het wegnemen van de zuurstof zodat deze niet meer beschikbaar is voor de verbrandingsreactie. Dit kan op de manieren die hieronder beschreven staan.

### Z1: Verdringen van zuurstof

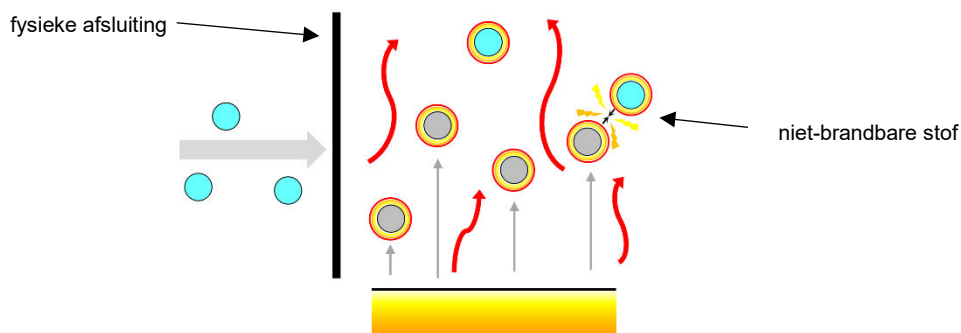
Het verdringen van zuurstof door andere, niet-brandbare (inerte) gassen. Hierdoor wordt de concentratie zuurstof te laag om de verbrandingsreactie in stand te houden. Dit wordt ook wel verdunnen en/of inertiseren genoemd. Let op: verdunnen of inertiseren kan zowel de zuurstof- als de brandstofzijde beïnvloeden. Zie figuur 2.6 hieronder.



**Figuur 2.6 Verdringen van zuurstof**

### Z2: Afsluiten van de zuurstoftoevoer

Het voorkomen dat de zuurstof kan mengen met de brandstof door een fysieke barrière. De verbrandingsreactie loopt door totdat de nog aanwezige zuurstof binnen de fysieke barrière is verbruikt. Deze tijd kan worden verlengd doordat eventuele chemisch gebonden zuurstof in de brandstof blijft vrijkomen. Hierdoor kan potentieel een smeulbrand ontstaan. Zie figuur 2.7 hieronder.



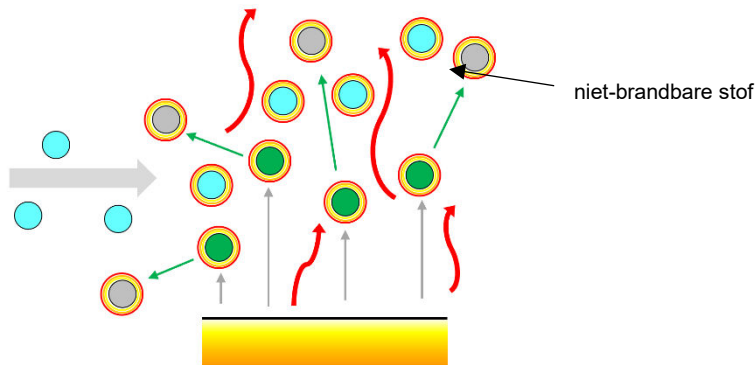
**Figuur 2.7 Schematische weergave van het afsluiten van zuurstof**

### 2.2.2 De brandstofzijde

Blusacties die de brandstofzijde beïnvloeden, hebben als doel het wegnemen van de pyrolyseproducten en/of vrije radicalen die bij brand vrijkomen, zodat deze niet meer beschikbaar zijn voor de verbrandingsreactie. Het wegnemen van de brandstof kan op de hieronder beschreven manieren.

### B1: Verdringen van brandstof

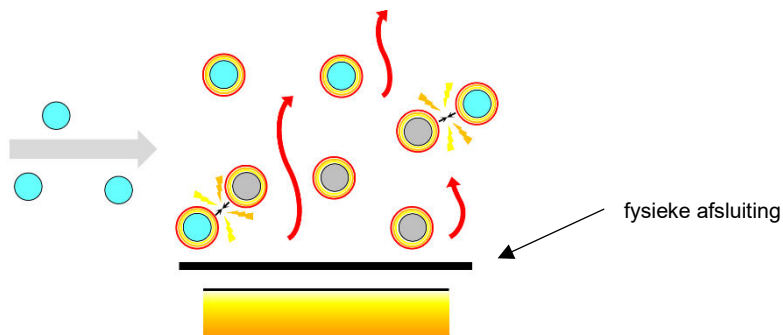
Het verdringen van de pyrolyseproducten en/of radicalen door andere, niet-brandbare (inerte) gassen, zodat de concentratie brandstof te laag wordt om de reactie in stand te houden. Dit wordt ook wel verdunnen en/of inertiseren genoemd. Let op: verdunnen of inertiseren kan zowel de zuurstof- als de brandstofzijde beïnvloeden. Zie figuur 2.8 hieronder.



**Figuur 2.8 Schematische weergaven van het verdringen van brandstof**

### **B2: Afsluiten van de brandstoftoevoer**

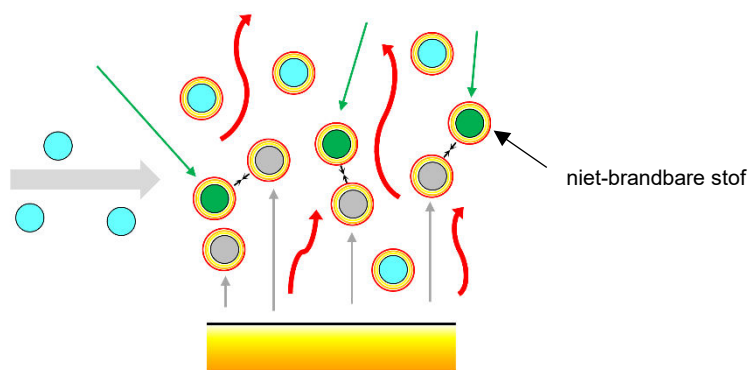
Het vrijkomen van pyrolyseproducten en/of radicalen beperken of stoppen door de brandstofvoorraad af te sluiten met een fysieke barrière. De verbrandingsreactie loopt door tot de nog aanwezige brandstof is verbruikt. Zie figuur 2.9 hieronder.



**Figuur 2.9 Schematische weergave van het afsluiten van brandstof**

### B3: Binden van pyrolysegassen en/of radicalen

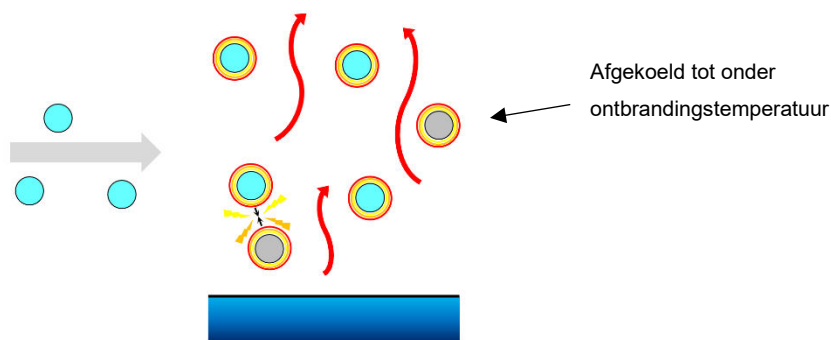
Het binden van de pyrolyseproducten en/of radicalen met andere stoffen zodat deze niet meer met zuurstof kunnen reageren. Zie figuur 2.10 hieronder.



Figuur 2.10 Schematische weergaven van het binden van brandstof

### B4: Koelen van de pyrolyserende brandstof

Het verlagen van de temperatuur van de brandstof, zodat de pyrolyseproducten en/of radicalen niet meer vrijkomen. De brandstof moet dan afkoelen tot onder de ontbrandings-temperatuur. De verbrandingsreactie loopt door tot de nog aanwezige brandstof is verbruikt. Zie figuur 2.11 hieronder.



Figuur 2.11 Schematische weergaven van het stoppen van pyrolyse

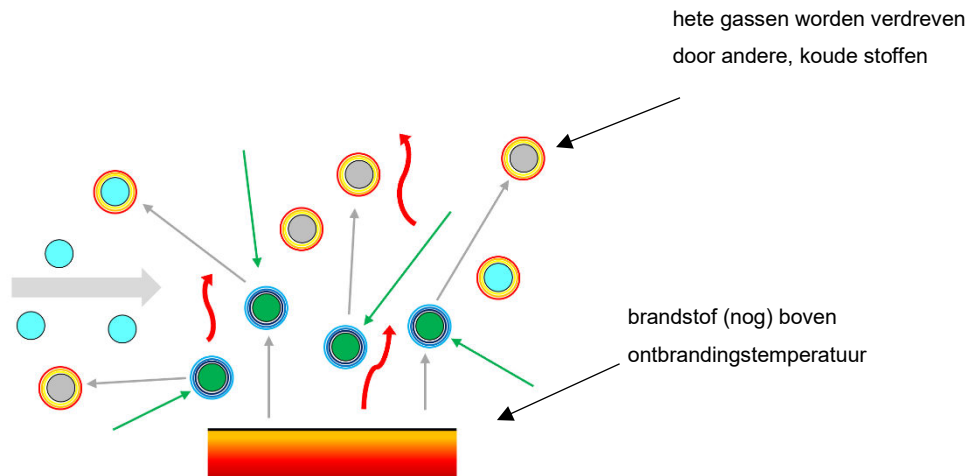
## 2.2.3 De temperatuurzijde

Blusacties die de temperatuurzijde beïnvloeden, hebben als doel het wegnemen van de vrijkomende energie uit de brandreactie, waardoor de energiebalans negatief wordt. Als de warmteafvoer groter wordt dan de vrijkomende energie, zal er ook warmte onttrokken worden aan de brandstof zelf, waardoor deze afkoelt er uiteindelijk geen pyrolyseproducten meer kunnen vrijkomen. De vrijkomende energie wordt bepaald door het brandvermogen, dat zelf weer afhankelijk is van de beschikbare zuurstof, brandstof en de mengverhouding. Het verlagen van het brandvermogen en het beïnvloeden van de mengverhouding vallen onder de blussende werkingen aan de zuurstof- en brandstofzijde. Voor de blussende werkingen met betrekking tot de temperatuurzijde wordt hier alleen vrijkomende warmte ten gevolge van de exotherme brandreactie bekeken. Het vrijkomen van warmte kan beïnvloed worden op de manieren die hieronder staan beschreven.

### T1: Verdringen van hete gassen

Het verdringen van warmte door de hete gassen te verspreiden (ook wel gedwongen convectie genoemd). De concentratie hete (brandbare) gassen wordt verlaagd door het

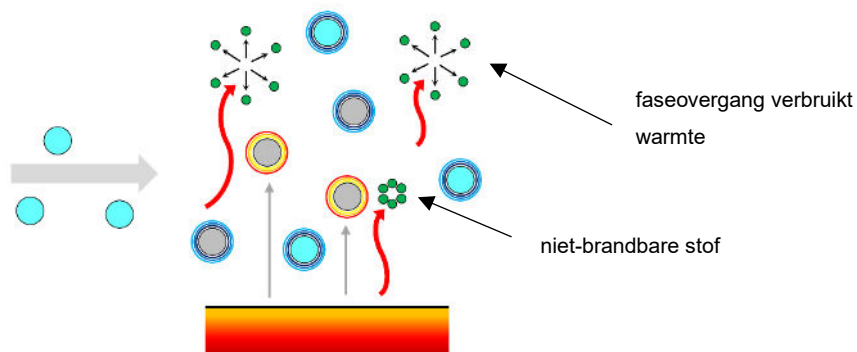
geforceerd toevoegen van andere, koude stoffen. Hierdoor neemt de temperatuur af. Zie figuur 2.12 hieronder.



**Figuur 2.12 Schematische weergave van het verdringen van warmte**

**T2: Warmte-energie opnemen via een faseovergang**

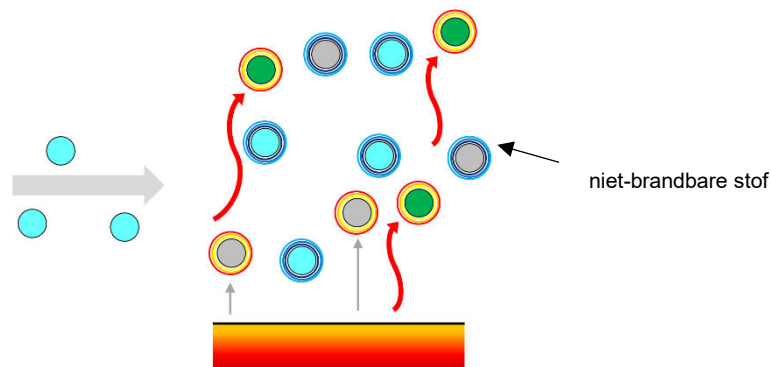
De aanwezige warmte-energie wordt opgenomen door een faseovergang. Een overgang van bijvoorbeeld vloeibaar water naar stoom vraagt een grote hoeveelheid energie. Door het onttrekken van deze energie aan de verbrandingsreactie neemt de temperatuur af. Zie figuur 2.13 hieronder.



**Figuur 2.13 Schematische weergave van warmteopname middels een faseovergang**

**T3: Warmte-energie opnemen door toevoegen van thermische ballast**

De aanwezige warmte-energie wordt opgenomen door het toevoegen van thermische ballast in de vorm van andere (niet brandbare) stoffen. Door de warmtecapaciteit van deze stoffen

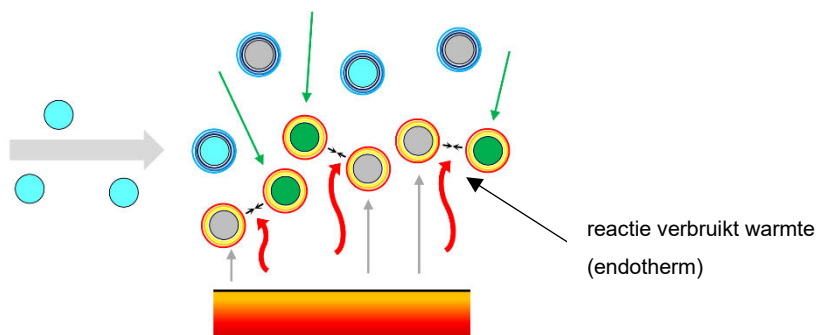


wordt energie onttrokken aan de verbrandingsreactie. Voorbeelden hiervan zijn water, maar ook gels, mineralen en (inerte) gassen. Zie figuur 2.14 hieronder.

**Figuur 2.14 Schematische weergave van warmteopname middels thermische ballast**

#### **T4: Warmte-energie opnemen via een endotherme reactie**

Een endotherme reactie is een reactie waarbij energie nodig is om de reactie te laten verlopen. Door het toevoegen van een stof die endotherm reageert, kan warmte-energie uit de verbrandingsreactie worden opgenomen. Zie figuur 2.15 hieronder.



**Figuur 2.15 Schematische weergave van warmteopname middels endotherme reactie**

## 2.3 Brandklassen van blusmiddelen

Aan blusmiddelen wordt vaak een brandklasse toegekend, voornamelijk aan kleine blusmiddelen. Deze blusmiddelen zijn voorzien van symbolen die aangeven voor welke branden met bepaalde brandstof(fen) het blusmiddel geschikt is (Figuur 2.16).

**Figuur 2.16 Brandklassen zoals aangegeven op veel (kleine) blusmiddelen<sup>4</sup>**



In Europa wordt de volgende indeling in brandklassen aangehouden (BS EN 2, 1992; KIWA, 2010):

- > Brandklasse A: Vaste stoffen zoals hout, rubber, plastics, textiel, et cetera
- > Brandklasse B: Vloeistoffen zoals benzine, diesel en oplosmiddelen
- > Brandklasse C: Gassen, zoals in gasleidingen en campingbranders
- > Brandklasse D: Metalen, zoals magnesium en kalium
- > Brandklasse E: Elektrische branden, zoals in een meterkast of transformator<sup>5</sup>
- > Brandklasse F: Vetbranden, zoals frituurvet en bakoliën.<sup>6</sup>

De brandklasse E wordt officieel niet gebruikt (zie noot 3). Een bepaalde brandklasse kent geen vaste blussende principes.,.

<sup>4</sup> <https://www.asphalia.nl/branddriehoek-blussen-of-branden-door-dit-principe/>.

<sup>5</sup> Klasse E is geen officiële brandklasse, omdat bij een elektriciteitsbrand de brandstof altijd één of meerdere van de andere klassen is. Als de elektriciteit uitgeschakeld wordt, kunnen blusmiddelen van de andere klassen gebruikt worden. Als de elektriciteit niet uitgeschakeld is of kan worden, wordt de brand als een aparte klasse beschouwd vanwege het elektrocutiegevaar door geleidbaarheid van met name waterige (kleine) blusmiddelen.

<sup>6</sup> De klasse F is technisch gezien een subklasse van B, maar wordt vanwege het hogere vlampunt (>350 °C) als aparte klasse gezien.



# 3 (Blus)werking van blusmiddelen

Of een brand geblust wordt, is sterk afhankelijk van onder andere het type brandstof en het type blusmiddel, van omgevingsfactoren, de grootte en locatie van de brand en gemaakte keuzes op basis van praktische overwegingen. De bluswerking(en) van een blusmiddel is (zijn) afhankelijk van de fysische en chemische eigenschappen van het middel. Een blusmiddel werkt over het algemeen op meerdere manieren, maar vaak is één principe dominant. Ook is het mogelijk dat een bepaalde bluswerking gedurende de blusactie overgaat in één of meerdere andere werkingen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillende soorten blusmiddelen die te onderscheiden zijn.

## 3.1 Hoofdgroepen blusmiddelen

Alternatieve blusmiddelen zijn grofweg in te delen in twee hoofdgroepen. Deze groepen onderscheiden zich door hun fysische en chemische eigenschappen en hierdoor hun (primaire) blussende werking. De twee groepen staan hieronder kort beschreven.

### 1. Watergedragen additieven (WA)

Dit zijn stoffen (vaak poeders of vloeistoffen) die worden toegevoegd aan water om de blussende werking van water te verbeteren.

### 2. Aerosolen (AG)

Dit zijn blusmiddelen die vaak in de vorm van aerosolgeneratoren worden geleverd. Deze generatoren verspreiden met behulp van druk in zeer korte tijd een hoeveelheid vaste (of vloeibare) deeltjes in de lucht, in de meeste gevallen een soort bluspoeder. Het poeder reageert met de brandstof (vangt radicalen in). Het poeder zorgt tevens voor verdringing van zuurstof, brandstof en warmte. Door het afgaan van een aerosol-generator kan (zeer) lokaal de temperatuur toenemen totdat de generator leeg is.

Op basis van fysische en chemische eigenschappen zijn binnen de twee groepen vijf verschillende type blusmiddelen te onderscheiden:

<b>Aerosolgeneratoren:</b>	Aerosolen
<b>Watergedragen additieven:</b>	Gelvormende middelen Mineraalblusmiddelen Zeepvormende middelen Surfactanten

In Tabel 3.1 hieronder is per type blusmiddel de primaire blussende werking aangegeven met een '1' en secundaire werkingen met een '2'. In de volgende paragrafen worden de verschillende typen blusmiddelen beschreven op basis van de fysische en chemische werking. Hiermee wordt het ook mogelijk om per type blusmiddel aan te geven of en in welke mate het middel toepasbaar is bij een bepaalde inzettechniek.

**Tabel 3.1 De primaire (1) en secundaire (2) blussende werking van de verschillende typen blusmiddelen**

Blussende werking	Aerosolen	Gelvormend	Mineraliserend	Zeevormend	Surfactanten
<b>Z1:</b> Verdringen van zuurstof	2				
<b>Z2:</b> Afsluiten van zuurstoftoevoer		1	1	2	
<b>B1:</b> Verdringen van brandstof	2				
<b>B2:</b> Afsluiten van brandstoftoevoer		1	1	1	
<b>B3:</b> Binden van pyrolysegassen en/of radicalen	1			1	2
<b>B4:</b> Koelen van de pyrolyserende brandstof		1	2	2	1
<b>T1:</b> Verdringen van hete gassen	2				
<b>T2:</b> Warmte-energie opnemen via faseovergang		2	2	2	2
<b>T3:</b> Warmte-energie opnemen via warmtecapaciteit		2	2	2	2
<b>T4:</b> Warmte-energie opnemen via endotherme reactie	1		1	1	

### 3.2 Aerosolen

Een aerosol is een mengsel van kleine deeltjes (nm tot  $\mu\text{m}$ ) vloeistof of vaste stof in een gas en kan bestaan uit ammonium-, natrium- of kaliumzouten (Agafonov et al., 2004). Aerosolen worden in de praktijk op twee manieren toegepast: in poederblussers en in aerosolgeneratoren. Bij een aerosolgenerator wordt het blusmiddel als aerosol door middel van druk in de lucht gebracht, terwijl bij een poederblusser het poeder door drijfgassen in de cilinder in de lucht wordt gebracht. In dit onderzoek worden alleen aerosolgeneratoren bekeken.

In een aerosolgenerator wordt het aerosol vaak geproduceerd door een verbrandingsreactie. Hierbij komen ook andere gassen vrij, onder andere  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  en waterdamp. Deze kunnen bijdragen aan de verspreiding van het aerosol en de blussende werking ervan. De meest effectieve blussing met een aerosol wordt bereikt als de brand volledig door het aerosol is omgeven (Agafonov et al., 2004). Door de verbrandingsreactie kunnen er bij de uitstroomopening van een aerosolgenerator temperaturen van 300-400 °C ontstaan (Sheehan, 2013).

### 3.2.1 Blussende werking

De werking van het aerosol berust op de binding van radicalen (B3). Bijkomende neveneffecten zijn het opnemen van warmte (T3) en het verdringen van zuurstof (Z1), brandstof (B1) en warmte (T1) bij het verspreiden van het aerosol. Aan het oppervlak van een aerosoldeeltje zullen moleculen door de energie van de brand worden omgezet naar een gas. Bij de thermolyse van de aerosolmoleculen ontstaan radicalen (zoals K•) die in de vlam kunnen reageren met radicalen van de brandreactie, met name OH•. Hierbij ontstaat bijvoorbeeld kaliumhydroxide (KOH), een molecuul dat ook bij hoge temperaturen stabiel is, maar dat reageert met CO<sub>2</sub>. Uiteindelijk worden de aerosolradicalen gerecycled bij de reacties met brandradicalen, waardoor ze opnieuw kunnen reageren. Een aerosolgenerator heeft hiermee een negatieve katalytische werking. Hierdoor kunnen aerosolen de verbrandingsreactie onderbreken. De reacties met aerosolradicalen kosten over het algemeen energie (endotherme reacties) en die energie wordt uit de brand gehaald (Zhang et al., 2015). Dit koelende effect ontstaat alleen in de vlam waar de reacties plaatsvinden. De pyrolyserende brandstof wordt hierdoor niet gekoeld en kan dus potentieel herontsteken.

### 3.2.2 Inzettactieken

De specifieke producteigenschappen van een aerosol zorgen voor de toepasbaarheid bij bepaalde inzettactieken zoals weergegeven in tabel 3.2 hieronder.

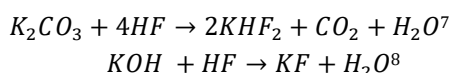
**Tabel 3.2 Toepasbaarheid van aerosolen bij inzettactieken**

Inzettactiek	Toepasbaarheid van aerosolen
Offensieve blussing oppervlaktebrand	Doordat het aerosol radicalen bindt en hiermee vlammen afbreekt, is het geschikt om een oppervlakte brand mee te blussen. Een afgesloten ruimte bevordert de werking van een aerosol. De brandstof zelf wordt niet gekoeld, waardoor nablussen noodzakelijk is. De effectiviteit is mede afhankelijk van het brandend volume of oppervlak ten opzichte van de hoeveelheid aerosol in de generator(en).
Offensieve blussing kernbrand	Alhoewel een aerosol aan de oppervlakte radicalen bindt en hiermee vlammen afbreekt, heeft het onvoldoende indringend vermogen om door te dringen tot de kern waar de kernbrand zich bevindt. Ook heeft een aerosol geen koelend vermogen om brandstoffen af te koelen. Aerosolen zijn daarom niet geschikt om een kernbrand te blussen.
Beperken pyrolyse nog niet brandend materiaal	Aerosolen hebben geen koelende of afsluitende werking. Aerosolen zijn daardoor niet in staat om de pyrolyse van nog niet brandend materiaal tegen te gaan.
Rookgaskoeling	Aerosolen hebben door hun lage warmtecapaciteit en beperkte mogelijkheid tot energieopname geen koelende werking en zijn daardoor niet geschikt voor rookgaskoeling.
Voorkomen van brandoverslag	Aerosolen koelen niet en kunnen daardoor geen naburig pand koelen om brandoverslag te voorkomen. Aerosolen kunnen doordat ze radicalen binden, wél gebruikt worden om uitredende vlammen uit een pand af te breken. Het opbrengen van de aerosolen op de juiste plek in de juiste hoeveelheid is in de praktijk echter complex. Om die redenen is een aerosol naar verwachting niet geschikt om brandoverslag te voorkomen.

Vloeistofbrand	Aerosolen zijn door het binden van radicalen en het afbreken van de vlammen effectief in het blussen van een vloeistofbrand. De effectiviteit is mede afhankelijk van het brandend volume of oppervlak ten opzichte van de hoeveelheid aerosol in de generator(en).
Elektriciteitsbrand	Aerosolen kunnen gebruikt worden om een elektriciteitsbrand te blussen. Aerosolen zijn in staat zowel vaste stoffen als olie te blussen. Het gebruik van poeder / aerosolen wordt echter afgeraden in de brancherichtlijn <i>Brandweeroptreden nabij elektriciteit</i> vanwege nevenschade aan (kritieke) infrastructuur.
Brand in accupakket	Aerosolen hebben geen koelende werking. Hierdoor kan een aerosol geen thermal runaway stoppen. Door het binden van radicalen kan een aerosol wel de vlammen aan de buitenzijde van een accupakket blussen. Kaliumcarbonaat kan waterstoffluoride binden. Mogelijk kunnen aerosolen hierdoor de concentratie giftige gassen die is ontstaan bij een brand in een accupakket verminderen. In welke mate dit in de praktijk werkt, is nog niet vastgesteld.

### 3.2.3 Bijzonderheden en toepassing in de praktijk

- > Het gebruik van aerosolgeneratoren brengt risico's met zich mee door eventueel gegenereerde hitte of druk uit de generator. Het is onduidelijk wat de invloed van aerosolgeneratoren is op de vlucht- en overlevingsmogelijkheden van slachtoffers wat betreft hitteontwikkeling en het verdringen van zuurstof. Dit is afhankelijk van volume en omstandigheden. Aerosolen kunnen irriterend zijn voor huid, ogen of luchtwegen. De mate waarin verschilt per product.
- > Aerosolen hebben na een blussing vaak zouten als residu. Dit is corrosief en kan daardoor nevenschade veroorzaken. Fabrikanten adviseren over het algemeen om residuen na een blussing weg te halen.
- > Bij de toepassing van aerosolen bij li-ion branden kan een secundair effect ontstaan dat positief bijdraagt aan de brandbestrijding. Het schadelijke gas waterstoffluoride (HF) dat vrijkomt bij li-ion branden, kan reageren met het aerosol (in de vorm van  $K_2CO_3$ ) en met het tussenproduct KOH via de onderstaande reactievergelijkingen (Siegemund et al., 2016):



Deze reacties verlopen in vitro exotherm onder standaard omstandigheden. Het is echter niet bekend hoe sterk deze reacties verlopen in verhouding tot de productie van HF en andere reacties bij een li-ion brand. De zouten  $KHF_2$  en KF die kunnen ontstaan, zijn daarnaast ook gevaarlijk en corrosief.

- > Aerosolgeneratoren zijn over het algemeen klein en mobiel en daardoor geschikt voor kleine, afgesloten ruimten waar het aerosol de brand volledig kan omgeven. Het aerosol zal in de lucht blijven hangen, maar naar verloop van tijd wel neerslaan. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter de contactoppervlak-massaverhouding, waardoor ze sneller reageren en langer in de lucht blijven hangen. Er is bijvoorbeeld maar 30 tot 60 g/m<sup>3</sup> aerosol nodig voor een effectieve blussing in een afgesloten ruimte, tegenover 130 tot 150 g/m<sup>3</sup> voor gewone ABC-poederblussers (Agafonov et al., 2004).

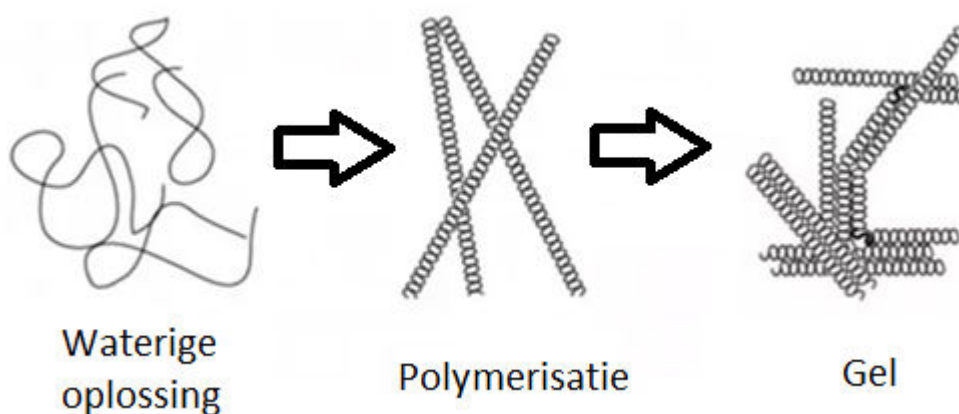
<sup>7</sup> <http://chemistry-reference.com/reaction.asp?rxnnum=688>.

<sup>8</sup> <http://chemistry-reference.com/reaction.asp?rxnnum=361>.

- > Het aerosol is afhankelijk van luchtstromen, wat zowel in het voordeel als nadeel kan werken. Bij een brand in een open ruimte of een te grote ruimte zal het aerosol zich door hete verbrandingsgassen net zo verspreiden als rookdeeltjes en blijft het niet lang genoeg in de vlam om te kunnen reageren (Sheehan, 2013). Anderzijds, wanneer de brandruimte niet (makkelijk) bereikbaar is, kan een aerosolgenerator worden geactiveerd in een naastgelegen ruimte en kan het aerosol via luchtstromen de brandhaard bereiken en voor blussing zorgen. Door convectie kan het aerosol ook in de vlam meegevoerd worden en daardoor langer blijven werken.

### 3.3 Gelvormende middelen

Gelvormende middelen bevatten stoffen die in een polymerisatiereactie water kunnen binden, waardoor een soort stroperige gel ontstaat (zie figuur 3.1). Gelvormende middelen zijn veelal acrylpolymeren die goed bestand zijn tegen hoge temperaturen. Blusmiddelen met gelvormende middelen hechten zich goed aan oppervlakken door de stroperigheid van de gel. De gel heeft een hoge warmtecapaciteit (gelijk aan water), doordat water ingesloten zit in de gel.



Figuur 3.1 Schematische weergave van gelvormende middelen in water<sup>9</sup>

#### 3.3.1 Blussende werking

Door de goede hechting kan de gel beter blijven plakken op een brandend oppervlak. Wanneer het ingesloten water op een brandend oppervlak blijft liggen, sluit het de brandstof af (B2). Het ingesloten water in de gel heeft een koelend effect op het brandende oppervlak (B3, T2 en T3). Door de hoge viscositeit van gel hecht deze goed aan niet-horizontale oppervlakten. Tevens kan gel op een nog niet brandend oppervlak aangebracht worden als bescherming tegen de brand. Door de hoge oppervlaktespanning van een gel heeft deze een slecht indringend vermogen.

#### 3.3.2 Inzettactieken

De specifieke producteigenschappen van een gelvormend middel (hechten en binden van water) zorgen voor de mogelijkheden bij bepaalde inzettactieken die staan weergegeven in tabel 3.3 op de volgende pagina.

<sup>9</sup> <http://aliceromane.wixsite.com/tpe-agaragar/blank-7>.

**Tabel 3.3 Toepasbaarheid van gelvormend middel bij inzetacties**

Inzettactiek	Toepasbaarheid gelvormend middel
Offensieve blussing oppervlaktebrand	<p>Gelvormende middelen zijn goed toepasbaar bij blussing van een oppervlaktebrand:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>&gt; Door de goede hechting blijft de gel op brandende oppervlakken liggen en valt er weinig gel op de grond. Er is in vergelijking met bluswater minder blusmiddel nodig.</li><li>&gt; Door de goede hechting dicht de gel het brandende oppervlak af.</li><li>&gt; Het verdampen van water uit de gel vraagt extra energie. De warmte die hiervoor nodig is, wordt uit het brandend oppervlak gehaald dat daardoor afkoelt.</li></ul>
Offensieve blussing kernbrand	<p>Door de hogere oppervlaktetenspanning, hoge viscositeit en cohesie van de gel dringt het blusmiddel niet of niet goed door tot de kern van de brand. Hierdoor is een gelvormend middel minder toepasbaar voor het blussen van een kernbrand.</p>
Beperken pyrolyse nog niet brandend materiaal	<p>Een gel blijft goed liggen op een vast materiaal. Door het ingesloten water beschermt de gel het materiaal goed tegen warmte van de brand. De gel kan warmte opnemen van het nog niet brandende materiaal. Een gelvormend middel kan op deze wijze goed pyrolyse van een nog niet brandend materiaal voorkomen.</p>
Rookgaskoeling	<p>Er zijn geen testen gevonden van een gelvormend middel gebruikt voor rookgaskoeling. De verwachting is dat rookgassen zeer beperkt gekoeld kunnen worden met een gelvormend middel. Rookgassen worden voornamelijk gekoeld door het verdampen van veel kleine druppels (groot contactoppervlak). Een gel heeft een veel kleiner contactoppervlak en zal daardoor niet snel de rookgassen kunnen koelen. Daar komt bij dat het water in de gel minder snel verdampt door de insluiting (Bellich et al., 2011). Hierdoor is de warmteuitwisseling tussen de rookgassen en de gel relatief langzaam.</p>
Voorkomen van brandoverslag	<p>Een gel hecht ook aan niet-horizontale oppervlakken. Door het ingesloten water in de gel kan de gel veel warmte opnemen. Een gelvormend middel is daarom geschikt om brandoverslag te voorkomen. Gelvormende middelen zouden ook bij een defensieve inzet bij een natuurband gebruikt kunnen worden. De betere hechting kan goed gebruikt worden bij een natte stoplijn. De schadelijkheid voor het milieu kan verschillen per product en is iets wat nog nader bekeken zou moeten worden (Brandweeracademie, 2018)</p>

Vloeistofbrand	Gelvormende middelen zijn niet geschikt voor het blussen van vloeistofbranden. De gel heeft over het algemeen een hogere dichtheid dan veel brandbare vloeistoffen, die daarom zouden gaan drijven op de gel. Wanneer de gel wel blijft liggen op de brandende vloeistof, dan verspreidt deze zich niet daarover.
Elektrabrand	Over de inzetbaarheid van gelvormende middelen bij een elektrabrand kan op basis van de gevonden informatie geen oordeel gegeven worden. In hoeverre nevenschade wordt veroorzaakt aan de infrastructuur van elektrische installaties is onbekend. Wanneer olie (bijvoorbeeld uit een transformator) betrokken is bij de brand, dan is het gelvormend middel hiervoor niet geschikt (zie bij vloeistofbrand hierboven).
Brand in accupakket	Over de inzetbaarheid van gelvormende middelen bij brand in een accupakket is weinig bekend. Er zijn op kleine schaal testen gedaan met enkele producten die vallen onder de gelvormende middelen (Egelhaaf, Kress, Wolpert, Lange, et al., 2013; Fire Risk Alliance, 2015). Over de inzetbaarheid bij een brand in een accupakket dat ingebouwd zit en waarbij het blusmiddel moeilijk bij de cellen kan komen, is niets bekend, maar het slechte indringende vermogen zal waarschijnlijk negatief werken bij een dergelijke brand (RISE, 2019).

### 3.3.3 Bijzonderheden en toepassing in de praktijk

- > Er bestaan gelvormende middelen die als 'brandgel' beschikbaar zijn en als brandvertrager worden gebruikt. Hierbij zijn stoffen (bijvoorbeeld een bluspoeder) aan de gel toegevoegd die de blussende werking vergroten.
- > De onderzochte gelvormende middelen vormen pas een gel bij blootstelling aan de lucht of aan hoge temperaturen. Hierdoor kunnen ze als blusmiddel ingezet worden. De meeste gelvormende middelen worden verkocht als premix met water. Soms moeten ze bijgemengd via een tussenmenger. Over het algemeen zijn gelvormende middelen prima te verpompen, maar het vormen van de gel kan al beginnen in de slang. Dit hangt af van de hoeveelheid gelvormende middelen die wordt bijgemengd. Hoe langer de slang is, hoe moeilijker de gel verpompt kan worden.

## 3.4 Mineralen

Een mineraal is een stof die als vaste stof in de vrije natuur voorkomt en gevormd is door geologische processen. Bekende voorbeelden van mineralen zijn gips en asbest. Niet elk mineraal is geschikt als blusmiddel. Asbest is bijvoorbeeld niet geschikt voor brandbestrijding, omdat asbest schadelijk is wanneer asbest betrokken is bij een brand. Blusmiddelen op basis van mineralen zijn waterige oplossingen of suspensies van het poedervormige of vezelvormige mineraal.

### 3.4.1 Blussende werking

Bij verhoging van de temperatuur ondergaat het mineraal een (fase)transformatie waarin het uiteen kan vallen in andere chemische stoffen of een andere kristalstructuur. Daarbij kunnen

gassen vrijkomen en andere chemische stoffen worden gevormd die invloed hebben op de verbranding (zoals kooldioxide, maar ook koolmonoxide). De transformatie van een mineraal is vrijwel altijd endotherm (T4), waardoor energie wordt onttrokken aan de verbrandingsreactie. De mineralen bevatten daarnaast vaak ingesloten water, dat vrijkomt bij hoge temperaturen. Door het verlies van water vormen sommige mineralen een laag die het brandoppervlak afsluit (Z2 en B2). Het vrijgekomen water heeft een koelende werking (B4, T2 en T3). Door het toegevoegde mineraal is dit vaak hoger dan van water op zichzelf.

### **3.4.2 Inzettactieken**

De specifieke producteigenschappen van een mineraalblusmiddel (afdichten en water insluiten) zorgen voor de toepasbaarheid bij bepaalde inzettactieken die in tabel 3.4 op de volgende pagina staat weergegeven.

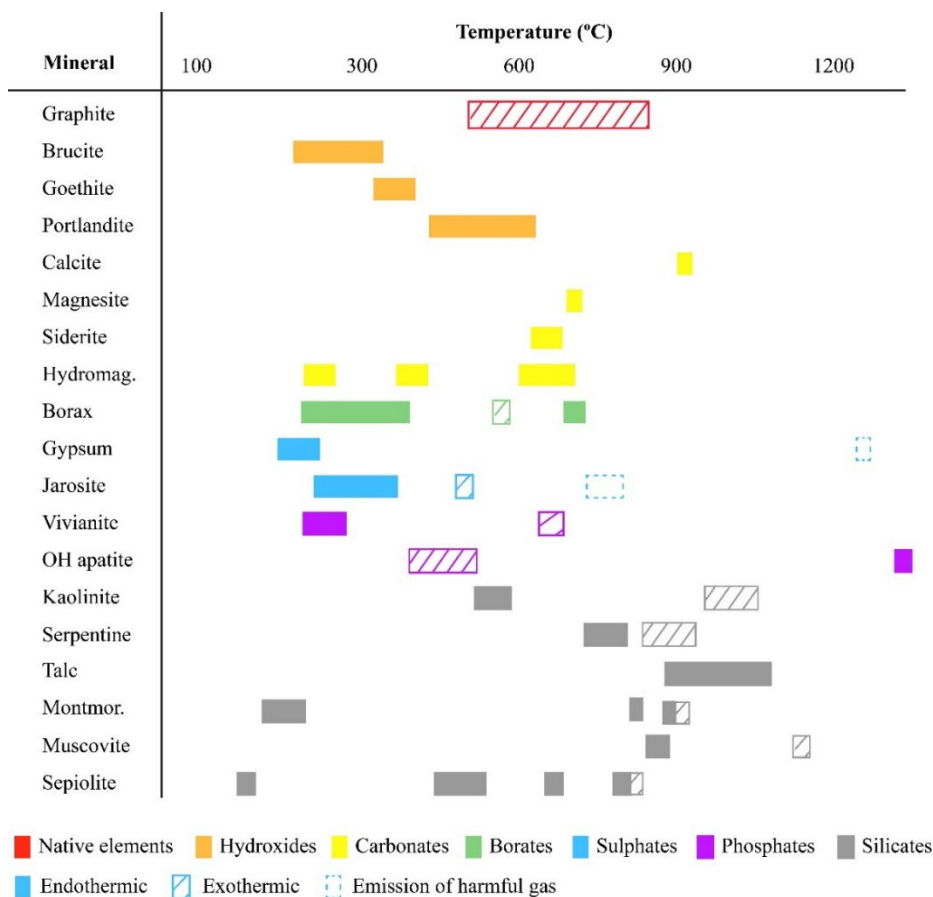


**Tabel 3.4 Toepasbaarheid van mineraalblusmiddelen bij inzetacties**

Inzettactiek	Toepasbaarheid mineraalblusmiddel
Offensieve blussing oppervlaktebrand	Door de hogere warmtecapaciteit en de betere hechting en afdichting kan minder blusmiddel nodig zijn ten opzichte van bluswater. Er is mogelijk minder 'run off' van blusmiddel. Het heeft een extra koelende werking en kan zuurstof verdringen.
Offensieve blussing kernbrand	Door de toevoeging van mineralen aan het water wordt de oppervlaktenspanning hoger. Hierdoor dringt het blusmiddel minder goed door tot de kern van de brand.
Beperken pyrolyse nog niet brandend materiaal	Door de afdichtende werking en de hechting kan een mineraalblusmiddel een isolerende laag vormen op nog niet brandend materiaal. Het nog niet brandende materiaal wordt daardoor beschermd tegen een warmte van de brand en afgesloten van zuurstof. Daarnaast kan het mineraalblusmiddel het nog niet brandende materiaal koelen om op die wijze pyrolyse van het nog niet brandende materiaal tegen te gaan.
Rookgaskoeling	Een mineraalblusmiddel heeft een klein contactoppervlak (een dikke straal blusmiddel en geen kleine druppeltjes). Het direct koelen van de rookgassen is naar verwachting niet mogelijk. Het indirect koelen van de rookgassen door het mineraalblusmiddel te spuiten tegen wanden en plafonds is wel mogelijk. De verwachting is wel dat deze wijze van koeling te traag gaat voor een effectieve rookgaskoeling.
Voorkomen vanbrandoverslag	Een mineraalblusmiddel kan gebruikt worden om een naburig pand te koelen. De betere hechting kan helpen om het mineraalblusmiddel te laten plakken aan het naburig pand. Het aanbrenge van het mineraalblusmiddel op alle plaatsen van de gevel kan mogelijk lastiger gaan door de hogere oppervlaktenspanning. Dit geldt zeker wanneer het blusmiddel over een grote lengte aangebracht moet worden en de straal nagenoeg evenwijdig aan het pand gericht staat (bijvoorbeeld als gevolg van een relatief smal pad tussen twee panden).
Vloeistofbrand	Of een mineraalblusmiddel geschikt is om toe te passen bij een vloeistofbrand is niet bekend.
Elektrabrand	De verwachting is dat mineraalblusmiddelen door de toevoeging van mineralen elektriciteit beter geleiden dan water. Het exacte effect op elektrische geleiding is onbekend. De specifieke toepasbaarheid van een mineraalblusmiddel bij een elektrabrand is onbekend.
Brand in accupakket	Door de hogere oppervlaktenspanning heeft een mineraalblusmiddel een slecht indringend vermogen. Hierdoor zal het mineraalblusmiddel naar verwachting slecht tot in het accupakket kunnen dringen. Wanneer het mineraalblusmiddel direct bij de individuele cellen ingebracht kan worden, zou het middel in theorie goed kunnen werken, aangezien mineraalblusmiddelen een hoog koelend vermogen hebben.

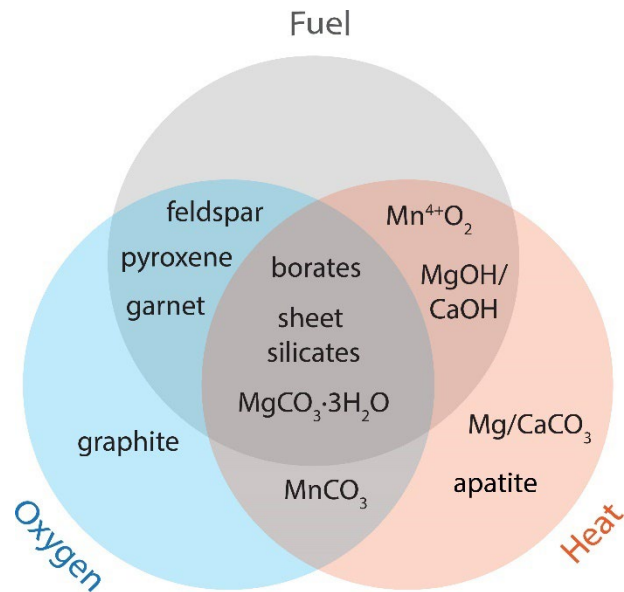
### 3.4.3 Bijzonderheden en toepassing in de praktijk

- > Doordat de viscositeit van het mineraalblusmiddel hoger is, hecht het goed aan oppervlakken en heeft het een vrij slecht indringend vermogen.
- > Mineralen versnellen vaak chemische reacties waardoor mogelijk onbedoeld schadelijke gassen vrijkomen. Hierover is echter nog weinig onbekend.
- > De reactie van mineralen verloopt over het algemeen bij pas hoge temperaturen (>>100 °C). Vanwege deze eigenschap worden mineralen al langer gebruikt in brandvertragers, zoals gips en asbest. Voor de toepassing bij brandbestrijding is het belangrijk dat de reactietemperatuur in een temperatuurbereik valt dat reëel is bij daadwerkelijke branden. Figuur 3.2 hieronder laat een overzicht zien van de temperaturen waarbij enkele mineralen reageren.



**Figuur 3.2** Overzicht van de temperaturen van reacties van verschillende mineralen met het oog op brandbestrijding (King & Geertsema, n.d.)

De temperatuurspectra waarbinnen mineralen endotherm of exotherm reageren zijn relevant, evenals het potentieel vrijkomen van giftige en/of schadelijke gassen. Pas vrij recent is er door de Universiteit Utrecht in samenwerking met de Brandweeracademie gekeken naar het toepassen van mineralen als blusmiddel (King & Geertsema, n.d.). Hierbij zijn groepen mineralen onderzocht, inclusief hun thermodynamische, fysische en macroscopische eigenschappen wanneer deze aan brand worden blootgesteld. Op basis hiervan is vastgesteld welke mineraalgroepen bepaalde zijden van de branddriehoek kunnen beïnvloeden. Zie figuur 3.3 op de volgende pagina. De belangrijkste constatering van het onderzoek is echter dat er nog erg veel onzekerheden zijn, zodat verder onderzoek noodzakelijk is.



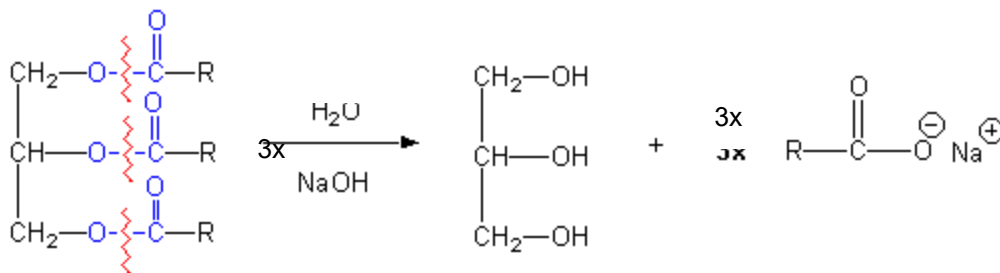
**Figuur 3.3** Dominante rol van mineraalgroepen in relatie tot de beïnvloeding van de branddriehoek (King & Geertsema, n.d.)

### 3.4.4 Bijzonderheden en toepassing in de praktijk

- > Voor het gebruik van mineralen bij brandbestrijding is het met name van belang dat de vorming van de korst door het mineraal voldoende snel verloopt. Wanneer een brand sneller uitbreidt dan dat de korst gevormd wordt, zal geen blussing door afsluiting plaatsvinden.
- > Er mogen geen of zeer weinig schadelijke bijproducten ontstaan.

## 3.5 Zeepvormende middelen

Een zeepvormend middel is een stof die een zeepvormende reactie aangaat met een olie of vet. Er wordt ook wel gesproken van verzeping. Dit is een reactie tussen een sterk loog en een olie of vet bij hoge temperaturen, waarbij zeep ontstaat (zie figuur 3.4 hieronder).



**Figuur 3.1.** Schematische weergave van een zeepvormende reactie<sup>10</sup>

Zeepvormende middelen zijn beter bekend als 'wet chemicals' of chemisch blusschuim. De term blusschuim is hier enigszins misplaatst, aangezien het middel zelf geen schuim is, maar met de brandstof reageert zodat schuim ontstaat.

### 3.5.1 Blussende werking

De primaire blussende werking van zeepvormende middelen is het reageren met de brandstof. Hierdoor worden pyrolyseproducten gebonden voordat deze verbranden (B3).

<sup>10</sup> <http://www.thuisexperimenteren.nl/science/zeep/zeep.htm>.

Deze reactie is sterk endotherm en neemt hierdoor energie weg van de brand (T4). Omdat het om een verzeppingsreactie gaat, reageren zeepvormende middelen in de basis alleen met oliën of vetten (lange koolwaterstofketens met een carboxylgroep). Doordat de reactie endotherm is, daalt de temperatuur van de brandstof (B4). De ontstane zeep vormt een laagje schuim of een korst op de brandstof, waardoor deze afgesloten wordt van zuurstof (Z2 en B2). Als blusmiddelen worden vaak NaOH of KOH (natrium- of kaliumhydroxide), CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>K<sup>+</sup> (kaliumacetaat), K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (kaliumcarbonaat) of K<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> (kaliumcitraat) gebruikt. Deze zijn in hoge concentratie opgelost in water. Het water in het blusmiddel zelf heeft ook een koelend effect (B4, T2 en T3).

### 3.5.2 Inzettactieken

De specifieke producteigenschappen van zeepvormende middelen zorgen voor de toepasbaarheid bij bepaalde inzettactieken zoals weergegeven in tabel 3.5 hieronder.

**Tabel 3.5 Toepasbaarheid van zeepvormende middelen bij inzettactieken**

Inzettactiek	Toepasbaarheid zeepvormende middelen
Offensieve blussing oppervlaktebrand	Zeepvormende middelen zijn niet bedoeld voor het blussen van een oppervlaktebrand. Omdat ze water bevatten, hebben ze een koelend effect. Er is echter geen meerwaarde van de zeepvormende werking van het middel zelf.
Offensieve blussing kernbrand	Er is geen verwachte meerwaarde voor het blussen van een kernbrand.
Beperken pyrolyse nog niet brandend materiaal	Er is geen verwachte meerwaarde voor het beperken van pyrolyse van nog niet brandend materiaal.
Rookgaskoeling	Er is geen verwachte meerwaarde bij het toepassen van rookgaskoeling.
Voorkomen van brandoverslag	Er is geen verwachte meerwaarde bij het voorkomen van brandoverslag.
Vloeistofbrand	Wanneer een surfactant is toegevoegd aan het zeepvormende middel, kan het gebruikt worden voor het blussen van een vloeistofbrand. De effectiviteit verschilt per soort vloeistof waar het op gebruikt wordt en hangt af van de specifieke surfactant die is toegevoegd. Wanneer de brandende vloeistof een olie of vet betreft, heeft een zeepvormend middel een positieve invloed op de blussing.
Elektrabrand	Er is geen verwachte meerwaarde voor het blussen van een elektrabrand. Het effect van het zeepvormende middel op de elektrische geleiding van het blusmiddel is onbekend.
Brand in accupakket	Er is geen verwachte meerwaarde voor het blussen van een brandend accupakket.

### 3.5.3 Bijzonderheden en toepassing in de praktijk

- > Vanwege de specifieke zeepvormende reactie met vetten en oliën zijn deze middelen primair bedoeld voor klasse F-branden (vetbranden) en worden toegepast in vetbrandblussers (bijvoorbeeld voor industriële keukens).

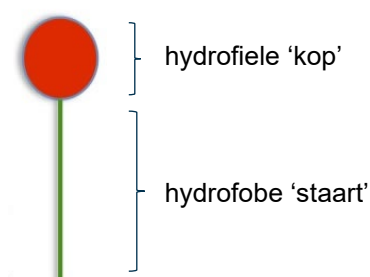
- > Brandblussers met een zeepvormend middel bevatten vaak ook een surfactant (voor een toelichting op surfactanten zie de volgende paragraaf), waarmee deze blusmiddelen ook gebruikt kunnen worden voor klasse B-branden.
- > Het blusmiddel wordt opgebracht door middel van een sproeistraal om geen hete vloeistoffen te laten opspatten.

### 3.6 Surfactanten

Een surfactant is een oppervlakte-actieve stof die aan water wordt toegevoegd om de oppervlaktespanning van het water te verlagen (Atkins & De Paula, 2006). Het water verspreidt zich dan beter uit en over een groter oppervlak (zie figuur 3.5).



**Figuur 3.2 Door toevoeging van een surfactant wordt de oppervlaktespanning van water lager, waardoor het indringend vermogen groter wordt<sup>11</sup>**



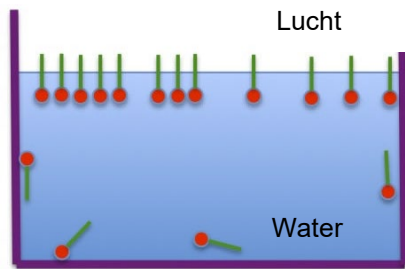
Surfactanten worden soms ook 'wetting agents' genoemd. Een surfactant bestaat uit een (hydrofiel) deel dat aangetrokken wordt door water en een (hydrofoob) deel dat aangetrokken wordt door koolwaterstoffen zoals vetten en olie (Figuur 3.6).

**Figuur 3.3 Schematische weergave van een surfactantmolecuul<sup>12</sup>**

Afhankelijk van hun omgeving organiseren de moleculen zich op een bepaalde manier. In water richten de moleculen zich met het hydrofiële kop naar het wateroppervlak en met de hydrofobe staart naar de lucht (zie Figuur 3.7). Hierdoor wordt de oppervlaktespanning verlaagd (Atkins & De Paula, 2006) en de dampspanning verhoogd.

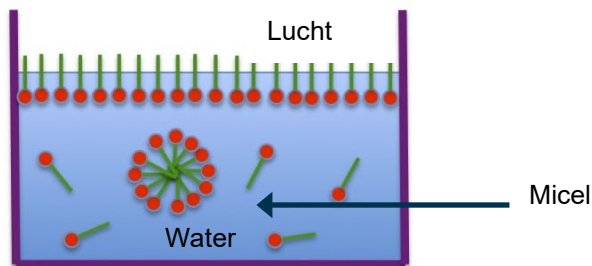
<sup>11</sup> ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2015. *Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection* (ISC-1). Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, DNAPL Site Characterization Team. [www.itrcweb.org/DNAPL-ISC\\_tools-selection](http://www.itrcweb.org/DNAPL-ISC_tools-selection).

<sup>12</sup> <https://www.pirika.com/NewHP/PirikaE2/Surfactant.html>.



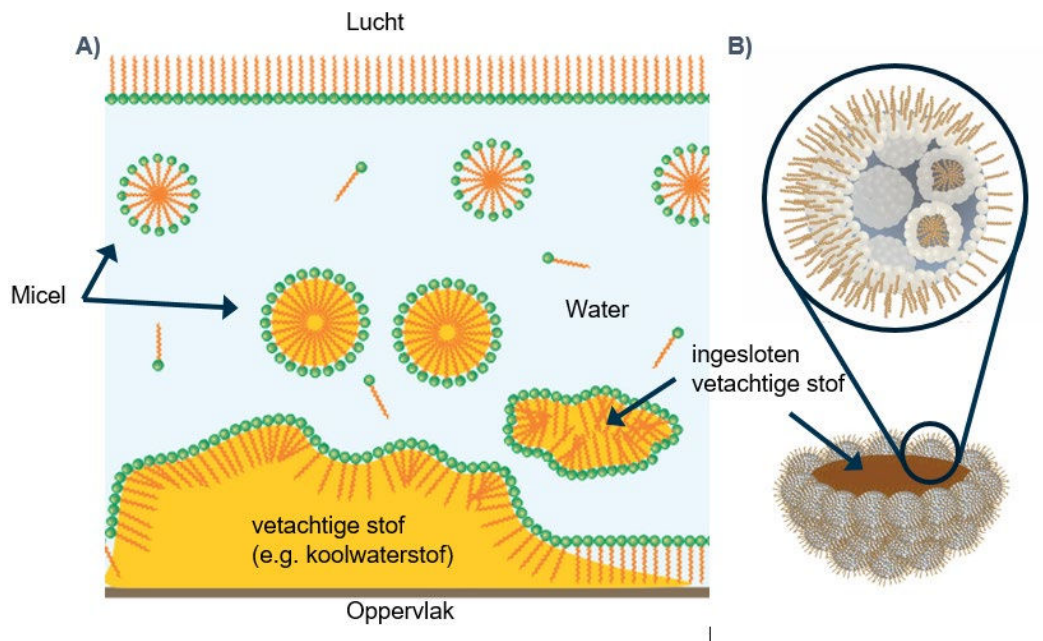
**Figuur 3.7 Schematische weergave van surfactantmoleculen in water<sup>12</sup>**

Als het oppervlak geheel bezet is, zullen de moleculen in de oplossing zich met de hydrofobe staarten naar elkaar richten en ontstaan er micellen (zie Figuur 3.8).



**Figuur 3.8 Schematische weergave van het ontstaan van micellen<sup>12</sup>**

Micellen kunnen vetachtige stoffen (waaronder koolwaterstoffen) insluiten en oplosbaar maken in water zoals in Figuur 3.9A. Een omgekeerde micel kan water insluiten en daarmee een vetachtige stof omringen (Figuur 3.9B).



**Figuur 4.10 Surfactanten maken vetachtige stoffen oplosbaar in water<sup>13</sup> door ze in te sluiten in een micel (A) of in lucht<sup>14</sup> door insluiting van met water gevulde omgekeerde micellen (B)**

<sup>13</sup> <http://www.natureontheshelf.com/soap-making/how-soap-works.html>.

<sup>14</sup> <http://www.hct-world.com/products/chemical-agents/f-500-encapsulator-agent/what-is-encapsulator-technology/>.

### 3.6.1 Blussende werking

De oppervlaktespanning van water wordt verlaagd door de surfactant, waardoor het indringende vermogen van water wordt vergroot. De primaire blussende werking van surfactanten berust op het wegnemen van energie van de verbranding doordat water opwarmt en verdampt (T2 en T3). Surfactanten kunnen er mogelijk voor zorgen dat het kookpunt van het water verlaagd wordt (Saylor et al., 2000; Xu et al., 2010). Ook kunnen ze er mogelijk voor zorgen druppels water ingesloten worden, waardoor het water een groter koelend vermogen krijgt. Er is op dit moment echter slechts zeer beperkt wetenschappelijk bewijs gevonden voor de verlaging van het kookpunt en het grotere koelend vermogen. Om die reden worden deze zaken niet meegenomen in de toepasbaarheid bij inzetacties in tabel 3.6.

### 3.6.2 Inzettacties

De specifieke producteigenschappen van surfactanten (het verlagen van oppervlaktespanning) zorgen voor de toepasbaarheid bij bepaalde inzetacties die staat weergegeven in tabel 3.6 hieronder.

**Tabel 3.6 Toepasbaarheid surfactanten bij inzetacties**

Inzettactiek	Toepasbaarheid surfactanten
Offensieve blussing oppervlaktebrand	Een blusmiddel van water met een surfactant is bruikbaar bij het blussen van een oppervlaktebrand. Er lijkt echter geen meerwaarde te zijn ten opzichte van water zonder surfactant. Een negatief gevolg van de lagere oppervlaktespanning kan zijn dat blusmiddel makkelijker en sneller van objecten afloopt. Hierdoor kan er minder warmte-uitwisseling tussen blusmiddel en object plaatsvinden, waardoor het blusmiddel minder koelt.
Offensieve blussing kernbrand	Door de lagere oppervlaktespanning kan een blusmiddel van water met een surfactant beter doordringen tot in de kern. Dit kan van meerwaarde zijn bij de bestrijding van een kernbrand.
Beperken pyrolyse nog niet brandend materiaal	Een blusmiddel van water met een surfactant is bruikbaar bij koelen van nog niet brandend materiaal om op die wijze de pyrolyse van dat materiaal te beperken. Er lijkt geen meerwaarde te zijn ten opzichte van water zonder surfactant. Een negatief gevolg van de lagere oppervlaktespanning kan zijn dat blusmiddel makkelijker en sneller van objecten afloopt. Hierdoor kan er minder warmte-uitwisseling tussen blusmiddel en object plaatsvinden, waardoor het blusmiddel minder koelt.
Rookgaskoeling	Een blusmiddel van water met surfactant is bruikbaar voor rookgas-koeling. Het is mogelijk dat het water door de lagere oppervlaktespanning sneller en makkelijker verdampt.
Voorkomen van brandoverslag	Een blusmiddel van water met een surfactant is bruikbaar bij het koelen van een naburig pand. Er lijkt geen meerwaarde te zijn ten opzichte van water zonder surfactant.
Vloeistofbrand	Voor een blussing is het een voorwaarde dat het blusmiddel blijft liggen op de vloeistof die brandt. De vloeistof moet dan niet reageren met het blusmiddel.

Elektrabrand	Door de lagere oppervlaktespanning is er mogelijk een betere geleiding van elektriciteit.
Brand in accupakket	De lagere oppervlaktespanning kan zorgen voor een beter indringend vermogen. Dit kan potentieel bijdragen aan het blussen van een brand in een accupakket. Om een accupakket goed te kunnen blussen, moet er wel direct contact zijn met het brandoppervlak. Dit blijkt in de praktijk echter lastig te zijn bij li-ion batterijbranden (Vylund et al., 2019).

### 3.6.3 Bijzonderheden en toepassing in de praktijk

- > Micellen die door surfactanten gevormd worden, kunnen in theorie mogelijk pyrolysegassen of rookgassen insluiten. Op deze manier zouden ze mogelijk overlast door rook of schadelijke stoffen kunnen verminderen. In water bestaat de buitenkant van micellen uit de hydrofiele kop. In de volle lucht is die neiging om te clusteren tot micellen een stuk kleiner en dus minder. Daardoor komen er misschien wel helemaal geen micellen in de lucht, waardoor de toepasbaarheid om pyrolysegassen of rookgassen in te sluiten sterk wordt betwijfeld.
- > Surfactanten worden in de praktijk als poeder of vloeistof bijgemengd met water. Dit kan door middel van een tussenmenger of door een premix van water met surfactant. Of de bestaande pomp van een tankautospuit gebruikt kan worden voor het verpompen van het water met de surfactant is afhankelijk van de soort surfactant en het type pomp.

## 3.7 In de markt verkrijgbare producten anno 2020

Voor dit onderzoek is gekeken welke producten op de markt zijn die passen binnen de groepen en types blusmiddelen zoals genoemd in dit hoofdstuk. In een uitgebreide marktverkenning is gezocht naar verschillende aanbieders. Zoals vermeld op pagina 9, is de marktverkenning uitgevoerd in de periode oktober 2018 tot januari 2020; ze wordt niet verondersteld volledig te zijn. Een lijst met anno 2020 verkrijgbare producten zoals die zijn gevonden is opgenomen in Bijlage 1.



# 4 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was het bundelen van kennis over werkingsprincipes van alternatieve blusmiddelen en de toepasbaarheid van deze blusmiddelen in incidentscenario's. Uitgangspunt hierbij was, dat er werd gezocht naar onderbouwing vanuit natuurkundige en scheikundige principes om te kunnen duiden op welke wijze de betreffende middelen een brand zouden blussen. Met de resultaten van dit onderzoek worden brandweerkorpsen en brandweeropleidingen ondersteund met praktisch toepasbare kennis, een handelingsperspectief en kaders voor blusmiddelen.

## 4.1 Beantwoording van de deelvragen

### 1. Welke soorten blusmiddelen bestaan er?

De alternatieve blusmiddelen zijn grofweg in te delen in twee groepen: watergedragen additieven en aerosolen. De blusmiddelen binnen de groep aerosolen hebben alle een vergelijkbare werking en worden dus als één type beschouwd. Binnen de groep watergedragen additieven zijn vier typen blusmiddelen te onderscheiden: gelvormende middelen, mineraalblusmiddelen, zeepvormende middelen en surfactanten.

### 2. Welke relevante kennis, kaders en handelingsperspectieven zijn er in de literatuur te vinden over alternatieve blusmiddelen?

Er komen steeds meer alternatieve blusmiddelen op de markt waarvan (deels) onduidelijk is wat hun werkingsprincipe is. Door fabrikanten en distributeurs wordt weliswaar aangegeven welke eigenschappen deze middelen zouden bezitten en waar ze voor gebruikt kunnen worden, maar vaak is onduidelijk in welke situaties deze middelen nu precies kunnen worden ingezet of welke beperkingen ze hebben. In dit rapport worden hiervoor kaders en handelingsperspectieven gegeven. In bijlage 1 is een lijst opgenomen met producten die uit het literatuuronderzoek naar voren zijn gekomen

### 3. Fysische en chemische werking van deze blusmiddelen?

Blusmiddelen binnen de groep watergedragen additieven hebben verschillende fysische en chemische werkingen.

- > De belangrijkste fysische werkingen zijn het afdichten van de brand (gelvormende, mineraliserende en zeepvormende middelen) en een groter indringend vermogen in de brandstof (surfactanten).
- > De belangrijkste chemische werkingen zijn het koelen van de brandstof (gelvormende en mineraalblusmiddelen en surfactanten) en het afbreken van de brandstof (zeepvormende middelen).

De fysische werking van blusmiddelen binnen de groep aerosolen is het verdringen van brandbare gassen en zuurstof en de chemische werking is het neutraliseren van radicalen.

#### 4. Wat is de werking van de blusmiddelen binnen zowel standaard als specifieke incidentscenario's?

De werking van watergedragen additieven is afhankelijk van het incidentscenario. De afdichtende werking van gelvormende, mineraliserende en zeepvormende middelen geldt met name bij scenario's waarbij de brand beperkt is tot een object. Surfactanten hebben een meerwaarde wanneer er grote oppervlaktes of dieptes gekoeld moeten worden.

Gelvormende middelen zijn vanwege hun kleefkracht, koelend vermogen en relatieve milieuvriendelijkheid van meerwaarde bij natuurbranden en kunnen vaak ook preventief gebruikt worden. Mineraalblusmiddelen delen veel van deze eigenschappen, maar er is minder bekend over hun praktische toepasbaarheid en eventuele langetermijneffecten.

Zeepvormende middelen hebben een specifieke werking die bedoeld is voor het specifieke scenario van een vetbrand. Doordat zeepvormende middelen water en ook vaak surfactanten bevatten, kunnen deze middelen ook gebruikt worden bij andere (standaard) scenario's, maar zijn waarschijnlijk minder effectief.

De werking van aerosolgeneratoren is in vrijwel alle incidentscenario's gelijk. Aerosolgeneratoren zijn het effectiefst in besloten ruimten waar het aerosol zich over een beperkt volume verspreidt en daardoor langer kan werken. In het specifieke incidentscenario van een li-ion brand kan het aerosol een reactie aangaan met vrijkomend HF-gas. Er is echter geen informatie bekend over de vraag in hoeverre dit in de praktijk gebeurt.

### 4.2 Beantwoording van de hoofdvraag

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

*Wat zijn de werkingsprincipes van (alternatieve) blusmiddelen en wat is de toepasbaarheid van die blusmiddelen in de verschillende incidentscenario's?*

De blusprincipes van de (alternatieve) blusmiddelen zijn in deze rapportage verklaard vanuit hun effect op een of meerdere zijden van de branddriehoek. Het gaat hierbij dus om verdringen van de zuurstof, het wegnemen van de brandstof of verlaging van de temperatuur of een combinatie hiervan. Tevens is gekeken naar fysische en/of chemische eigenschappen van deze blusmiddelen die de bluswerking kunnen verklaren. Op basis van de blusprincipes en de bluswerking is voor verschillende incidentscenario's een uitspraak gedaan over de toepasbaarheid van deze blusmiddelen in de betreffende scenario's. In de beantwoording van de verschillende deelvragen wordt dit nader toegelicht

# Literatuurlijst

Agafonov, V. V., Kopylov, S. N., Sychev, A. V., Uglov, V. a., & Zhyganov, D. B. (2004). The Mechanism of Fire Suppression By Condensed Aerosols. *Russian Scientific Research Institute for Fire Protection*, 1–10.

Amped I, L. (2013). Enhanced Fire Extinguisher Project Class C Fire Ice Testing - - - Series 2. In *Consolidated Edison Company of New York, Inc.* <https://www.fireicesolutions.com/wp-content/uploads/2016/01/Class-C-Final.pdf>

Annable, K., & Manchester, S. (2008). Tests with Flame Guard b.v. aerosol suppression system for prison cell fire protection. *BRE Fire and Security*. [www.breglobal.com](http://www.breglobal.com)

Apragaz. (2017). *Declaration of Conformity Dielectric test Dupé AVD Lith-Ex* (p. 1).

Atkins, P., & De Paula, J. (2006). *Atkins' Physical Chemistry* 8th edition. Oxford University press. <https://doi.org/10.1021/ed056pA260.1>

Awad, E., Zhang, X., Bhavsar, S. P., Petro, S., Crozier, P. W., Reiner, E. J., Fletcher, R., Tittlemier, S. A., & Braekevelt, E. (2011). Long-Term Environmental Fate of Perfluorinated Compounds after Accidental Release at Toronto Airport. *Environmental Science & Technology*, 45(19), 8081–8089. <https://doi.org/10.1021/es2001985>

Barret, G., & Killey, P. (2006). Assessment of the Application of Compressed Air Foam Tankers for Grassfire Fighting. *ACT Rural Fire Service, February*, 2006–2006.

Baum, G. (2016). The Potential Reduction of Firefighter Exposure to Carbon-Based Carcinogens in Structure Fires Through the Use of Class A Compressed Air Foam Systems. *National Fire Academy*. <https://nfa.usfa.fema.gov/pdf/efop/efo49838.pdf>

Bellich, B., Borgogna, M., Cok, M., & Cesàro, A. (2011). Release Properties of Hydrogels: Water Evaporation from Alginate Gel Beads. *Food Biophysics*, 6(2), 259–266. <https://doi.org/10.1007/s11483-011-9206-3>

Berki Brandbeveiliging B.V. (2015). *MSDS BerkiCold*. <https://www.xbag.aero/documents/BerkiCold-Safety-DATA-Sheet-24-06-2015.pdf>

Braindrop B.V. (2017). *MSDS Teardrop No Flame*. 1–4. <https://doi.org/10.1021/ie50466a600>

Brandweeracademie. (2014). *Kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding*. IFV.

Brandweeracademie. (2015). *Schuim en water opnieuw belicht. Een onderzoek naar het rookgaskoelend vermogen van DLS OneSeven volgens toepassingsmethode 2.0 versus lagedruk, hogedruk en toepassingsmethode DLS 1.0*. IFV.

Brandweeracademie. (2021). *Wanneer water in rook opgaat: Een experimenteel onderzoek naar het effect van de 3D pulsmethode en de boogmethode op het koelen van rookgassen*. IFV.

BS. (2004). *EN 3-7:2004+A1:2007 Draagbare blustoestellen - Deel 7: Eigenschappen, prestatie-eisen en beproevingsmethoden*.

BS EN 2. (1992). BS EN 2:1992 Classification of fire. *Official Journal of the European Union*.

Cheryl A. Moody, †, Jonathan W. Martin, ‡, Wai Chi Kwan, †, Derek C. G. Muir, § and, & Scott A. Mabury\*, †. (2001). *Monitoring Perfluorinated Surfactants in Biota and Surface Water Samples Following an Accidental Release of Fire-Fighting Foam into Etobicoke Creek*. <https://doi.org/10.1021/ES011001+>

Cobb, G. P. (1997). F500 Environmental Report. *The Institute of Wildlife and Environmental Toxicology*, 1–7.

D'Agostino, L. A., & Mabury, S. A. (2014). Identification of Novel Fluorinated Surfactants in Aqueous Film Forming Foams and Commercial Surfactant Concentrates. *Environmental Science & Technology*, 48(1), 121–129. <https://doi.org/10.1021/es403729e>

DeWitt, J. C. (2015). *Toxicological Effect of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances*. Humana Press, Cham.

Directive 2006/122/ECOF. (2006). Directive 2006/122/EC Of The European Parliament and of The Council. *Official Journal of the European Union*, 166, 166–168.

Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M., Schaefer, T. H., & Vitali, J. A. (2002). What properties matter in fire-fighting foams? *National Research Institute of Fire and Disaster 2nd Symposium*. <https://www.solbergfoam.com/getattachment/3fe1d44d-3b44-4714-89f4-4af37e381b5b/WP-WHAT-PROPERTIES-MATTER-IN-FIRE-FIGHTING-FOAMS.aspx>

Dupré Minerals Limited. (2018a). *Brochure AVD*. <http://www.dupreminerals.com/en/products/vermiculite-dispersion>

Dupré Minerals Limited. (2018b). *Brochure AVD Lith-Ex*. <http://www.dupreminerals.com/en/products/vermiculite-dispersion>

Egelhaaf, M., Kress, D., Wolpert, D., Lange, T., Justen, R., & Wilstermann, H. (2013). Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries. *SAE International*, 2(1), 37–48.

Egelhaaf, M., Kress, D., Wolpert, D., Wilstermann, H., & Justen, R. (2013). Löschversuche an Lithium-Ionen-Traktionsbatterien. *Brandschutz*, 67(2), 104–111. [http://www.hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH\\_F5\\_AUT\\_Fire Suppression for Hybrid and Electric Vehicles-Compiled.pdf](http://www.hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH_F5_AUT_Fire%20Suppression%20for%20Hybrid%20and%20Electric%20Vehicles-Compiled.pdf)

Elide Fire Ball Pro Co Ltd. (n.d.). *Datasheet Elide Fireball*. <https://www.brandblussershop.nl/files/products/datasheet-elide-brandblusser-bal.pdf>

Elide Fire Ball Pro Co Ltd. (2016). *MSDS Elide Fireball*.  
[https://www.brandblusseradvies.nl/nl\\_NL/p/Elide-FireBall/141](https://www.brandblusseradvies.nl/nl_NL/p/Elide-FireBall/141)

FAS. (2018). *Product Information F500*. <https://www.fastechologie.nl/wp-content/uploads/2018/03/FAS-Technologie-Productinformatie-F-500.pdf>

Finnerty, A. E., Vande Kieft, L. J., & Drysdale, A. (1997). *Physical Characteristics of Fire-Extinguishing Powders*. Army Research Laboratory.  
<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a328805.pdf>

Fire Risk Alliance. (2015). *Suppression of Lithium- - - Ion Battery Fires*. 1–36.  
[https://www.fireicesolutions.com/wp-content/uploads/2016/01/FireIce-Battery-Test-Report\\_2015-010-026.pdf](https://www.fireicesolutions.com/wp-content/uploads/2016/01/FireIce-Battery-Test-Report_2015-010-026.pdf)

Fireaway Inc. (2018). *MSDS Stat-X*. <https://statx.com/downloads/>

Firecom Automotive srl. (2011). *MSDS Eolo*.  
<https://www.firecomautomotive.it/en/impiantistica-civile-af0447-eolo/>  
Firefreeze Inc. (2016). *MSDS ColdFire*. <https://firefreeze.com/wp-content/uploads/2019/09/CF302AS-SDS.pdf>

Firefreeze Inc. (2019). *Technical Book ColdFire*. <https://firefreeze.com/wp-content/uploads/2019/03/Cold-Fire-Technical-Book.pdf>

Föhl, A. (2003). *Evaluation of DLS Extinguishing Method (DE)*. Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH).

Fromme, H., Tittlemier, S. A., Völkel, W., Wilhelm, M., & Twardella, D. (2009). Perfluorinated compounds – Exposure assessment for the general population in western countries. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 212(3), 239–270.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2008.04.007>

Genuis, S. J., Birkholz, D., Ralitsch, M., & Thibault, N. (2010). Human detoxification of perfluorinated compounds. *Public Health*, 124(7), 367–375.  
<https://doi.org/10.1016/j.puhe.2010.03.002>

Hazard Control Technologies. (2014). *MSDS F500* (pp. 1–5). <http://hct-world.com/wp-content/uploads/2014/05/MSDS-F500-xxx-English-Rev-H.pdf>

Hazard Control Technologies Inc. (2018). *F500 and Lithium-ion Battery Fires*. [www.hct-world.com](http://www.hct-world.com)

Heck, U. (2011). *Löschmittel F 500 Stellungnahme der DEKRA Industrial GmbH Sehr*. DEKRA. [http://hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH\\_F5\\_AUT\\_Fire Suppression for Hybrid and Electric Vehicles-Compiled.pdf](http://hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH_F5_AUT_Fire Suppression for Hybrid and Electric Vehicles-Compiled.pdf)

Hetzer, R. H., & Kümmerlen, F. (2016). The Extinguishing Performance of Experimental Siloxane-based AFFF. *Fire Science & Engineering Conference Proceedings*, 1, 409–419.

Hetzer, R. H., Kümmerlen, F., Wirz, K., & Blunk, D. (2014). Fire testing a new fluorine-free AFFF based on a novel class of environmentally sound high performance siloxane surfactants. *Fire Safety Science*, *11*, 1261–1270. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-1261>

Hiltz, J., & Sheehan, T. (2015). *Canadian research - aerosol fire suppression systems* (Issue July). Defence Research and Development Canada.

Hoff, van 't J.H., Cohen, E., Ewan, T. (1896). *Studies in chemical dynamics*. Frederik Muller & Co, Amsterdam. <https://archive.org/details/studiesinchemica00hoffrich/page/n8/mode/2up>

Hori, H., Hayakawa, E., Einaga, H., Kutsuna, S., Koike, K., Ibusuki, T., Kiatagawa, H., & Arakawa, R. (2004). Decomposition of Environmentally Persistent Perfluorooctanoic Acid in Water by Photochemical Approaches. *Environmental Science & Technology*, *38*(22), 6118–6124. <https://doi.org/10.1021/es049719n>

Hori, H., Yamamoto, A., Hayakawa, E., Taniyasu, S., Yamashita, N., Kutsuna, S., Kiatagawa, H., & Arakawa, R. (2005). Efficient Decomposition of Environmentally Persistent Perfluorocarboxylic Acids by Use of Persulfate as a Photochemical Oxidant. *Environmental Science & Technology*, *39*(7), 2383–2388. <https://doi.org/10.1021/es0484754>

Houde, M., Martin, J. W., Letcher, R. J., Solomon, K. R., & Muir, D. C. G. (2006). Biological Monitoring of Polyfluoroalkyl Substances: A Review. *Environmental Science & Technology*, *40*(11), 3463–3473. <https://doi.org/10.1021/es052580b>

Houtz, E. F., Higgins, C. P., Field, J. A., & Sedlak, D. L. (2013). Persistence of Perfluoroalkyl Acid Precursors in AFFF-Impacted Groundwater and Soil. *Environmental Science & Technology*, *47*(15), 8187–8195. <https://doi.org/10.1021/es4018877>

Instituut Fysieke Veiligheid. (2013). *Manschap a Brandbestrijding* (2e druk). IFV.

Jockel GmbH. (2008). *MSDS SP 41/05* (pp. 1–6). <https://www.jockel.de/en/help/safety-data-sheets>

Jones, A. R. (1985). Combustion physics. *Physics Education*, *20*(6), 006. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/20/6/006>

Ju, X., Jin, Y., Sasaki, K., & Saito, N. (2008). Perfluorinated Surfactants in Surface, Subsurface Water and Microlayer from Dalian Coastal Waters in China. *Environmental Science & Technology*, *42*(10), 3538–3542. <https://doi.org/10.1021/es703006d>

Kannan, K., Corsolini, S., Falandysz, J., Oehme, G., Focardi, S., & Giesy, J. P. (2002). Perfluorooctanesulfonate and Related Fluorinated Hydrocarbons in Marine Mammals, Fishes, and Birds from Coasts of the Baltic and the Mediterranean Seas. *Environmental Science & Technology*, *36*(15), 3210–3216. <https://doi.org/10.1021/es020519q>

Kappetijn Safety Specialists, & H2K. (2018). Fluorhoudend blusschuim. *Whitepaper*.

- King, H., & Geertsema, T. P. (n.d.). *Minerals as firefighting agents*. Unpublished.
- KIWA. (2010). *Evaluation Guideline for aerosol fire extinguishing BRL-K23001/4*. 1–34. <http://www.kiwa.nl/upload/BRL/BRL-K23001.04.pdf>
- Konstrukta Defence a.s. (2016). *CE Certificate (SK) Elide Fireball*. [https://www.brandblusseradvies.nl/nl\\_NL/p/Elide-FireBall/141](https://www.brandblusseradvies.nl/nl_NL/p/Elide-FireBall/141)
- Krisch, P. (2013). *Modern Fluoroorganic Chemistry: Synthesis, Reactivity, Applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Kühnl, N. (2012). *Lithium-Ionen-Batterien stellen in Brandversuchen Sicherheit unter Beweis*. DEKRA.
- Kwadijk, C. J. A. F., Korytár, P., & Koelmans, A. A. (2010). Distribution of Perfluorinated Compounds in Aquatic Systems in The Netherlands. *Environmental Science & Technology*, 44(10), 3746–3751. <https://doi.org/10.1021/es100485e>
- Laitinen, J. A., Koponen, J., Koikkalainen, J., & Kiviranta, H. (2014). Firefighters' exposure to perfluoroalkyl acids and 2-butoxyethanol present in firefighting foams. *Toxicology Letters*, 231(2), 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.09.007>
- Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles-Hutchens, A., & Seed, J. (2007). Perfluoroalkyl acids: a review of monitoring and toxicological findings. *Toxicological Sciences: An Official Journal of the Society of Toxicology*, 99(2), 366–394. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm128>
- Liu, Z., & Kim, A. K. (2000). A Review of water mist fire suppression systems - Fundamental studies. *Fire Protection Engineering*, 10(3), 32–50. <https://doi.org/10.1177/104239159901000303>
- Luo, W. T., Zhu, S. B., Gong, J. H., & Zhou, Z. (2018). Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries. *Procedia Engineering*, 211, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.045>
- Madrzykowski, D. (1988). *Study of the Ignition Inhibiting Properties of Compressed Air Foam*. National Institute for Standards and Technology. <https://www.nist.gov/publications/study-ignition-inhibiting-properties-compressed-air-foam>
- Munoz, G., Desrosiers, M., Duy, S. V., Labadie, P., Budzinski, H., Liu, J., & Sauvé, S. (2017). Environmental Occurrence of Perfluoroalkyl Acids and Novel Fluorotelomer Surfactants in the Freshwater Fish *Catostomus commersonii* and Sediments Following Firefighting Foam Deployment at the Lac-Mégantic Railway Accident. *Environmental Science & Technology*, 51(3), 1231–1240. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05432>
- NEN-EN 16327. (2014). *NEN-EN 16327:2014 Brandweer - Overdruk schuim bijmengsystemen en druklucht schuimsystemen*.

- Orchidee S.A.S. (2015). *MSDS Inilam AX* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1021/ie50466a600>
- Pane, L., Giacco, E., & Mariottini, G. L. (2014). Application of the multiuse encapsulator agent F-500 for environmental remediation. *Journal of Biological Research (Italy)*, *87*(1). <https://doi.org/10.4081/jbr.2014.2131>
- Pane, L., Mariottini, G. L., & Giacco, E. (2015). Ecotoxicological assessment of the micelle encapsulator F-500. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *118*, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.021>
- Place, B. J., & Field, J. A. (2012). Identification of Novel Fluorochemicals in Aqueous Film-Forming Foams Used by the US Military. *Environmental Science & Technology*, *46*(13), 7120–7127. <https://doi.org/10.1021/es301465n>
- Prevedouros, K., Cousins, I. T., Buck, R. C., & Korzeniowski, S. H. (2006). Sources, Fate and Transport of Perfluorocarboxylates. *Environmental Science & Technology*, *40*(1), 32–44. <https://doi.org/10.1021/es0512475>
- Regulation (EC) No 1907/2006. (2006). Regulation (EC) No 1907/2006. *Official Journal of the European Union*, *29*(1), 1–26. <https://doi.org/http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:396:0001:0849:EN:PDF>
- Regulation (EC) No 2017/1000. (2017). Regulation (EU) No 2017/1000. *Official Journal of the European Union*.
- Regulation (EC) No 552/2009. (2009). Commission Regulation (EC) No 552/2009. *Official Journal of the European Union*, *2009*(552), 7–31.
- Regulation (EC) No 757/2010. (2010). Commission Regulation (EU) No 757/2010. *Official Journal of the European Union*, *757*, 29–36.
- RH Brandbeveiliging. (2019). *Datasheet AFO Fireball*.
- Salgromatic Fire Systems. (2015). *MAG LifeSaver Examples of Application Scenarios*.
- Salgromatic Fire Systems. (2018). *Brochure LifeSaver* (p. 1).
- Särdqvist, S. (2002). *Water and other extinguishing agents* (p. 336). <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/23061.pdf>
- Särdqvist, S., & Svensson, S. (2001). Fire tests in a large hall, using manually applied high- and low-pressure water sprays. *Fire Science & Technology*, *21*(1), 1–17. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/21/1/21\\_1\\_1/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/21/1/21_1_1/_pdf)
- Saylor, J. R., Smith, G. B., & Flack, K. A. (2000). The effect of a surfactant monolayer on the temperature field of a water surface undergoing evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *43*(17), 3073–3086. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00356-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00356-7)



Schuling, R. D. (2015). Serpentinite Slurries against Forest Fires. *Open Journal of Forestry*, 5(5), 255–259. <https://doi.org/10.4236/ojf.2015.53022>

Schultz, M. M., Higgins, C. P., Huset, C. A., Luthy, R. G., Barofsky, D. F., & Field, J. A. (2006). Fluorochemical Mass Flows in a Municipal Wastewater Treatment Facility †. *Environmental Science & Technology*, 40(23), 7350–7357. <https://doi.org/10.1021/es061025m>

Scott, B. F., Spencer, C., Mabury, S. A., & Muir, D. C. G. (2006). Poly and Perfluorinated Carboxylates in North American Precipitation. *Environmental Science & Technology*, 40(23), 7167–7174. <https://doi.org/10.1021/es061403n>

Seeger, E., van Rensburg, A. S. W., & van de Hoogt, W. A. (2008). Elide Fireball Test Report. *South African Bureau of Standards*, 1–4. [https://elidefireball.co.za/wp-content/uploads/2018/10/SABS-Test-Report\\_South-Africa.pdf](https://elidefireball.co.za/wp-content/uploads/2018/10/SABS-Test-Report_South-Africa.pdf)

SFPE. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J. M. Watts, & C. Wieczorek (eds.); 5th ed., Vol. 1, Issue 5). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

Sheehan, T. (2013). *Royal Canadian Navy Evaluation of Handheld Aerosol Extinguishers* [University of Waterloo]. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/7486>

Shenzhen TCT Testing Technology. (2013). *MSDS AFO Fireball*. <http://www.isotechgroup.com/wp-content/uploads/2016/03/msds-lifetech.pdf>

Siegemund, G., Schwertfeger, W., Feiring, A., Smart, B., Behr, F., Vogel, H., McKusick, B., & Kirsch, P. (2016). Fluorine Compounds, Organic. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 1–56). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. [https://doi.org/10.1002/14356007.a11\\_349.pub2](https://doi.org/10.1002/14356007.a11_349.pub2)

Taniyasu, S., Yamashita, N., Yamazaki, E., Rostkowski, P., Yeung, L. W. Y., Kurunthachalam, S. K., Kannan, K., & Loganathan, B. G. (2015). Contamination Profiles of Perfluorinated Chemicals in the Inland and Coastal Waters of Japan Following the Use of Fire-Fighting Foams. In: Idem, (2015). *Water Challenges and Solutions on a Global Scale* (pp. 221–244). <https://doi.org/10.1021/bk-2015-1206.ch011>

The Fire Service College. (2001). *Firefighter Initial: Physics and Chemistry for Firefighters*. *HM Fire Service Inspectorate Publications Section*.

Thorns, J. (2011, March). Feuerwehreinsatz an Hochvoltfahrzeugen. *Brandschutz*. [http://hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH\\_F5\\_AUT\\_Fire Suppression for Hybrid and Electric Vehicles-Compiled.pdf](http://hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH_F5_AUT_Fire%20Suppression%20for%20Hybrid%20and%20Electric%20Vehicles-Compiled.pdf)

Thorns, J. (2012). F-500: ein Löschmittel für spezielle Fälle. *Brandschutz*. [http://hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH\\_F5\\_AUT\\_Fire Suppression for Hybrid and Electric Vehicles-Compiled.pdf](http://hct-world.com/wp-content/uploads/2013/08/Articles/CH_F5_AUT_Fire%20Suppression%20for%20Hybrid%20and%20Electric%20Vehicles-Compiled.pdf)

- USEPA. (2012). *Bulletin EPA F500* (pp. 1–3).  
<http://www.epa.gov/emergencies/content/ncp/products/f500.htm>
- Vakgroep IBGS. (2020). *Operationeel naslagwerk Incident Bestrijding Gevaarlijke Stoffen (IBGS)* (4e druk). Brandweer Nederland.
- Verbakel, H. (2018). *Thermo responsief hydrogel (email correspondentie)*. Labora Vision B.V.
- Vestergren, R., & Cousins, I. T. (2009). Tracking the pathways of human exposure to perfluorocarboxylates. *Environmental Science & Technology*, 43(15), 5565–5575.  
<https://doi.org/10.1021/es900228k>
- Vogels, J., de Hullu, E., Kuper, J., Schipper, A., O’Conner, I., van Gestel, K., Hernandez, C. E., Sanchez, C. Q., & Verweij, R. (2015). Ecologische effecten van additieven in bluswater bij bestrijding natuurbranden. Presentatie in *Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit*.  
[https://www.natuurkennis.nl/Uploaded\\_files/Publicaties/obn197-dz-ecologische-effecten-van-additieven-in-bluswater-bij-bestrijding-natuurbranden.1683c8.pdf](https://www.natuurkennis.nl/Uploaded_files/Publicaties/obn197-dz-ecologische-effecten-van-additieven-in-bluswater-bij-bestrijding-natuurbranden.1683c8.pdf)
- Vylund, L., Gehandler, J., Karlsson, P., Peraic, K., Huang, C., & Evegren, F. (2019). *Fire-fighting of alternative fuel vehicles in ro-ro spaces*. RISE Research Institute of Sweden.  
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1392421&dswid=-7412>
- Walker, P., & Gray, G. (2012). *Report AVD BRE* (pp. 1–7).  
<https://www.avdfire.com/tpl/downloads/BREAVDCertificate.pdf>
- Wang, P. (2015). Application of Green Surfactants Developing Environment Friendly Foam Extinguishing Agent. *Fire Technology*, 51(3), 503–511. <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0422-5>
- Weckman, E., Topic, A., Sheehan, T., & Hitchman, G. (2014). *Martitime Evaluation Of Aerosol Fire Knock Down Tools Part 2 : Toxicity And Corrosion* (Vol. 80). University of Waterloo.
- Wilson, C. (2006). Fire Blocking Gels. *New South Wales Fire Brigades Safety Bulletin*, 1, 1–2. <http://firestudy.weebly.com/uploads/7/9/5/9/7959139/sb24.pdf>
- Wilson, W. E., & Fristrom, R. M. (1963). Radicals in flame. *APL Technical Digest*, 2, 10–15.
- Worley, R. R., Moore, S. M., Tierney, B. C., Ye, X., Calafat, A. M., Campbell, S., Woudneh, M. B., & Fisher, J. (2017). Per- and polyfluoroalkyl substances in human serum and urine samples from a residentially exposed community. *Environment International*, 106, 135–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.007>
- Wörz, M., Rohozneau, O., & Döring, H. (2016). *Report AVD Lith-EX ZSW* (pp. 1–15). Zentrum für Sonnenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg.  
<https://www.brandblussershop.nl/files/products/certificaat-rapport-avd-lith-ex-zsw-v2.pdf>

Xu, L., Zhu, H., Ozkan, H. E., & Thistle, H. W. (2010). Evaporation rate and development of wetted area of water droplets with and without surfactant at different locations on waxy leaf surfaces. *Biosystems Engineering*, 106(1), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.004>

Yeung, L. W. Y., & Mabury, S. A. (2013). Bioconcentration of Aqueous Film-Forming Foam (AFFF) in Juvenile Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12505–12513. <https://doi.org/10.1021/es403170f>

Zeng, J., Cao, L., Xu, M., Zhu, T., & Zhang, J. Z. H. (2020). Complex reaction processes in combustion unraveled by neural network-based molecular dynamics simulation. *Nature Communications*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19497-z>

Zhang, X., Ismail, M. H. S., Ahmadun, F. R. B., Abdullah, N. B. H., & Hee, C. (2015). Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: A review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(3), 707–724. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150323s00003510>

Zhang, Y., Beesoon, S., Zhu, L., & Martin, J. W. (2013). Biomonitoring of Perfluoroalkyl Acids in Human Urine and Estimates of Biological Half-Life. *Environmental Science & Technology*, 47(18), 10619–10627. <https://doi.org/10.1021/es401905e>

Zylstra, S. (2010). Mammalian toxicity test Firelce. *United States Department of Agriculture*. <https://www.fireicesolutions.com/whitepapers-list/>

Zylstra, S. (2011a). Corrosion tests Firelce. *United States Department of Agriculture*. <https://www.fireicesolutions.com/whitepapers-list/>

Zylstra, S. (2011b). Fish toxicity test Firelce. *United States Department of Agriculture*. <https://www.fireicesolutions.com/whitepapers-list/>

# Bijlage 1: Producten

In dit onderzoek is gekeken welke producten op de markt zijn die passen binnen de groepen en types blusmiddelen zoals besproken in hoofdstuk 3. In een uitgebreide marktverkenning is gezocht naar verschillende aanbieders en producten. Zoals aangegeven in de afbakening wordt deze marktverkenning niet verondersteld volledig te zijn. In deze bijlage wordt toegelicht wat elk product doet en hoe het werkt. Hierbij wordt gekeken of en in welke mate het afwijkt van de fysische en chemische werkingsprincipes zoals benoemd in hoofdstuk 3. Ook wordt gekeken of er een specifieke toepasbaarheid of afwijking is van de inzetacties voor het betreffende type blusmiddel zoals besproken in hoofdstuk 3. Bij de schuimblusmiddelen is gekeken naar verschillende manieren om schuim te maken.

## Aerosolgeneratoren

Aerosolgeneratoren verspreiden in zeer korte tijd een hoeveelheid blusmiddel (aerosol) in de lucht met behulp van druk, bijvoorbeeld door verbranding, explosies of drukcilinders. In een aerosolgenerator wordt het aerosol vaak geproduceerd door een verbrandingsreactie. De werking van het aerosol bluspoeder berust op de binding van radicalen (B3). Bijkomende neveneffecten zijn het opnemen van warmte (T3) en de generator zorgt voor het verdringen van zuurstof (Z1), brandstof (B1) en warmte (T1) bij het verspreiden van het aerosol. Op basis van de fysische en chemische principes van deze groep blusmiddelen zijn de blussende werking en hierbij mogelijke inzetacties bepaald. Deze zijn beschreven in paragraaf 3.1. De producten die genoemd staan in tabel B2.1 hieronder zijn verkrijgbaar op de markt.

**Tabel B2.1 Verkrijgbare aerosolgeneratoren**

Naam	Werkzame stof	Fabrikant	Beschikbaarheid
AFO Fireball	Monoammonium fosfaat	LR Industries	Commercieel
DSPA	Kaliumnitraat	DSPA.nl	Commercieel
Elide Fireball	Monoammonium fosfaat	Elide Fire Ball Pro Co. LTD	Commercieel
Eolo Flame Inhibitor	Kaliumnitraat	Firecom Automotive S.R.L.	Europa, niet in NL
FirePro	Kaliumnitraat	Firesafety 4 You B.V.	Commercieel
LifeSaver MG	Kaliumnitraat	Salgrom Technologies Inc.	Europa, niet in NL
Pyrogen Grenade	Kaliumnitraat	PyroGen Ltd.	Nee
Stat-X First Responder	Kaliumnitraat	Fireaway Inc.	Commercieel

## AFO Fireball

De AFO Fireball is een ronde aerosolgenerator met een diameter van 15 cm die in een vuur geworpen kan worden en daar vervolgens na 5 tot 10 s explodeert. De AFO Fireball bevat 1,25 kg aerosol en is geschikt voor een brandoppervlak van 8-10 m<sup>2</sup>. Omdat het blusmiddel explodeert, is de ontladingstijd verwaarloosbaar kort. De AFO Fireball wordt geproduceerd door LR Industries en is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

### Bijzonderheden

- > De aerosolgenerator activeert bij contact met brand (RH Brandbeveiliging, 2019).
- > De aerosolgenerator bevat monoammoniumfosfaat (ABC-poeder) en bij gebruik kunnen gevaarlijke gassen zoals fosforoxiden (P<sub>x</sub>O<sub>y</sub>), stikstofoxiden (N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>) en ammonia (NH<sub>3</sub>) ontstaan (Shenzhen TCT Testing Technology, 2013).

## DSPA

DSPA produceert een lijn van aerosolgeneratoren voor diverse toepassingen. Voor de brandweer is een cilindervormige aerosolgenerator met handvat beschikbaar dat met een pin geactiveerd wordt (series 5). De generator heeft een radiale uitstraling en varieert van 1 tot 6 kg in gewicht. Daarmee is hij geschikt voor een volume van 0,3 tot 154 m<sup>3</sup>. De ontladingstijd ligt tussen de 5 en 140 s. Deze generator wordt geproduceerd door DSPA.nl en is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

### Bijzonderheden

- > Bij de uitstroomopening kan de temperatuur oplopen tot 800 °C tijdens activering (Sheehan, 2013).
- > Bij gebruik kunnen er schadelijke concentraties NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO en CO<sub>2</sub> ontstaan (Annable & Manchester, 2008; Hiltz & Sheehan, 2015; Weckman et al., 2014).

## Elide Fireball

De Elide Fireball is een ronde aerosolgenerator die in een vuur geworpen kan worden en vervolgens explodeert. Omdat het blusmiddel explodeert, is de ontladingstijd verwaarloosbaar kort. De Elide Fireball is verkrijgbaar in twee varianten, een met een diameter van 10 cm en 400 g aerosol en een met een diameter van 15 cm en 1,5 kg aerosol. De Elide Fireball wordt geproduceerd door Elide Fire Ball Pro Co. LTD en is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

### Bijzonderheden

- > De aerosolgenerator activeert bij contact met brand en bevat monoammoniumfosfaat (ABC-poeder) (Seeger et al., 2008).
- > Het aerosol is irriterend bij inademing, maar niet bij huidcontact (Elide Fire Ball Pro Co Ltd, n.d., 2016; Konstrakta Defence a.s., 2016).

### **Eolo Flame Inhibitor**

De Eolo Flame Inhibitor is een staafvormige aerosolgenerator die elektrisch geactiveerd wordt middels een drukknop. Hij heeft een eenzijdige axiale uitstraling en bevat 250 of 600 gr aerosol. De Eolo Flame Inhibitor wordt geproduceerd door Firecom Automotive S.R.L. en is commercieel verkrijgbaar in Europa, maar niet in Nederland.

#### **Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken**

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

#### **Bijzonderheden**

Bij gebruik kunnen kleine hoeveelheden NO<sub>x</sub> en CO<sub>2</sub> ontstaan (Firecom Automotive srl, 2011).

### **FirePro**

FirePro produceert een lijn van aerosolgeneratoren. Een van de generatoren, potentieel toepasbaar voor de brandweer, is cilindervormig en wordt handmatig geactiveerd. Hij heeft een één- of tweezijdige axiale uitstraling en bevat 200 tot 1000 gr aerosol. Daarmee is deze generator geschikt voor een volume van 1,2 tot 33 m<sup>3</sup>. De ontladingstijd ligt tussen de 10 en 25 s. De generator wordt geproduceerd door Firesafety 4 You B.V. en is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

#### **Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken**

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

#### **Bijzonderheden**

Geen.

### **LifeSaver MG**

De LifeSaver MG is een cilindervormige aerosolgenerator die handmatig geactiveerd wordt. Hij heeft een één- of tweezijdig axiale of radiale uitstraling en bevat 200 tot 3500 gr aerosol. Daarmee is hij geschikt voor volumes van 4 tot 100 m<sup>3</sup>. De ontladingstijd ligt tussen de 7 en 10 s. De generator wordt geproduceerd door Salgrom Technologies Inc. en is commercieel verkrijgbaar in Europa, maar niet in Nederland.

#### **Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken**

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

#### **Bijzonderheden**

Bij gebruik kunnen N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> en waterdamp ontstaan (Salgromatic Fire Systems, 2015, 2018).

### **PyroGen Grenade**

De PyroGen Grenade is een cilindervormige aerosolgenerator die wordt geactiveerd met een pin. Hij heeft een één- of tweezijdig axiale uitstraling en bevat 200 tot 500 g aerosol. De generator wordt geproduceerd door PyroGen Ltd. en is niet verkrijgbaar in Nederland.

#### **Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken**

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

## Bijzonderheden

Geen.

## Stat-X First Responder

De Stat-X First Responder is een cilindervormige aerosolgenerator die wordt geactiveerd met een pin. Hij heeft een radiale uitstraling en bevat 500 g aerosol. De generator is daarmee geschikt voor een volume tot 20 m<sup>3</sup>. De ontladingstijd is 20 s. De generator wordt geproduceerd door Fireaway Inc. en is verkrijgbaar in Nederland.

## Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

Geen afwijkingen ten opzichte van aerosolen in het algemeen (zie paragraaf 3.1).

## Bijzonderheden

Bij gebruik kunnen schadelijke concentraties NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, NO en CO ontstaan (Fireaway Inc., 2018; Hiltz & Sheehan, 2015; Weckman et al., 2014).

## Watergedragen additieven

In Tabel B2.2 is een overzicht weergegeven van de watergedragen additieven die verkrijgbaar zijn. Daaronder worden de afzonderlijke producten uitgebreid besproken, waarbij de werking van elk middel, de toepassingen en begrenzingen, voor- en nadelen en mogelijke toepassing bij de verschillende incidentscenario's genoemd worden, voor zover deze afwijken van wat beschreven staat in hoofdstuk 3.

**Tabel B2.2 Overzicht van fabrikanten en producten van watergedragen additieven**

Naam	Werkzame stof	Werkingsprincipe	Fabrikant	Beschikbaarheid
Firelce	Acrylaat polymeer	Polymerisatie	Firelce	Commercieel
Firesorb	Polyacrylamide	Polymerisatie	Evonik Corporation	Commercieel
Gel based extinguishers	Fluorhoudende surfactanten, koolwaterstof surfactanten	Polymerisatie	Jockel	Commercieel
Thermoresponsief hydrogel	Mineralen, polyacrylamide	Polymerisatie	Labora Vision	In ontwikkeling
Teardrop No Flame	Monoammoniumfosfaat, polyacrylzuur	Polymerisatie	Braindrop	In ontwikkeling
AVD	Vermiculiet	Mineralisatie	Dupré	Commercieel
Serpentijn	Serpentijn	Mineralisatie	(...)	In concept
Fat fire extinguishers	Natriumzouten	Zeepvormende	Jockel	Commercieel
FX	Kaliumzouten	Zeepvormende	Orchidee	Commercieel

BerkiCold	FFF	Surfactant (oppervlaktespanning verlagend)	Berki Brandbe- veiliging B.V.	Commercieel
F500	AR-FFF	Surfactant (oppervlaktespanning verlagend)	Hazard Control Technologies	Commercieel
Inilam BT6, Inilam AX, Inilam A	Ammoniumzouten, fosforzuur, stikstof- derivaten	Surfactant (oppervlaktespanning verlagend)	Orchidee	Commercieel
XF 3000	FFF	Surfactant (oppervlaktespanning verlagend)	Orchidee	Commercieel
SC-6, SC-6 eco	AR-AFFF	Surfactant (oppervlaktespanning verlagend)	Orchidee	Commercieel

## Gelvormende middelen

Gelvormende middelen bevatten stoffen die onder bepaalde omstandigheden met elkaar binden (polymerisatie), waardoor water ingesloten wordt en verandert in een stroperige gel die zich in meer of mindere mate gedraagt als een vaste stof. Door de goede hechting kan de gel beter blijven plakken op een brandend oppervlak. Wanneer het water op een brandend oppervlak blijft liggen, dicht het de brandstof af (B2). Het ingesloten water in de gel heeft een koelend effect op het brandende oppervlak (B3, T2 en T3). Een gel hecht goed aan niet-horizontale oppervlakten en kan op een nog niet brandend oppervlak aangebracht worden als bescherming tegen de brand. Door de goede hechting heeft de gel een hoge oppervlaktespanning en daardoor een slecht indringend vermogen. De volgende producten zijn verkrijgbaar op de markt.

### Firelce

Firelce wordt geproduceerd door GelTech Solutions Inc. en wordt verkocht in handblussers, draagbare en inbouwunits, of als poederconcentraat in combinatie met een speciale tussenmenger. Het is commercieel verkrijgbaar, maar niet in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties

- > Is getest voor elektriciteitsbranden met een handstraal. Voor installaties tot 30kV geldt een veiligheidsafstand van 7,6 m (Amped I, 2013).
- > Firelce kan de cel-naar-cel verspreiding bij li-ion batterij branden voorkomen door onderdompeling of blussing met handblussers (Fire Risk Alliance, 2015). Het blusmiddel moet wel tot bij de individuele cellen zelf komen, wat in de praktijk lastig blijkt (Vylund et al., 2019).
- > Verder geen afwijkingen van de inzetbaarheid ten opzichte van gelvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.3).



### **Bijzonderheden**

- > Door Amerikaanse ministerie van landbouw (USDA) beoordeeld als niet schadelijk voor het watermilieu (Zylstra, 2010, 2011b, 2011a).

### **Firesorb**

Firesorb wordt geproduceerd door Degussa AG en wordt verkocht in handblussers of als vloeibaar concentraat. Het is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### **Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties**

- > Niet geschikt voor natuurbranden.
- > Verder geen afwijkingen van de inzetbaarheid ten opzichte van gelvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.3).

### **Bijzonderheden**

- > Op kleine schaal getest op li-ion batterijen met een externe ontstekingsbron (heptaan) (Egelhaaf, Kress, Wolpert, Wilstermann, et al., 2013).
- > Schadelijk voor het milieu bij hoge concentraties, maar wel snel biologisch afbreekbaar (Vogels et al., 2015).
- > Oppervlakten behandeld met Firesorb kunnen extreem glad worden (C. Wilson, 2006).

### **Jockel gel**

Jockel gel wordt geproduceerd door Jockel GmbH en wordt verkocht in handblussers en als verrijdbare trolley met een inhoud van 6 tot 50 l. De ontladingstijd ligt tussen de 32 en 166 s. Het is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### **Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties**

- > Niet geschikt voor natuurbranden.
- > Verder geen afwijkingen van de inzetbaarheid ten opzichte van gelvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.3).

### **Bijzonderheden**

Bevat fluorverbindingen (Jockel GmbH, 2008).

### **Thermoresponsief hydrogel**

Dit product wordt ontwikkeld door Labora Vision B.V. en heeft nog geen merknaam. Het is in ontwikkeling als brandvertrager en blusmiddel en kan worden toegepast als vloeibaar- of poederconcentraat. Het is nog niet commercieel verkrijgbaar.

### **Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties**

Geen afwijkingen van de inzetbaarheid ten opzichte van gelvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.3).

### **Bijzonderheden**

- > Gel vormt bij hogere temperaturen (Verbakel, 2018).
- > Niet schadelijk voor milieu (Verbakel, 2018).

## Teardrop No Flame

Teardrop No Flame wordt geproduceerd door Braindrop B.V. en is verkrijgbaar als brandvertrager. Op dit moment wordt het ontwikkeld als blusmiddel. Het kan worden toegepast als vloeibaar- of poederconcentraat, of als kant-en-klare gel. Het is nog niet commercieel verkrijgbaar als blusmiddel.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

- > Niet geschikt voor natuurbranden.
- > Verder geen afwijkingen van de inzetbaarheid ten opzichte van gelvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.3).

### Bijzonderheden

Bevat monoammoniumfosfaat (ABC-poeder) en is het schadelijk voor grondwater (Braindrop B.V., 2017).

## Mineraalblusmiddelen

Mineraalblusmiddelen zijn poeders of vloeistoffen (vaak in een waterige oplossing) met mineralen die bij hoge temperaturen een vaste stof vormen. Ze kunnen daardoor een laag vormen op een brandstof. In de laag zit vaak water of lucht ingesloten. Hierdoor zal de laag isoleren of koelen. Mineraalblusmiddelen hebben een lagere viscositeit dan water (afhankelijk van de hoeveelheid mineralen die wordt toegevoegd) en zijn een soort papachtige emulsie. De reactie van een mineraalblusmiddel is vrijwel altijd endotherm (T4). De mineralen bevatten vaak ingesloten water, dat vrijkomt bij hoge temperaturen. Door het verlies van water vormen sommige mineralen een laag die het brandoppervlak afsluit (Z2 en B2). Het vrijgekomen water heeft een koelende werking (B4, T2 en T3). Door het toegevoegde mineraal is de warmtecapaciteit van een mineraalblusmiddel vaak hoger dan van water. De volgende producten zijn verkrijgbaar op de markt.

### AVD

AVD (Aqueous Vermiculite Dispersion) is een mineraalblusmiddel dat geproduceerd wordt door Dupré Minerals Ltd. Het is verkrijgbaar in de vorm van handblussers, draagbare, verrijdbare en inbouwunits en stationaire systemen. De AVD-producten bevatten 17 % vermiculiet en bestaan uit deeltjes met een grootte tussen de 25 en 275 µm (Dupré Minerals Limited, 2018a). AVD Lith-Ex is ontwikkeld voor li-ion branden en is verkrijgbaar als handblusser van 2 tot 9 l. AVD Lith-EX bevat 13,5% vermiculiet en bestaat uit deeltjes met een grootte tussen de 20 en 180 µm (Dupré Minerals Limited, 2018b). Het is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

Geen afwijkingen van de inzetbaarheid ten opzichte van mineraalblusmiddelen in het algemeen (zie paragraaf 3.4).

### Bijzonderheden

- > AVD is goedgekeurd voor klasse A branden volgens de norm EN 3-7:2004 (BS, 2004; Walker & Gray, 2012).
- > AVD is goedgekeurd voor toepassing bij elektriciteitsbranden tot 35kV (Apragaz, 2017).

- > AVD Lith-Ex is op kleine schaal getest op li-ion branden, waar het een thermal runaway tussen cellen kon voorkomen (Wörz et al., 2016). Hiervoor moet het middel wel tussen de cellen kunnen komen.

### Serpentijn

Serpentijn is een mineralengroep die potentieel interessant is als blusmiddel. Diverse universiteiten en bedrijven tonen interesse om deze mineralengroep in waterige oplossing te gebruiken als blusmiddel vanwege de eigenschappen en beschikbaarheid. Het is echter nog niet in ontwikkeling als blusmiddel. Serpentijn reageert bij temperaturen van 600-700 °C. Andere theoretisch interessante mineraalgroepen zijn boraten, hydroxiden (zoals bruciet en portlandiet), carbonaten (zoals sideriet en calciet) en fosfaten (zoals hydroxyapatiet) (King & Geertsema, n.d.).

#### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

- > De mineraallaag die ontstaat, lost snel op bij blootstelling aan de lucht waarbij de laag CO<sub>2</sub> opneemt. Hierdoor is serpentijn potentieel interessant voor natuurbranden (Schuiling, 2015).
- > Verder zijn er geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van mineraalblusmiddelen in het algemeen bekend.

#### Bijzonderheden

- > Er zijn enkele kleinschalige testen geweest met serpentijn (Schuiling, 2015).
- > Serpentijn kan van nature vervuild zijn met witte asbest.

## Zeepvormende middelen

Een zeepvormend middel is een stof die een zeepvormende reactie aangaat met een olie of vet. Zeepvorming is ook bekend als verzeping: een reactie tussen een sterk loog en een olie of vet bij hoge temperaturen waarbij zeep ontstaat. De primaire blussende werking van zeepvormende middelen is het reageren met de brandstof. Hierdoor worden pyrolyseproducten gebonden voordat deze verbranden (B3). Deze reactie is sterk endotherm en neemt hierdoor energie weg van de brand (T4). De volgende producten zijn verkrijgbaar op de markt.

### Jockel wet chemical

Jockel wet chemical wordt geproduceerd door Jockel GmbH en wordt verkocht in handblussers met een inhoud van 2 – 3 l. De ontladingstijd ligt tussen de 14 en 17 s. Het product is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

#### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

Geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van zeepvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.5).

#### Bijzonderheden

Geen.

## Orchidee FX

Orchidee FX wordt geproduceerd door Orchidee Europe BVBA en wordt verkocht als handblusser. Het is commercieel verkrijgbaar Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties

Geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van zeepvormende middelen in het algemeen (zie paragraaf 3.5).

### Bijzonderheden

Geen.

## Surfactanten

Een surfactant is een oppervlakte-actieve stof die als additief wordt toegevoegd aan water waardoor de oppervlaktespanning van het water verlaagd wordt (Atkins & De Paula, 2006). Het water verspreidt zich dan over een groter oppervlak. Surfactanten zijn de belangrijkste bestanddelen van schuimvormende middelen (SVM's) en worden soms ook 'wetting agents' genoemd. Door het verlagen van de oppervlakte spanning van water wordt het indringende vermogen van water vergroot. De primaire blussende werking van surfactanten berust op het koelen van de brandstof (B4) en het wegnemen van energie van de verbranding doordat het water opwarmt en verdampt (T2 en T3). De volgende producten zijn verkrijgbaar op de markt.

### BerkiCold

BerkiCold is een watergedragen additief met organische en anorganische surfactanten en wordt geproduceerd door Berki Brandbeveiliging B.V. Het is beschikbaar als handblusser of vloeibaar concentraat. Het is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties

- > Vloeistofbrand: het middel kan apolaire koolwaterstoffen binden en hiermee mogelijk (uitdampende) vloeibare brandstoffen binden.
- > Beperken of voorkomen van pyrolyse: het middel zou mogelijk invloed kunnen hebben op het beperken van rookoverlast.
- > Verder geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van surfactanten in het algemeen (zie paragraaf 3.6).

### Bijzonderheden

- > Kan schadelijk zijn voor het grondwater en inademing en huidcontact dienen voorkomen te worden (Berki Brandbeveiliging B.V., 2015).
- > Het actieve ingrediënt in BerkiCold is ColdFire JG302. ColdFire wordt geproduceerd door Firefreeze Inc. en heeft een hoge warmtecapaciteit en kan koolwaterstoffen insluiten en/of afbreken (Firefreeze Inc., 2019).
- > Coldfire is biologisch afbreekbaar in 21 dagen en de afbraakproducten van ColdFire kunnen CO en CO<sub>2</sub> bevatten (Firefreeze Inc., 2016).

## F500

F500 is een watergedragen additief met surfactanten en wordt geproduceerd door Hazard Control Technologies Inc. Het is verkrijgbaar als vloeibaar concentraat. Het is toe te passen met gebruik van een straalpijp met tussenmenger. Het is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

- > Batterijbranden: de snelle temperatuurreductie van F500 is mogelijk effectief bij li-ion branden (Egelhaaf, Kress, Wolpert, Lange, et al., 2013; Hazard Control Technologies Inc., 2018; Heck, 2011; Kühnl, 2012; Luo et al., 2018). Geen van deze onderzoeken gaat nader in op de fysische of chemische reden voor deze snelle temperatuurreductie ten opzichte van andere blusmiddelen. Voorwaarde is dat het blusmiddel zoveel mogelijk direct contact met het brandoppervlak heeft, maar dit blijkt in de praktijk lastig bij li-ion batterijbranden (Vylund et al., 2019). De veiligheidsafstanden zijn volgens de fabrikant bij gebruik van een gebonden straal minimaal 5 m en met sproeistraal minimaal 1 m (Thorns, 2011).
- > Vloeistofbrand: F500 kan apolaire koolwaterstoffen binden en hiermee mogelijk (uitdampende) vloeibare brandstoffen binden (FAS, 2018).
- > Beperken of voorkomen van pyrolyse: F500 kan rookoverlast beperken en de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de rook verminderen, ook bij toepassing op de rook zelf (Cobb, 1997; Thorns, 2012). Dit is echter alleen op kleine schaal getest; de effecten op grote schaal zijn onbekend.
- > Verder geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van surfactanten in het algemeen (zie paragraaf 3.6).

### Bijzonderheden

- > Hazard Control Technologies stelt dat het middel ook kookpunt verlagend werkt, waardoor vanaf 70 °C verdamping ontstaat (Instituut Fysieke Veiligheid (IFV), 2019; Thorns, 2012). Druppels water worden daarbij ingesloten door de surfactanten, waardoor deze een groter koelend vermogen hebben. Een belangrijke kanttekening is dat er beperkte bewijslast is voor de fysische/chemische werking van de vergroting van het koelend vermogen.
- > F500 kan irritatie veroorzaken bij contact met de huid, ogen of luchtwegen (Hazard Control Technologies, 2014; USEPA, 2012).
- > F500 is zover bekend niet schadelijk voor het milieu en in samenwerking met de leverancier is aangetoond dat de neutraliserende werking geschikt is voor het opruimen van vloeibare koolwaterstoffen (Pane et al., 2014, 2015).

## Orchidee Inilam

Inilam A, Inilam AX en Inilam BT zijn watergedragen additieven met monoammoniumfosfaat (ABC-poeder) en worden geproduceerd door Orchidee S.A.S. Ze worden toegepast in handblussers of als vloeibaar concentraat. De Inilam-producten zijn commercieel verkrijgbaar in Nederland.

### Specifieke toepasbaarheid bij inzettactieken

- > Er is een monoammoniumfosfaat (ABC-poeder) toegevoegd aan het blusmiddel. Het toegevoegde poeder kan door het binden van radicalen mogelijk bijdragen aan het blussen van een oppervlaktebrand. Of dit ook daadwerkelijk het geval is, is niet getest.
- > Niet geschikt voor natuurbranden.

- > Verder geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van surfactanten in het algemeen (zie paragraaf 3.6).

#### **Bijzonderheden**

- > Kan irriterend zijn voor de huid en ogen en schadelijk voor grondwater (Orchidee S.A.S., 2015).
- > Bij hoge temperaturen en hoge concentraties kunnen schadelijke concentraties giftige gassen ontstaan (Orchidee S.A.S., 2015).

#### **Orchidee XF 3000**

XF 3000 is een watergedragen additief met surfactanten en wordt geproduceerd door Orchidee S.A.S. Het wordt toepast in handblussers. Het is commercieel verkrijgbaar in Nederland.

#### **Specifieke toepasbaarheid bij inzetacties**

Geen afwijkingen van inzetbaarheid ten opzichte van surfactanten in het algemeen (zie paragraaf 3.6).

#### **Bijzonderheden**

Het vormt geen film of schuim en is fluorvrij.